

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ANALYSE NUMÉRIQUE DE L'ÉCOULEMENT DANS UNE CUVE
DE GALVANISATION EN CONTINU DE TÔLE D'ACIER

LUCIE OUELLET
PROGRAMME DE GÉNIE MÉTALLURGIQUE
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE MÉTALLURGIQUE)
AOÛT 2003



National Library
of Canada

Bibliothèque nationale
du Canada

Acquisitions and
Bibliographic Services

Acquisitions et
services bibliographiques

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file Votre référence

ISBN: 0-612-90849-6

Our file Notre référence

ISBN: 0-612-90849-6

The author has granted a non-exclusive licence allowing the National Library of Canada to reproduce, loan, distribute or sell copies of this thesis in microform, paper or electronic formats.

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque nationale du Canada de reproduire, prêter, distribuer ou vendre des copies de cette thèse sous la forme de microfiche/film, de reproduction sur papier ou sur format électronique.

The author retains ownership of the copyright in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur qui protège cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

In compliance with the Canadian Privacy Act some supporting forms may have been removed from this dissertation.

Conformément à la loi canadienne sur la protection de la vie privée, quelques formulaires secondaires ont été enlevés de ce manuscrit.

While these forms may be included in the document page count, their removal does not represent any loss of content from the dissertation.

Bien que ces formulaires aient inclus dans la pagination, il n'y aura aucun contenu manquant.

Canada

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé:

ANALYSE NUMÉRIQUE DE L'ÉCOULEMENT DANS UNE CUVE
DE GALVANISATION EN CONTINU DE TÔLE D'ACIER

présenté par: OUELLET Lucie

en vue de l'obtention du diplôme de: Maîtrise ès science appliquées

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de:

M. TURENNE Sylvain, Ph.D., président

M. AJERSCH Frank, Ph.D., membre et directeur de recherche

M. ILINCA Florin, Ph.D., membre

*A mes parents,
qui m'ont toujours soutenue et guidée*

REMERCIEMENTS

Mes premiers remerciements s'adressent à M.Frank Ajersch, mon directeur de recherche; présent et toujours de bonne humeur, il m'a apporté l'aide et le support technique nécessaires. À Florin Ilinca et Michel Perrault de l'IMI qui ont su m'apporter les compléments d'informations et les expertises qui me manquaient afin de faire ce travail. Merci au CRSNG pour le support financier. Merci aussi à Sylvain Turenne et Florin Ilinca d'avoir accepté de faire partie du jury d'examen.

Je désire aussi remercier Emmanuelle, Isabelle et Marie, mes compagnes de maîtrise, avec qui il fut agréable de discuter et de qui je me suis ennuyée ces derniers mois. De plus, un merci particulier à Philippe, Patrick, Hugues et tous les autres (car ils furent nombreux à prêter leurs services) qui ont su m'apporter les bras et les idées quand j'en avais besoin. Carole, ta disponibilité, ton aide et tes idées ont fait que je ne suis pas encore devant mon montage aujourd'hui, je t'en remercie grandement.

Merci à Mélanie et Sonia, pour leur amitié et leur aide. Une pensée aussi à Diane pour les corrections de dernière minute. Merci Éric d'être là et de représenter la profession d'ingénieur telle que je souhaite l'exercer.

RÉSUMÉ

La galvanisation de l'acier en continu a fait l'objet de plusieurs recherches et l'accent est mis de plus en plus sur la modélisation de l'écoulement dans le bain de galvanisation. La simulation de ce procédé permet de comprendre les phénomènes impliqués et de résoudre des problèmes industriels. Un modèle numérique a été développé par l'IMI-CNRC afin de simuler, par la méthode des éléments finis, l'écoulement turbulent généré à l'intérieur du bain de galvanisation. Le présent travail consiste en la validation de l'écoulement et de l'aspect thermique du modèle par l'utilisation d'un modèle à eau.

Un modèle à eau simulant un bain de galvanisation d'acier en continu à une échelle de 1 :5 avait préalablement été construit et avait servi pour prendre certaines mesures de vitesse de l'écoulement au moyen de la technologie de vélocimétrie par laser. Afin de simuler l'ajout périodique de lingots pour maintenir le niveau de zinc et d'aluminium dans le bain, un bloc en cuivre réfrigéré a été ajouté au bain. Ainsi, la variation de température dans le temps a pu être mesurée à partir de ce modèle à eau.

Avec l'établissement des conditions de vitesse et de température, ces expériences autant isothermes que non-isothermes ont pu être simulées numériquement. Le modèle utilise les équations de Navier-Stokes, du transfert thermique de même

que le modèle de turbulence $k - \epsilon$ pour simuler l'écoulement dans un bain de galvanisation.

La comparaison des solutions expérimentales et numériques a tout d'abord permis de montrer que le modèle numérique représentait bien l'écoulement observé par les expériences sur le modèle à eau. Il a par contre été difficile de comparer directement les valeurs de turbulence près des surfaces en mouvement. Les valeurs expérimentales rapportées présentent plusieurs incertitudes, probablement reliées au manque de sensibilité de la méthode.

Dans les conditions non-isothermes, les courbes de la variation de température dans le temps telles que calculées par le modèle numérique sont très similaires à celles obtenues par les expériences sur le modèle à eau. La présence du lingot apporte quelques incertitudes sur les conditions initiales de température, mais une analyse de la validité du modèle peut néanmoins être faite. Le modèle numérique permet de prédire avec précision le transfert thermique présent dans le bain.

ABSTRACT

The continuous galvanizing process has been the object of many studies, the emphasis being put more and more on the numerical modeling of the flow observed in a galvanizing bath. The simulation of this process has been very useful to understand the flow and thermal phenomena and to resolve industrial problems. A numerical model was developed by IMI-NRC to simulate, by finite element analysis, the turbulent flow and the thermal transport within a galvanizing bath. The following study consists in the validation of the flow and the thermal aspect of the model using a water model.

A 1:5 scale water model simulating a continuous galvanizing bath was built and velocity measurements were previously taken using Doppler laser technology. In order to simulate the periodic addition of zinc alloy ingots to the bath to maintain the bath level, a refrigerated copper block simulating a cold ingot was added to the water model. The temperature variation in time was measured within this water model.

After establishing flow velocity and temperature conditions, the experiments can be simulated using the numerical model developed by IMI-NRC. This model uses the Navier-Stokes equations, the thermal transfer equation as well as the $k - \epsilon$ turbulence model to simulate the flow in the galvanizing bath.

The comparison of the experimental and numerical results shows that the numerical model gives a good representation of the flow observed in the experiments with the water model. However, it was hard to compare the absolute turbulence values near the high velocity surfaces. The reported experimental values show that the measurement method is not sensitive enough to account for the actual local variations.

For the non-isothermal conditions, the temperature variation with time, as calculated by the numerical model, is very similar to the values obtained with the water model experiments. Some uncertainty exists as to the initial temperature conditions due to the presence of the ingot. Nonetheless, an analysis of the results shows the validity of the model in predicting the thermal transfer in the bath.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	v
RÉSUMÉ	vi
ABSTRACT	viii
TABLE DES MATIÈRES	x
LISTE DES TABLEAUX	xii
LISTE DES FIGURES	xiii
LISTE DES NOTATIONS ET DES SYMBOLES	xxi
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1	
REVUE DE LA LITTÉRATURE	3
1.1 Procédé de galvanisation en continu	3
1.1.1 Composition du zinc liquide	6
1.1.2 Thermodynamique du bain	8
1.1.3 Couche inhibitrice	12
1.2 Modèle à eau	16
1.3 Modélisation du procédé de galvanisation en continu	22

CHAPITRE 2

CONSIDÉRATIONS EXPÉRIMENTALES ET NUMÉRIQUES . . 32

2.1	Description du modèle à eau	32
2.2	Mesure de l'écoulement	35
2.3	Mesure de la température	39
2.3.1	Ajustement du modèle à eau	39
2.3.2	Conditions thermiques expérimentales	41
2.4	Description du modèle numérique	51
2.5	Valeurs utilisées pour les calculs	58

CHAPITRE 3

OBSERVATIONS, VALIDATIONS ET DISCUSSION 65

3.1	Validation de l'écoulement dans des conditions isothermes	65
3.1.1	Analyse de la comparaison de la vitesse	65
3.1.2	Analyse de la turbulence	95
3.2	Validation de la distribution de température	102
3.3	Recommandations	134

CONCLUSION 136

RÉFÉRENCES 139

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1	Échanges impliqués dans le bain de galvanisation	7
Tableau 1.2	Composition de la couche inhibitrice selon différents chercheurs	13
Tableau 2.1	Conditions thermiques des différentes expériences avec lingot	43
Tableau 2.2	Calcul des conditions thermiques entourant le lingot avec présence de bulles d'air	46
Tableau 2.3	Calcul de la température moyenne de la paroi extérieure du lingot avec présence de bulles d'air	48
Tableau 2.4	Propriétés de l'eau à 30 ° C et des composants dans le bain	63
Tableau 2.5	Conditions thermiques des différentes expériences numériques avec lingot	64

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1	Étapes du procédé de galvanisation en continu [Marder, 2000]	4
Figure 1.2	Demi-section schématisant les composantes du bain de galvanisation	5
Figure 1.3	Coin riche en zinc de l'isotherme à 450 ° C du système Fe-Al-Zn proposé par Urednicek et Kirkaldy (1973).	9
Figure 1.4	Coin riche en zinc de l'isotherme à 460 ° C du système Fe-Al-Zn proposé par Tang (1995)	10
Figure 1.5	Coin riche en zinc pour l'isotherme à 460 ° C montrant la solubilité du fer comme une fonction de la concentration d'aluminium tel que proposé par McDermid et Thompson (2002)	12
Figure 1.6	Courbes de croissance de la couche inhibitrice selon différentes expériences	14
Figure 1.7	Écoulement observé dans le modèle à eau selon Ajersch et al. (1992)	19
Figure 1.8	Écoulement observé par Kato et al. (1995)	20
Figure 1.9	Modélisation de l'écoulement par Binet (2000)	25
Figure 1.10	Schématisation de l'écoulement tel que simulé par Gagné et Gaug (1998)	27

Figure 1.11	Schématisation de l'écoulement et de la distribution de la température selon les simulations du groupe de l'IMI [Ajersch et al., 2002a]	28
Figure 1.12	Région où la vitesse du zinc liquide est inférieure à 0,01 m/s [Ajersch et al., 2002a]	29
Figure 1.13	Variation de l'aluminium total a) et c) et de l'aluminium précipité b) et d) en fonction du temps [Ajersch et al., 2002b]	31
Figure 2.1	Modèle à eau	33
Figure 2.2	Dimensions de la demi-section du modèle à eau	33
Figure 2.3	Plans des mesures de vitesse.	37
Figure 2.4	Lignes y pour les mesures quantitatives de vitesse	38
Figure 2.5	Système de refroidissement pour le lingot	41
Figure 2.6	Positions des thermocouples dans le modèle à eau	42
Figure 2.7	Situation entourant le lingot de cuivre avec λ ; la conductivité thermique et h ; le coefficient de transfert de chaleur	44
Figure 2.8	Situation entourant le lingot de cuivre avec bulles d'air avec λ ; la conductivité thermique et h ; le coefficient de transfert de chaleur	45
Figure 2.9	Sensibilité des thermocouples face à la mise en marche du moteur	49
Figure 2.10	Influence du moteur sur la fluctuation des mesures	50

Figure 2.11	Schématisation de l'écoulement près du mur	56
Figure 2.12	Algorithme de calcul [Ilina et al., 2003]	59
Figure 2.13	Maillage du modèle à eau pour simulation numérique	60
Figure 3.1	Comparaison des vitesses à la ligne $y = 60$ mm et $z = 0$ mm	67
Figure 3.2	Comparaison des vitesses à la ligne $y = 60$ mm et $z = -100$ mm	68
Figure 3.3	Comparaison des vitesses à la ligne $y = 60$ mm et $z = -195$ mm	69
Figure 3.4	Comparaison des vitesses à la ligne $y = 125$ mm et $z = 0$ mm	70
Figure 3.5	Comparaison des vitesses à la ligne $y = 125$ mm et $z = -100$ mm	71
Figure 3.6	Comparaison des vitesses à la ligne $y = 125$ mm et $z = -195$ mm	72
Figure 3.7	Comparaison des vitesses à la ligne $y = 185$ mm et $z = 0$ mm	73
Figure 3.8	Comparaison des vitesses à la ligne $y = 185$ mm et $z = -100$ mm	74
Figure 3.9	Comparaison des vitesses à la ligne $y = 185$ mm et $z = -195$ mm	75
Figure 3.10	Comparaison des vitesses à la ligne $y = 240$ mm et $z = 0$ mm	76
Figure 3.11	Comparaison des vitesses à la ligne $y = 240$ mm et $z = -100$ mm	77

Figure 3.12	Comparaison des vitesses à la ligne $y = 240$ mm et $z = -195$ mm	78
Figure 3.13	Comparaison des vitesses à la ligne $y = 300$ mm et $z = 0$ mm	79
Figure 3.14	Comparaison des vitesses à la ligne $y = 300$ mm et $z = -100$ mm	80
Figure 3.15	Comparaison des vitesses à la ligne $y = 300$ mm et $z = -195$ mm	81
Figure 3.16	Comparaison des vitesses à la ligne $y = 325$ mm et $z = 0$ mm	82
Figure 3.17	Comparaison des vitesses à la ligne $y = 325$ mm et $z = -100$ mm	83
Figure 3.18	Comparaison des vitesses à la ligne $y = 325$ mm et $z = -195$ mm	84
Figure 3.19	Visualisation de l'écoulement sur le plan $z = 0$	89
Figure 3.20	Visualisation de l'écoulement sur le plan $z = -100$	90
Figure 3.21	Visualisation de l'écoulement sur le plan $z = -195$	91
Figure 3.22	Vitesse en fonction du temps pour un calcul transitoire dans des conditions isothermes	93
Figure 3.23	Comparaison des résultats de vitesse de Binet (2000) avec le modèle numérique et des résultats préliminaires du PIV . .	94
Figure 3.24	Comparaison de la turbulence à la ligne $z=0$ mm à $y=60$ mm	98

Figure 3.25	Comparaison de la turbulence à la ligne $z=-100$ mm à $y=60$ mm	98
Figure 3.26	Comparaison de la turbulence à la ligne $z=0$ mm à $y=125$ mm	99
Figure 3.27	Comparaison de la turbulence à la ligne $z=0$ mm à $y=240$ mm	99
Figure 3.28	Comparaison des résultats de Binet (2000) avec le modèle numérique et des résultats préliminaires du PIV pour $y=60$ et $z=-100$	100
Figure 3.29	Comparaison des résultats de Binet (2000) avec le modèle numérique et des résultats préliminaires du PIV pour $y=240$ et $z=0$	101
Figure 3.30	Division du bain en zones pour analyse des résultats du transfert thermique	105
Figure 3.31	Variation de température expérimentale et numérique pour le point 1 (320,222,-102) - zone A	105
Figure 3.32	Variation de température expérimentale et numérique pour le point 2 (320,220,-15) - zone A	106
Figure 3.33	Variation de température expérimentale et numérique pour le point 3 (190,230,-10) - zone A	106
Figure 3.34	Variation de température expérimentale et numérique pour le point 4 (50,170,-100) - zone A	107

Figure 3.35	Variation de température expérimentale et numérique pour le point 5 (80,80,-97) - zone A	107
Figure 3.36	Variation de température expérimentale et numérique pour le point 6 (475,130,-142) - zone B	109
Figure 3.37	Variation de température expérimentale et numérique pour le point 7 (600,65,-90) - zone B	110
Figure 3.38	Variation de température expérimentale et numérique pour le point 8 (550,220,-55) - zone B	110
Figure 3.39	Variation de température expérimentale et numérique pour le point 9 (600,220,-55) - zone B	111
Figure 3.40	Variation de température expérimentale et numérique pour le point 10 (650,220,-55) - zone B	111
Figure 3.41	Variation de température expérimentale et numérique pour le point 11 (700,220,-10) - zone B	112
Figure 3.42	Variation de température expérimentale et numérique pour le point 13 (750,220,-55) - zone B	112
Figure 3.43	Variation de température expérimentale et numérique pour le point 14 (650,280,-10) - zone B	113
Figure 3.44	Variation de température expérimentale et numérique pour le point 15 (700,280,-10) - zone B	113

Figure 3.45	Variation de température expérimentale et numérique pour le point 17 (750,280,-55) - zone B	114
Figure 3.46	Variation de température expérimentale et numérique pour le point 23 (530,350,-50) - zone B	114
Figure 3.47	Variation de température expérimentale et numérique pour le point 24 (503,283,-13) - zone B	115
Figure 3.48	Variation de température expérimentale et numérique pour le point 18 (710,315,-25) - zone C	117
Figure 3.49	Variation de température expérimentale et numérique pour le point 22 (743,345,-62) - zone C	117
Figure 3.50	Variation de température expérimentale et numérique pour le point 12 (750,220,-10) - zone D	118
Figure 3.51	Variation de température expérimentale et numérique pour le point 16 (750,280,-10) - zone D	118
Figure 3.52	Variation de température expérimentale et numérique pour le point 19 (750,320,-15) - zone D	119
Figure 3.53	Variation de température expérimentale et numérique pour le point 20 (783,320,-27) - zone D	119
Figure 3.54	Variation de température expérimentale et numérique pour le point 21 (795,340,-5) - zone D	120
Figure 3.55	Maillage près du lingot avec points de la zone D	122

Figure 3.56	Distribution de température près du lingot pour le moment où une variation rapide de température est observable (pour le calcul 1 à 1 itération)	125
Figure 3.57	Comparaison des variations de températures mesurées à différentes positions dans le modèle à eau	126
Figure 3.58	Comparaison des variations de températures calculées par le modèle numérique à différentes positions dans le bain	128
Figure 3.59	Distribution de la température dans le bain de galvanisation telle que calculée par la simulation numérique à 10 610 secondes (2h57) sur divers plans	129
Figure 3.60	Distribution de la température dans le bain en fonction du temps telle que calculée par la simulation numérique sur la section $z = -30$ mm	131
Figure 3.61	Distribution de la température dans le bain en fonction du temps telle que calculée par la simulation numérique sur la section $y = 340$ mm	132
Figure 3.62	Distribution de la température dans le bain en fonction du temps telle que calculée par la simulation numérique sur la section $x = 750$ mm	133

LISTE DES NOTATIONS ET DES SYMBOLES

u	-vitesse en x
v	-vitesse en y
w	-vitesse en z
u_i	-i ème vitesse en x
$\bar{U}$	-vitesse moyenne
u'	-fluctuation de la vitesse en x par rapport à la moyenne
$\mathbf{u}, \bar{\mathbf{U}}$	-vitesse 3D (vecteur)
$\frac{D}{Dt}$	$= \frac{\partial}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla$; dérivée substantielle
t	-temps
$\nabla \mathbf{u}^T$	-transposée de la matrice $\nabla \mathbf{u}$
μ	-viscosité
μ_T	-viscosité turbulente
τ^T	-cisaillement turbulent
ρ	-densité
p	-pression
g	-gravité ($9,81 \text{ m/s}^2$)
β	-coefficient d'expansion thermique
T	-température
c	-concentration
ρ_o, T_o	-pression et température de référence
c_p	-chaleur spécifique
λ	-conductivité thermique
λ_T	-conductivité thermique turbulente
h	-coefficient de transfert de chaleur
k	-énergie cinétique turbulente
ϵ	-taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulente
N_{Re}	-nombre de Reynolds ($\frac{\rho u L}{\mu}$)
N_{Pr}	-nombre de Prandtl ($\frac{c_p \mu}{\lambda}$)
N_{Fr}	-nombre de Froude ($\frac{u^2}{gL}$)
L	-longueur caractéristique
κ	-constante de Von Karman
q	-flux de chaleur
u_m, τ_m, T_m	-vitesse, taux de cisaillement et température au mur
T_a	-température ambiante

INTRODUCTION

Près de 50 % de la production mondiale de zinc est utilisée pour la galvanisation de l'acier. Le procédé de la galvanisation en continu consiste en l'apposition d'une couche de zinc sur une feuille d'acier qui est immergée dans le bain et y circule guidée par des rouleaux. Le zinc étant plus électronégatif, il se corrodera préférentiellement au fer qui restera intact plus longtemps, ce qui permet de retarder l'occurrence de la corrosion. L'industrie de l'automobile est une grande consommatrice de ce produit. La recherche et le développement de ce procédé sont toujours d'une grande importance étant donné que les besoins et les attentes sur la qualité des tôles produites sont de plus en plus élevés.

Un des problèmes majeurs du procédé de galvanisation est le contrôle de la formation des particules intermétalliques (dross). En effet, pour augmenter la ductilité pour les procédé de mise en forme et la brillance du produit, une petite quantité d'aluminium est ajoutée au zinc liquide. Selon les conditions thermodynamiques, cet élément peut s'associer au fer dissout dans le zinc liquide pour former des intermétalliques. Ces derniers peuvent adhérer à la feuille et causer des défauts. Ainsi, le contrôle du mouvement et de la formation de ces intermétalliques assure de meilleures propriétés au produit final. Les modèles numériques sont de bons

outils pour permettre de calculer l'écoulement, la température et la concentration des divers éléments en chaque point du bain.

L'objectif du présent projet est de vérifier si l'écoulement et le transfert thermique transitoire calculés par le modèle numérique mis au point par l'IMI-CNRC sont conformes avec l'écoulement dans un modèle à eau. Les diverses étapes pour y arriver seront :

1. d'analyser les mesures d'écoulement déjà existantes
2. de mettre au point le modèle à eau pour permettre la mesure de température
3. de mesurer la variation de la température dans le temps
4. d'effectuer les simulations par méthodes numériques
5. de comparer les solutions analytiques et expérimentales

Cet ouvrage présentera tout d'abord une revue de la littérature afin de bien situer le lecteur sur les développements et connaissances actuels du procédé. Ensuite, les considérations expérimentales et numériques seront abordées pour expliquer comment les expériences ont été conduites. Les résultats de validation et les discussions s'y rattachant seront par la suite rapportés pour finalement terminer par la présentation des conclusions du travail.

CHAPITRE 1

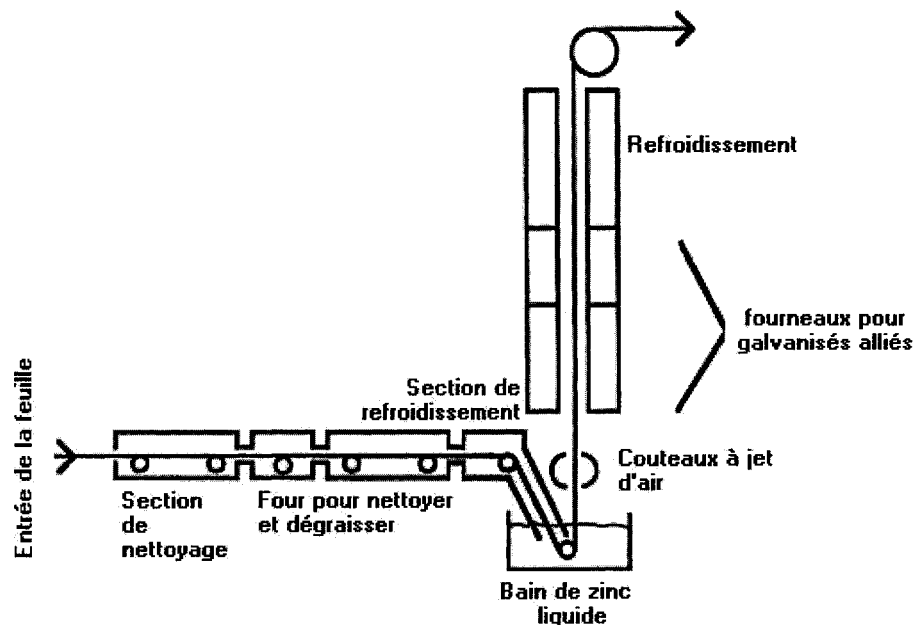
REVUE DE LA LITTÉRATURE

1.1 Procédé de galvanisation en continu

Le procédé de galvanisation en continu implique plusieurs étapes telles que schématisées à la figure 1.1. La tôle d'acier, initialement enroulée, est débobinée à une vitesse pouvant aller jusqu'à 200 m/min. Une séance de recuit dans une atmosphère contrôlée réductrice ($N_2 + 5\%H_2$) sert notamment à éliminer les oxydes de même que les contraintes mécaniques internes et les textures résultant du laminage à froid que la tôle a subi ultérieurement. Pour minimiser les effets thermiques, la tôle est ensuite refroidie à une température équivalente à celle du zinc liquide dans lequel elle se dirige. La feuille d'acier entre dans le bain de zinc liquide par la cloche (snout) et y circule guidée par des rouleaux (figure 1.2). Ce passage dans le fluide, d'une durée de 2 à 6 secondes, permet de laisser un dépôt à la surface de la tôle lorsque cette dernière sort du bain. Des couteaux à air présents à la sortie servent à contrôler l'épaisseur du revêtement à la surface de la feuille. Cette dernière étape permet aussi un début de solidification. Pour les revêtements galvanisés alliés (galvanneal), un recuit est effectué avant le refroidissement final. La solidification

est achevée lors de la montée de la feuille, soit avant un prochain contact avec une pièce d'équipement de la ligne de galvanisation.

Les bains de galvanisation sont de taille variable et peuvent contenir de 60 à 500 tonnes de zinc liquide; la plupart se situant dans l'intervalle de 100 à 200 tonnes. Au moyen d'inducteurs, le liquide est maintenu au dessus de sa température de fusion (420°C), soit entre 450°C et 480°C selon la concentration des éléments d'addition.



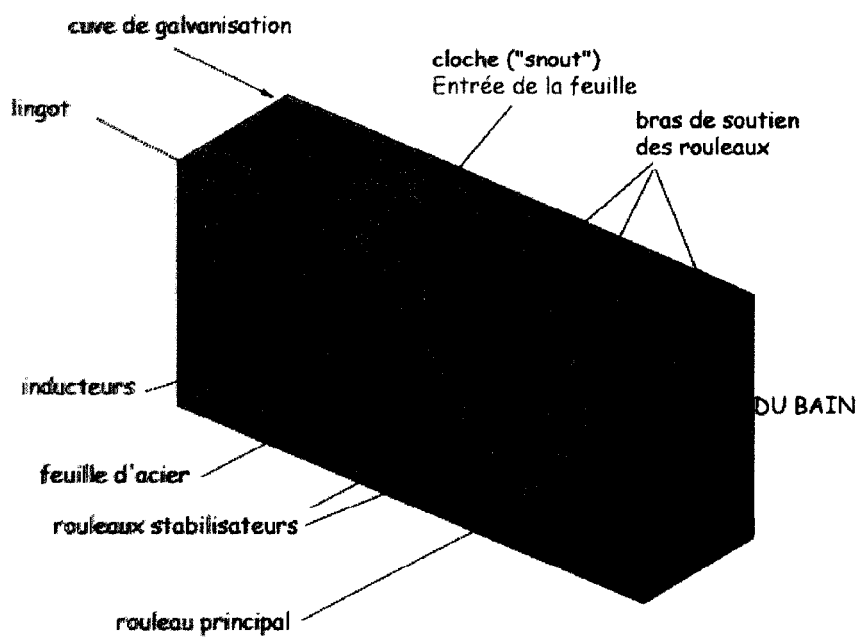


Figure 1.2 Demi-section schématisant les composantes du bain de galvanisation

1.1.1 Composition du zinc liquide

Afin d'améliorer les propriétés de ductilité de l'acier galvanisé, une petite quantité d'aluminium est ajoutée au zinc liquide. Cet élément a aussi pour effet d'améliorer la brillance des tôles. Lorsque l'on parle de revêtements galvanisés, les concentrations d'aluminium visées se situent entre environ 0,13% et 0,30% poids. Des revêtements avec environ 0,10% poids d'Al (galvanisé allié), 5% poids d'Al (galfan) et 55% poids d'Al (galvalume) sont aussi exploités. Lorsqu'il n'y a pas d'ajout d'aluminium, des intermétalliques Fe-Zn fragiles sont formés à la surface de la tôle, ce qui rend difficile sa mise en forme. Pour les revêtements galvanisés, la présence d'aluminium permet d'inhiber les réactions entre le fer et le zinc par la formation d'une couche barrière composée d'intermétalliques Fe-Al. En effet, la réaction entre l'aluminium et le fer est thermodynamiquement favorisée par rapport à celle du fer avec le zinc. Il y a donc une couche inhibitrice Fe-Al (avec du Zn dissout) qui sépare la feuille d'acier du revêtement de zinc.

Le bain de zinc liquide agit comme un réacteur chimique où il y a échange des différentes espèces. Le tableau 1.1 résume les différents échanges qu'on y retrouve.

Les lingots ajoutés au zinc liquide durant le procédé servent à maintenir le niveau de liquide constant et à conserver la teneur en aluminium désirée dans le

Tableau 1.1 Échanges impliqués dans le bain de galvanisation

Éléments	Entrée	Sortie
Zinc	Lingot de Zn-Al	* Dépôt de Zn sur la feuille * Formation d'intermétalliques
Aluminium	Lingot de Zn-Al	* Dépôt sur la feuille * Formation d'intermétalliques
Fer	Dissolution de la feuille et des composantes immergées	* Dépôt sur la feuille * Formation d'intermétalliques
Chaleur	Inducteur	* ΔT entre la feuille et le bain * Fusion du lingot * Maintien de la température * Perte

bain. Pour les revêtements galvanisés, deux types de lingot sont plus couramment utilisés; il s'agit de lourds lingots d'environ 1 tonne métrique contenant du zinc pur avec 1 à 5 % poids d'Al ou bien de petits lingots d'environ 25 kg pouvant contenir jusqu'à 10 % d'Al. Dans le cas d'une transition entre la production de revêtements galvanisés (0,13-0,30% Al) et la production de galvanisés alliés (0,10% Al), des lingots de zinc pur sont ajoutés afin de réduire la teneur en aluminium au niveau désiré. Tous ces lingots sont généralement ajoutés au bain par l'arrière ou par l'avant, graduellement ou dans un tout.

1.1.2 Thermodynamique du bain

L'étude du diagramme de phases Fe-Al-Zn, en particulier la région riche en zinc, démontre que le bain de galvanisation peut-être le lieu de formation de particules intermétalliques. La nature de ces dernières dépend de la composition du liquide et de sa température. Le diagramme ternaire Fe-Al-Zn indique en fait la nature des phases en équilibre dans le bain et permet par le fait même d'étudier et de comprendre les phénomènes se déroulant dans le bain et à la surface des tôles immergées.

Plusieurs chercheurs se sont penchés sur l'étude du diagramme ternaire Fe-Al-Zn, principalement au coin concerné, celui riche en zinc. L'isotherme à 450 ° C a tout d'abord été étudié en 1962 par Cameron et Ormay . Ensuite Urednicek et Kirkaldy (1973) ont proposé un diagramme largement accepté à cette époque dans le domaine de la galvanisation (figure 1.3). On pouvait notamment y lire que la solubilité du fer dans le zinc liquide n'était pas affectée par la concentration d'aluminium.

Ensuite, les études se sont attardées sur des aspects en particulier, soit la solubilité du zinc dans les différents intermétalliques Fe-Al et celle du fer dans le zinc liquide. Cette notion de solubilité est très importante puisque les limites de

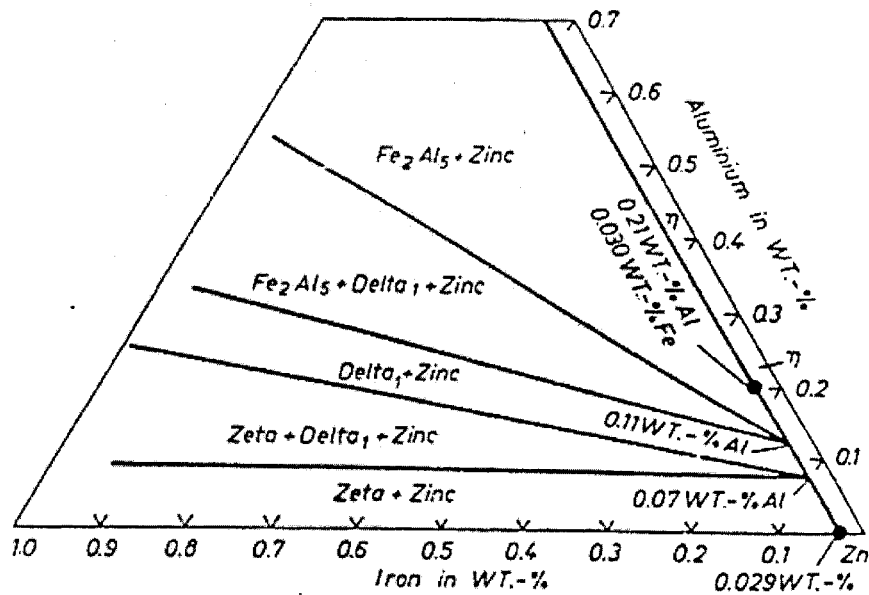


Figure 1.3 Coin riche en zinc de l'isotherme à 450 ° C du système Fe-Al-Zn proposé par Urednicek et Kirkaldy (1973).

solubilité déterminent la formation de particules susceptibles de nuire à la qualité du dépôt en adhérant sur ce dernier ainsi que la formation et l'uniformité de la couche inhibitrice. Ainsi, Chen et al (1990) et Tang (1995) ont révisé les diagrammes d'équilibre existants et ont proposé quelques ajustements. Tang a démontré que, contrairement aux premières conclusions de Urednicek, la solubilité du fer dans le zinc liquide diminue avec une augmentation de l'aluminium. La figure 1.4 est un agrandissement d'une coupe isotherme à 460 ° C du système ternaire pour le coin riche en zinc qui illustre justement cette variation. Ce même auteur [Tang et al., 1995] a transposé cette limite de solubilité du fer (en % poids) dans le zinc pur comme une fonction de la température : $\ln[Fe] = 17.78 - \frac{15388}{T}$ (avec T en degrés K).

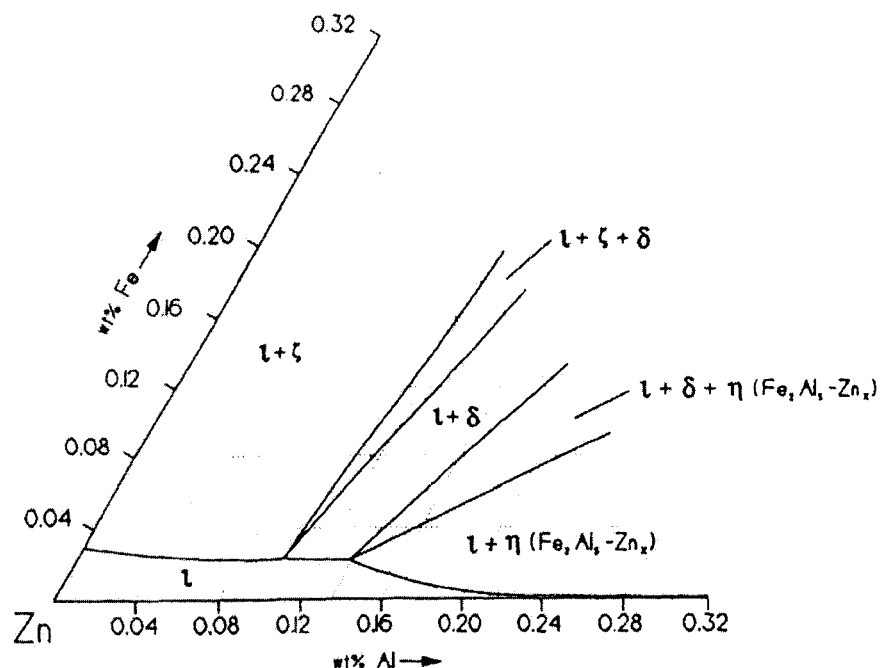


Figure 1.4 Coin riche en zinc de l'isotherme à 460 ° C du système Fe-Al-Zn proposé par Tang (1995)

Il a aussi établi le produit de solubilité du fer et de l'aluminium pour la région du Fe_2Al_5 en fonction de la température : $\ln[Fe]^2[Al]^5 = 32,3 - \frac{36133}{T}$.

Pour les limites de solubilité du zinc dans le Fe_2Al_5 , les données sont passées de 14 % poids avec Urednicek à 20 % poids pour l'étude de Chen.

Selon la figure 1.4, à une température de 460 ° C, lorsque le bain contient moins de 0,10% poids d'aluminium, la phase ζ est en équilibre avec le liquide. Pour une concentration entre 0,10% et 0,14% poids d'aluminium, c'est le $FeZn_7$ (δ) qui est en équilibre avec le zinc liquide et enfin, pour une concentration d'aluminium

supérieure à 0,14 % poids, c'est le Fe_2Al_5 (η) qui est thermodynamiquement stable. Selon la concentration en fer, il est possible de se retrouver dans une zone intermédiaire où deux phases intermétalliques peuvent coexister. Notons qu'une particule de Fe_2Al_5 formée dans le liquide flotte à la surface et que l'intermétallique $FeZn_7$ descend dans le fond du bain à cause de sa densité plus élevée que celle du liquide.

Une récente étude a été réalisée par McDermid et Thompson (2002) sur les limites de solubilité du fer dans le coin riche en zinc du système ternaire Zn-Al-Fe. La figure 1.5 montre une section de l'isotherme à 460 °C. On voit ici que la transition entre la phase ζ et δ se situe à 0,03% Al contrairement au 0,10% pour l'étude de Tang. La transition entre δ et η se situe par contre aux mêmes concentrations. Pour une concentration d'aluminium donnée, les limites de solubilité du fer sont ici généralement un peu plus élevées que celles ressorties par Tang.

Le contrôle de l'aluminium est d'une grande importance pour la qualité du dépôt. Une difficulté existe, par contre, dans le fait que l'aluminium se trouve sous deux formes dans le bain de zinc. En effet, on le retrouve soit sous forme d'intermétalliques, soit en solution dans le bain. C'est cette dernière proportion, que l'on appelle fréquemment aluminium effectif, qui sert à former la couche inhibitrice. Pour avoir un dépôt de bonne qualité, il est primordial de connaître la proportion

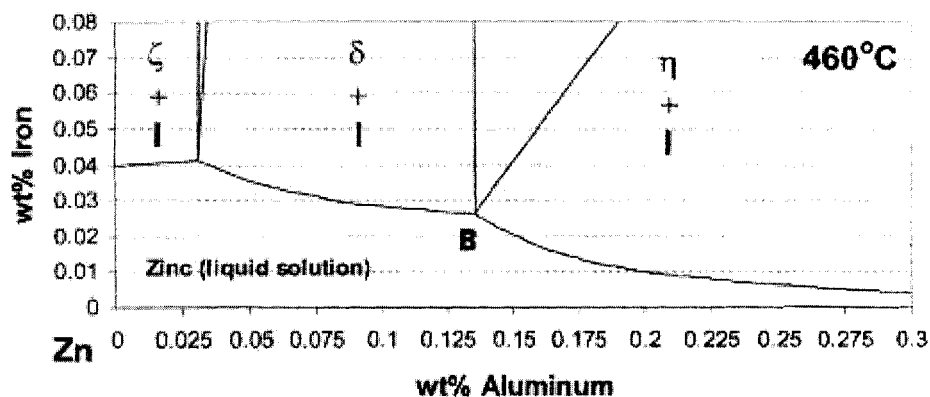


Figure 1.5 Coin riche en zinc pour l'isotherme à 460 ° C montrant la solubilité du fer comme une fonction de la concentration d'aluminium tel que proposé par McDermid et Thompson (2002)

de cet aluminium effectif. Ainsi, la connaissance et l'ajustement des conditions thermodynamiques dans le bain telles que fixées par la concentration d'aluminium, la concentration de fer et la température permettent de favoriser la formation d'une couche inhibitrice homogène pour ainsi obtenir un produit galvanisé de bonne qualité.

1.1.3 Couche inhibitrice

En ce qui concerne la nature de la couche inhibitrice formée sur les tôles galvanisées, le tableau 1.2 résume les résultats de différentes observations qui s'étalent sur plusieurs années. La présence des intermétalliques $FeAl_3$ et Fe_2Al_5 dans la couche inhibitrice ressort de ces différentes études. Notons que les conditions thermodynamiques peuvent être différentes d'une expérience à l'autre.

Tableau 1.2 Composition de la couche inhibitrice selon différents chercheurs

Chercheur	Nature de la couche
Bablik (1950) [Caceres et al., 1986]	$FeAl_3$
Borzillo et Hahn (1969)	Fe_2Al_5
Urednicek et Kirkaldy (1973)	Fe_2Al_5 et $FeAl_3$
Tang et Adams (1993)	$Fe_2Al_5 - Zn_x$
Guttman et al.(1995)	Fe_2Al_5
Dionne et al (2002)	Fe_2Al_5 (Zn : 5 - 14 % at)
Tarquini (2002)	Fe_2Al_5 (Zn : 8 - 30 % poids)

Plusieurs auteurs ont mesuré le taux de croissance de la couche inhibitrice en fonction de différents paramètres du bain. La figure 1.6 illustre les résultats obtenus pour certaines expériences.

Selon les divers résultats d'expérience, la formation et la croissance de la couche inhibitrice sont fonction de plusieurs facteurs. Ainsi une augmentation de la concentration d'aluminium dans l'intervalle de 0,12 à 0,20 %, une augmentation de la température du bain et une augmentation de l'écart de température entre la feuille comparativement à celle du bain influencent à la hausse la croissance de la couche inhibitrice. La nature et la surface du substrat de même que la vitesse de la feuille et l'hydrodynamique [Toussaint et al., 1998] du bain sont tous des facteurs qui influencent la formation et la

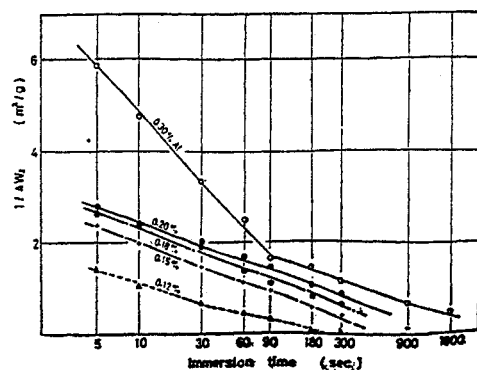
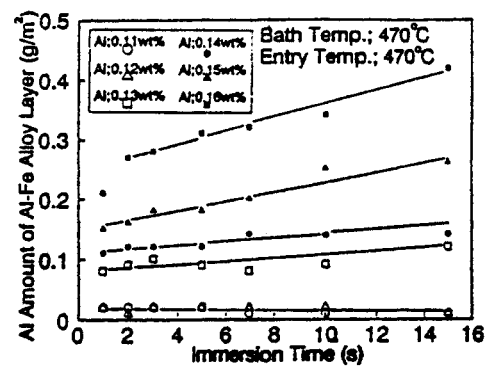
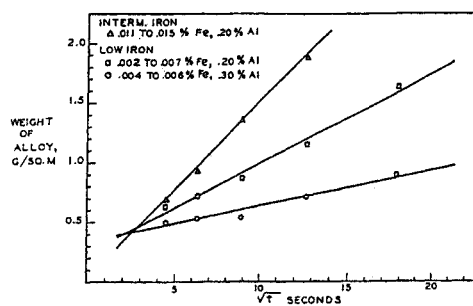
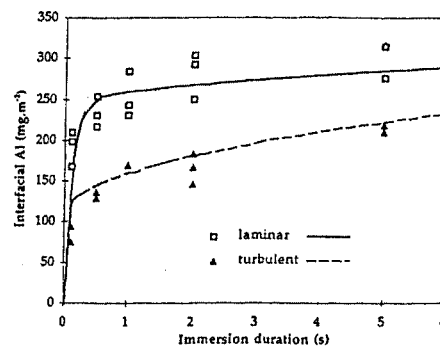
(a) Yamaguchi et al. (1979) à 465°C (b) Isobe (1992) à 470°C (c) Borzillo et al. (1969) à 470°C (d) Toussaint et al. (1998) à 470°C

Figure 1.6 Courbes de croissance de la couche inhibitrice selon différentes expériences

croissance de la couche inhibitrice. La figure 1.6 d) montre notamment que la couche inhibitrice est plus mince sous des conditions d'écoulement turbulent.

Tang (1995) avance que la formation de la couche inhibitrice se fait en deux étapes : la germination du Fe_2Al_5 et ensuite la croissance de ces intermétalliques. Il soutient que cette croissance est contrôlée par la diffusion de l'aluminium dans le zinc liquide. En effet, l'acquisition d'Al pour former la couche inhibitrice (composé à environ 55 % poids d'aluminium considérant l'intermétallique Fe_2Al_5) serait difficile puisqu'aussi peu que 0,15% d'aluminium se trouve dans le zinc liquide. Par conséquent la diffusion de l'aluminium se ferait sur une longue distance. Par contre, Gauthier (1996) et Toussaint (1997) suggèrent plutôt que ce soit la diffusion du fer à travers les premiers précipités germés de Fe_2Al_5 qui contrôle cette croissance. Le mécanisme de croissance de la couche inhibitrice n'est pas encore tout à fait expliqué, par contre, les chercheurs s'entendent pour dire, selon les différents résultats d'expérience, qu'il y a formation rapide du Fe_2Al_5 à l'intérieur de la première seconde, suivie d'une croissance plus lente (contrôlée par la diffusion) de la couche d'inhibition.

Pour avoir une couche inhibitrice uniforme, il faut une concentration d'aluminium dans le bain supérieure à 0,145 % poids [Tang et Adams, 1993]. Cet aspect est illustré

sur la figure 1.4 puisque dans cette zone, aucun intermétallique fragile Fe-Zn n'est en équilibre et seule la phase $Fe_2Al_5 - Zn_x$ va se former ; soit la couche inhibitrice.

Le transport de l'aluminium dissout et des particules est influencé par le mouvement des composantes mobiles (feuille et rouleaux) dans le bain. De plus, les gradients de température présents, dus notamment à la présence de lingot, affectent la formation de particules et donc la concentration de l'aluminium effectif dans le zinc liquide. La connaissance de l'écoulement ainsi que de la distribution de température et de l'aluminium dans le bain sont alors d'une importance cruciale pour tenter de comprendre les phénomènes rattachés à la formation et à la croissance de la couche inhibitrice. Ces phénomènes d'échange deviennent aussi très importants pour connaître le mouvement des particules pour éviter que ces dernières adhèrent à la feuille et causent des défauts.

1.2 Modèle à eau

L'utilisation d'un modèle à eau s'avère efficace pour observer l'écoulement présent dans le bain de galvanisation. Plusieurs groupes de recherche ont pris cette direction afin d'augmenter les connaissances des phénomènes impliqués dans un bain de galvanisation. Pour faire une corrélation entre le modèle à eau et la réalité, il doit y avoir des similitudes en ce qui concerne la géométrie et la dynamique du

système. Ce dernier point consiste à égaliser certains paramètres adimensionnels entre les deux systèmes afin que les forces agissant dans le modèle à eau et celles dans le bain soient identiques. Le nombre de Reynolds, qui correspond au rapport entre les forces d'inertie et les forces visqueuses, ainsi que le nombre de Froude, qui détermine le ratio entre les forces d'inertie et la force gravitationnelle, sont les plus représentatifs.

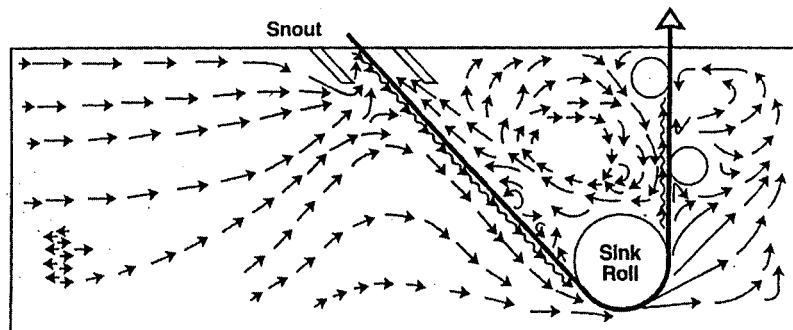
$$N_{Reynolds} = \frac{\rho u L}{\mu} \quad (1.1)$$

$$N_{Froude} = \frac{u^2}{gL} \quad (1.2)$$

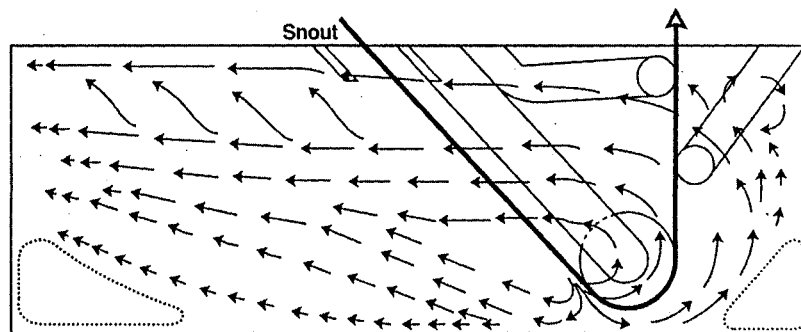
Généralement, le nombre de Reynolds est respecté par un ajustement de la vitesse de la feuille et en considérant que L (longueur caractéristique) est la longueur de la feuille immergée dans le liquide. Par contre, cela fait en sorte que le nombre de Froude n'est pas respecté et ainsi, l'écoulement à la surface libre du modèle à eau ne représente pas celui d'un bain de galvanisation réel. Les principaux résultats obtenus avec l'utilisation d'un modèle à eau simulant un bain de galvanisation en continu sont présentés dans la présente section. La comparaison entre les différents résultats n'est pas toujours possible puisque les modèles à eau n'ont pas la même configuration et n'utilisent pas les mêmes paramètres d'opération.

Gagné, Paré et Ajersch (1992) ont construit un modèle à eau dont les dimensions sont la moitié de celles d'un bain industriel. Ce montage a permis d'observer l'écoulement sur différents plans et selon certaines configurations. Comme la figure 1.7 a) l'illustre, pour l'écoulement au centre du bain, le fluide part de l'arrière du bain vers la feuille et suit ensuite le mouvement de la feuille. Dans le V formé par la feuille, il y a recirculation dans le sens des aiguilles d'une montre. L'écoulement le long des parois, tel que montré à la figure 1.7 b), indique que le fluide se déplace vers l'arrière du bain avec des zones stagnantes dans les coins inférieurs droit et gauche. Les changements de configuration étudiés, tels la profondeur de la cloche, le nombre de rouleaux stabilisateurs et la distance sous le rouleau principal, n'affectent pratiquement pas la structure de l'écoulement. La grandeur de l'écoulement est par contre augmentée avec une augmentation de la vitesse de la feuille.

Ce même modèle à eau a permis de faire des tests pour déterminer un temps de mélange, c'est-à-dire, industriellement parlant, le temps afin que l'aluminium se disperse uniformément dans le bain de zinc liquide. Gagné et Ajersch (1995) ont utilisé des sondes pH positionnées à différents endroits dans le plan central du bain afin d'enregistrer les concentrations d'un traceur acide (du HCl) en fonction du temps. Les effets de l'endroit d'addition et de la séquence d'addition (en continu ou par impulsion) ont été étudiés. Il en ressort que sous forme d'addition par impulsion, le temps de mélange est d'environ 60 minutes. Par contre, sous forme



(a) Au centre du bain



(b) Le long de la paroi

Figure 1.7 Écoulement observé dans le modèle à eau selon Ajersch et al. (1992)

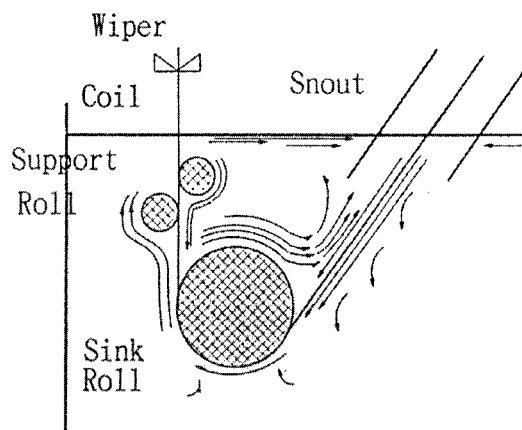


Figure 1.8 Écoulement observé par Kato et al. (1995)

d'addition en continu, il est de 7,6 minutes. Toutes ces conclusions sont tirées en admettant que le HCl se disperse dans l'eau de la même façon que l'aluminium dans le zinc liquide.

Kato et al.(1995) ont fait des études sur un modèle à eau ayant 1/6 des dimensions réelles. Des billes de polystyrène ont été utilisées pour simuler les particules. Les trajectoires suivies par ces particules ont été enregistrées par vidéo. L'écoulement observé est schématisé à la figure 1.8. On remarque que l'écoulement dans le V de la feuille est dans le même sens que celui observé sur le modèle de Ajersch.

Binet (2000) à construit un modèle a eau du cinquième des dimensions réelles pour visualiser l'écoulement au moyen d'injection de fluorescéine et d'un faisceau laser. L'influence de l'angle de la courroie, de la présence de rouleaux stabilisateurs

et de la présence d'une plaque déflectrice a pu être étudiée. Il est donc possible de déduire la configuration permettant un temps de mélange optimal. On parle alors de la situation avec 1 rouleau et avec l'angle de la courroie à 45 degrés suivi de la configuration sans rouleaux toujours avec le même angle. La présence de deux rouleaux retarde l'obtention d'un mélange uniforme puisque le traceur reste plus longtemps dans la section avant du bain dû au mouvement du fluide entraîné par les rouleaux. De plus, un angle de courroie plus aigu augmente le temps de mélange. Et, sans surprise, les configurations avec une plaque déflectrice sont celles où le temps de mélange est le plus long. En industrie, la plaque déflectrice est utilisée pour permettre une section de prémélange pour la fonte des lingots et est placée au milieu du bain entre la cloche (snout) et l'emplacement du lingot. La section du lingot est alors isolée et les vitesses du liquide y sont très réduites puisque l'influence de la feuille et des rouleaux est beaucoup diminuée.

Ensuite, la vélocimétrie par laser Doppler a été utilisée afin de mesurer quantitativement la vitesse du fluide en certains points. Cet instrument a aussi permis de prendre des mesures de turbulence. Les résultats alors obtenus sont utilisés pour la partie validation du présent ouvrage où ils seront analysés.

Tout dernièrement, une étude sur l'écoulement, principalement dans la zone des rouleaux stabilisateurs, a été conduite par un groupe de recherche de l'Université

de Pohang en Corée [Sang Joon et al., 2002]. Découvrir l'influence de la vitesse de la feuille et l'influence de la puissance de l'inducteur sur l'écoulement figurent parmi leurs principaux objectifs. Les chercheurs ont utilisé un modèle à eau du cinquième des dimensions réelles et un PIV (Particles Imaging Velocimetry) pour visualiser l'écoulement. Ils en sont arrivés à la conclusion qu'une forte puissance de l'inducteur augmente la vitesse du liquide dans les régions situées à l'extérieur de la feuille sauf pour la zone au dessus des rouleaux stabilisateurs où la vitesse diminue. De plus, une vitesse de feuille plus élevée entraîne un écoulement plus rapide du fluide près des rouleaux stabilisateurs.

1.3 Modélisation du procédé de galvanisation en continu

L'utilisation de modèles numériques pour simuler les phénomènes impliqués dans un bain de galvanisation représente un outil puissant. L'influence de la configuration du bain et des paramètres d'opération sur l'écoulement peut être étudiée de façon plus rapide que par l'emploi des modèles à eau. Ces modèles permettent de solutionner les équations d'échange au niveau de l'écoulement, du transfert thermique et de la concentration des espèces chimiques (pour certains modèles) pour tout le bain de zinc liquide.

Premièrement les équations de Navier-Stokes permettent de calculer l'écoulement présent dans le bain.

$$\rho \frac{D\mathbf{u}}{Dt} = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu \nabla \mathbf{u}] + \rho \mathbf{g}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (1.3)$$

L'échange thermique est calculé selon l'équation d'énergie soit :

$$\rho c_p \frac{DT}{Dt} = \nabla \cdot \lambda \nabla T \quad (1.4)$$

Lorsqu'incluse, l'équation du transfert de matière sert à calculer la répartition des différentes espèces en solution dans le fluide selon leur concentration c .

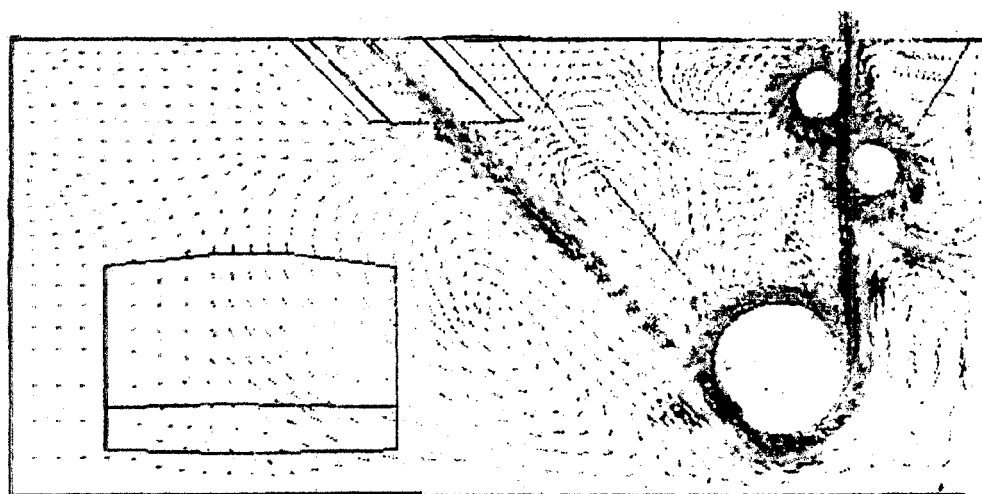
$$\rho c_p \frac{Dc}{Dt} = \nabla \cdot D \nabla c \quad (1.5)$$

Lorsque l'hypothèse de l'écoulement turbulent est incluse, plusieurs modèles de turbulence peuvent être utilisés pour résoudre ce type d'écoulement. Les plus populaires sont le modèle à une équation et le modèle $k-\epsilon$. Ce dernier modèle utilise les quantités k et ϵ qui représentent respectivement l'énergie cinétique turbulente et son taux de dissipation.

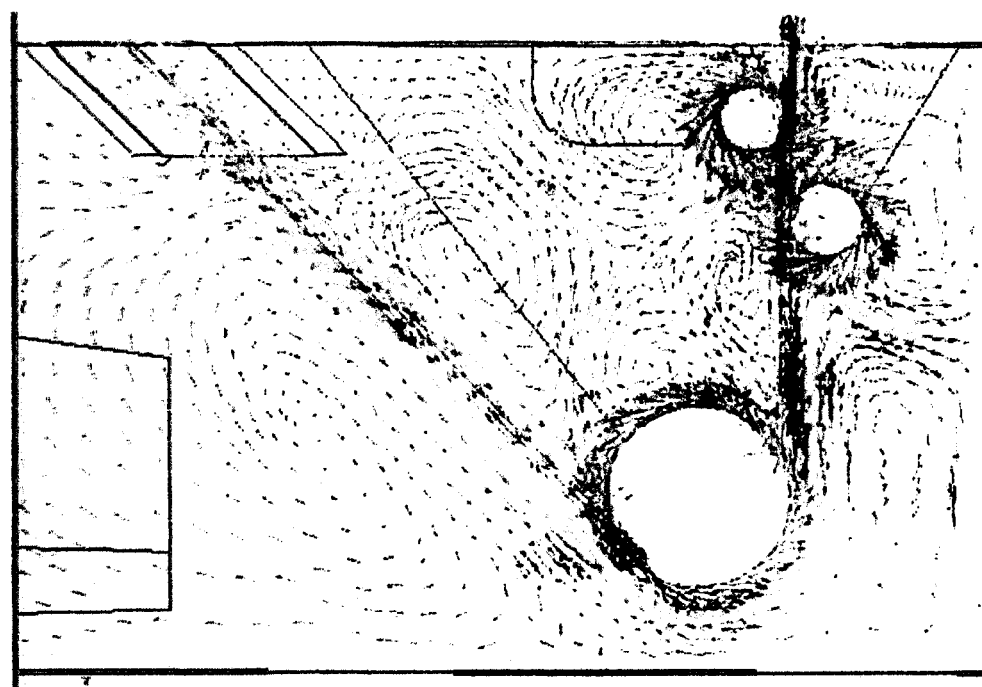
Un résumé rapide des résultats de différentes simulations par modèle numérique, obtenus à ce jour, est fait dans la prochaine section. Encore ici, il est difficile de faire une comparaison entre les résultats, étant donné que les configurations de bain utilisées ne sont pas toujours similaires.

Faisant suite à de précédents travaux [Paré et al., 1995] de modélisation du bain de galvanisation en continu, Binet (2000) a utilisé le logiciel FIDAP afin de résoudre les différentes équations d'échange dans un système turbulent. Un modèle à une équation a été utilisé pour calculer la turbulence. Les lignes d'écoulement, telles que vues sur le plan central en x-y, sont présentées à la figure 1.9. La vitesse du liquide diminue rapidement lorsque l'on s'éloigne de la feuille. Selon les résultats, la présence de l'inducteur n'a qu'une faible influence sur l'écoulement. Le modèle utilisé néglige l'effet de la convection naturelle qui tient compte de la variation de densité en fonction de la température.

Le logiciel I DEAS ESC a permis de concevoir un modèle numérique du bain de galvanisation en continu [Gagné et Gaug, 1998] [Baril et al., 2001]. Les chercheurs ont utilisé les modèles de turbulence basés sur la longueur de mélange et sur le modèle $k - \epsilon$. Les conclusions à tirer de la première étude sont que la variation de la vitesse de la feuille affecte peu la structure de l'écoulement, bien qu'une vitesse plus basse produit de plus grandes zones stagnantes. De plus, la présence de l'inducteur à



(a) Vue générale



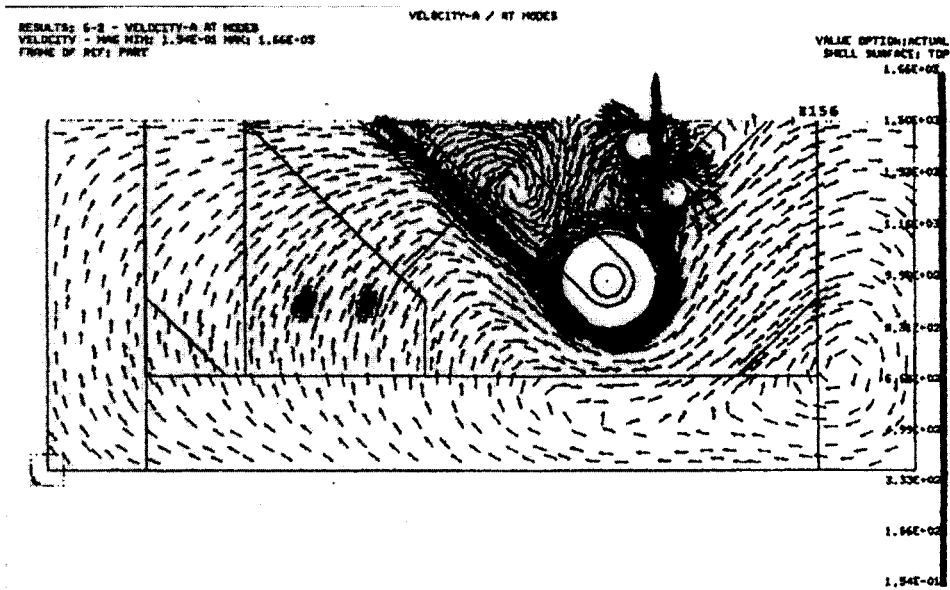
(b) Vue agrandie

Figure 1.9 Modélisation de l'écoulement par Binet (2000)

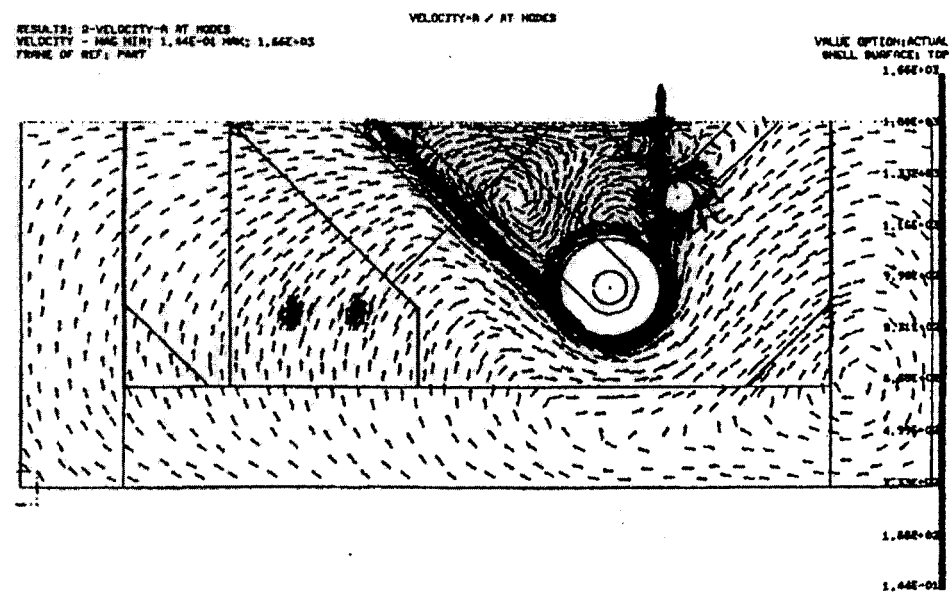
forte puissance modifie l'écoulement à l'arrière du bain et l'absence du rouleau stabilisateur supérieur change l'écoulement dans la section en V au centre du bain comme le montre la figure 1.10.

Le développement de méthodes de contrôle de la formation d'intermétalliques a motivé Mallens et al (2001) à construire leur modèle numérique. Ils ont donc déterminé les distributions de vitesse, de température et de concentration d'aluminium pour une vitesse de feuille de 1,67 m/sec en considérant l'effet de la convection naturelle. À la lumière de ces observations, ils ont déterminé que l'addition d'aluminium devait se faire au centre du bain plutôt que dans un coin pour une distribution plus uniforme de l'aluminium dans le zinc liquide. De plus, certaines régions critiques où la vitesse et la température sont plus faibles présentent une formation élevée de particules. Selon les courants de recirculation, ces particules peuvent causer des problèmes.

Le modèle développé par le groupe de l'IMI-CNRC a présenté plusieurs simulations jusqu'à ce jour [Ajersch et al., 2001b][Ajersch et al., 2002a]. En partant d'une configuration de bain donné, ils ont notamment étudié l'influence de la vitesse de la feuille et de la profondeur de la cloche dans des conditions avec et sans lingot et avec une puissance d'inducteur variable. L'hypothèse de Boussinesq est utilisée afin de caractériser l'effet de la température sur la densité du zinc. L'effet de la présence du lingot sur

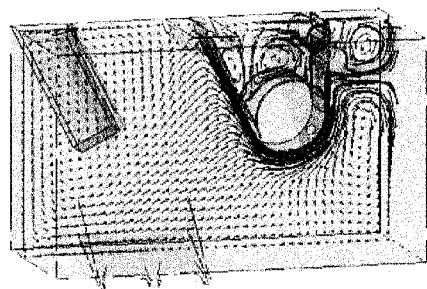


(a) Avec 2 rouleaux stabilisateurs

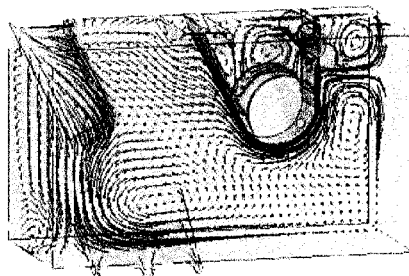


(b) Avec 1 rouleau stabilisateur

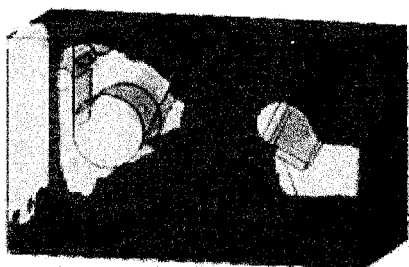
Figure 1.10 Schématisation de l'écoulement tel que simulé par Gagné et Gaug (1998)



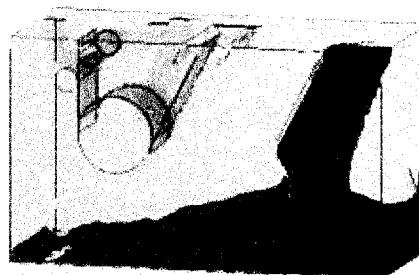
(a) Distribution de vitesse - sans lingot



(b) Distribution de vitesse - avec lingot



(c) Région où la température est inférieure à 458 ° C - sans lingot



(d) Région où la température est inférieure à 458 ° C - avec lingot

Figure 1.11 Schématisation de l'écoulement et de la distribution de la température selon les simulations du groupe de l'IMI [Ajersch et al., 2002a]

l'écoulement et sur la distribution de la température apparaît dans la figure 1.11. Ainsi, lorsqu'il n'y a pas de lingot (donc inducteur avec puissance plus faible), le volume de zinc liquide présentant une température inférieure à 458 ° C est plus grand et il inclut des zones près des murs.

Il est possible de voir aussi qu'une vitesse de feuille plus faible (soit 0,5 m/s comparé à 3 m/s) diminue les vitesses locales dans le bain (figure 1.12). L'efficacité



(a) Vitesse de la feuille : 0,5 m/s



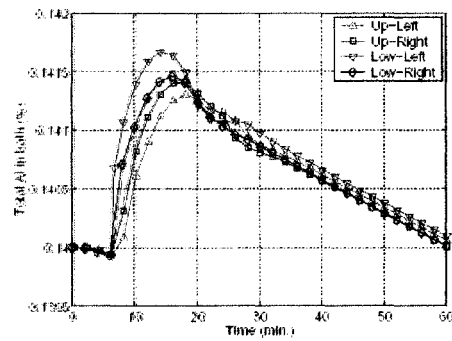
(b) Vitesse de la feuille : 3,0 m/s

Figure 1.12 Région où la vitesse du zinc liquide est inférieure à 0,01 m/s [Ajersch et al., 2002a]

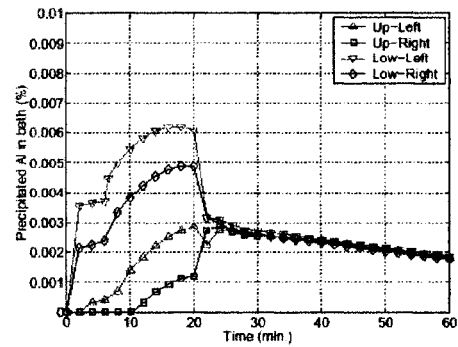
du mélange est ainsi diminuée. Avec une plus grande vitesse, les rouleaux repoussent le volume à plus basse température à l'arrière du bain. Les différents rouleaux et la feuille guident l'écoulement à l'avant du bain et le liquide retourne à l'arrière par les côtés. À l'arrière du bain, ce sont les inducteurs et le mouvement du zinc liquide près du lingot qui gouvernent l'écoulement.

Dans un récent rapport [Ajersch et al., 2002b], la distribution de l'aluminium a été ajoutée au calcul de l'écoulement et du transfert de chaleur. Comme hypothèses, la concentration initiale d'aluminium a été supposée à 0,14 % poids, la température définit la quantité d'aluminium dissoute et celle en suspension et les particules précipitées sont très petites et circulent à la vitesse locale du liquide. Plusieurs conclusions ont été tirées de cet exercice. Premièrement, à l'ajout d'un lingot, la formation de particules Fe_2Al_5 augmente à proximité de ce lingot dû à la

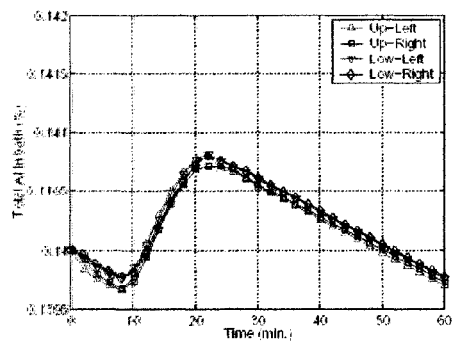
diminution de température et à l'augmentation de la concentration d'aluminium. Il y a un délai d'environ 3 minutes entre l'arrière et l'avant en ce qui concerne le moment où la concentration d'aluminium atteint un maximum. La figure 1.13 montre les proportions d'aluminium total et le pourcentage d'aluminium précipité en fonction du temps pour des positions près du lingot et près de la feuille. Les 20 premières minutes représentent la fonte du lingot. De plus, une augmentation de la vitesse de la feuille permet un mélange de l'aluminium plus uniforme à l'arrière du bain.



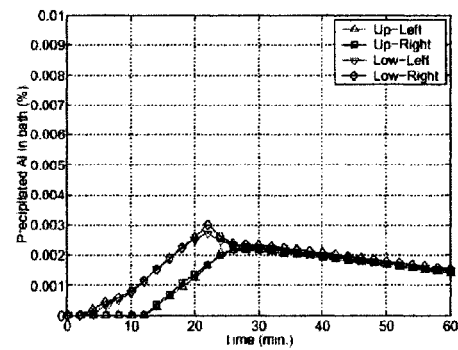
(a) Près du lingot (arrière)



(b) Près du lingot (arrière)



(c) Près de la feuille (avant)



(d) Près de la feuille (avant)

Figure 1.13 Variation de l'aluminium total a) et c) et de l'aluminium précipité b) et d) en fonction du temps [Ajersch et al., 2002b]

CHAPITRE 2

CONSIDÉRATIONS EXPÉRIMENTALES ET NUMÉRIQUES

2.1 Description du modèle à eau

La revue de la littérature a mis en évidence que l'utilisation de modèles à eau est très efficace. Ces modèles s'avèrent être des outils performants pour valider les résultats de modélisation numérique.

Dans le présent projet, nous utilisons un modèle à eau dont les dimensions sont le cinquième de celles d'un bain industriel. La construction et l'utilisation du modèle ont déjà fait l'objet d'un précédent projet de doctorat [Binet, 2000]. La figure 2.1 montre le modèle à eau utilisé. Les différentes dimensions du bain sont représentées sur la figure 2.2. En raison de la symétrie du bain par rapport au plan milieu de la largeur, seule la moitié du bain est représentée et modélisée.

Toutes les parois extérieures du bain sont en plexiglass de même que les parois de la cloche. Les bras qui permettent de tenir les différents rouleaux sont en acier peint afin de réduire la possibilité de corrosion. L'angle de la courroie est de 46° par rapport à l'horizontale.

La construction du bain a été améliorée, notamment afin de permettre l'alignement

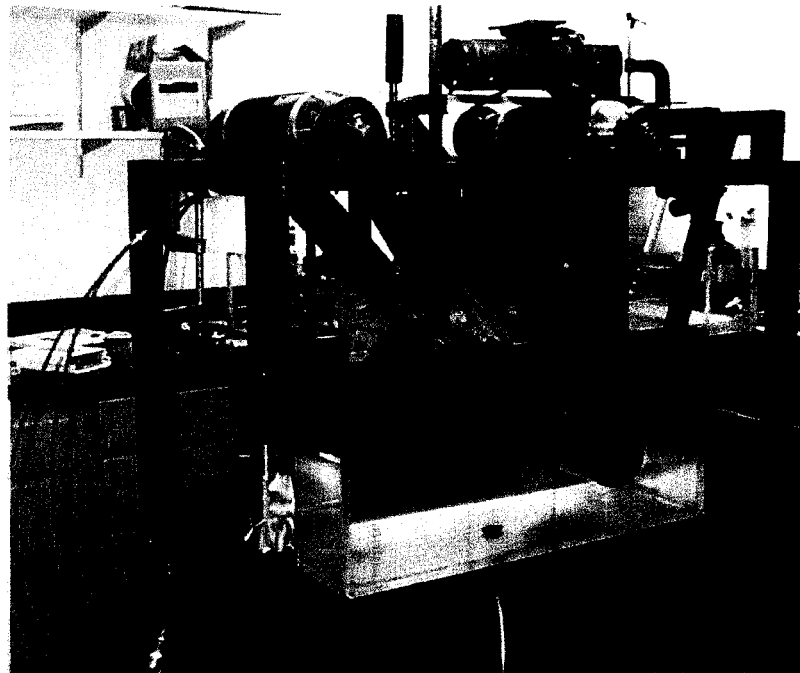


Figure 2.1 Modèle à eau

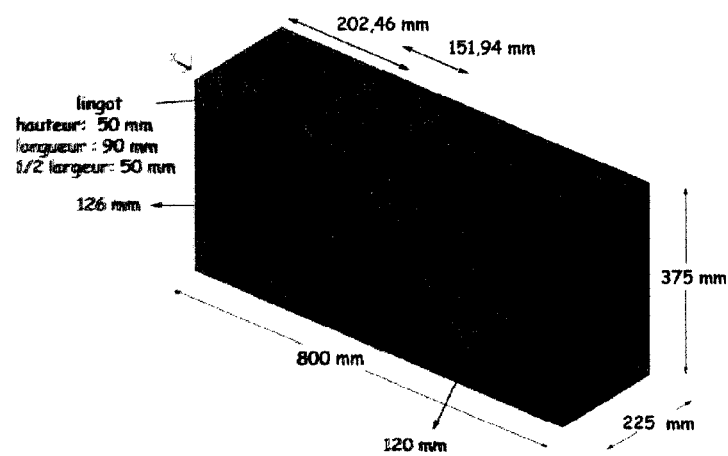


Figure 2.2 Dimensions de la demi-section du modèle à eau

de la courroie qui simule la feuille d'acier. Cet objectif a été atteint en changeant la géométrie de l'un des cylindres pour que le diamètre au centre de ce dernier soit légèrement plus grand lui donnant ainsi une forme convexe. Cette augmentation du diamètre central a pour effet d'imposer à la feuille de rester au centre tel que désiré, puisqu'il y a une résistance accrue lorsqu'elle s'en éloigne. Le changement complet de la feuille a aussi amélioré la stabilité de la courroie. La nouvelle feuille est donc plus rigide et est composée d'un textile recouvert d'un caoutchouc lisse. Elle a été vulcanisée et non cousue ce qui permet une continuité quasi parfaite sur toute la feuille.

La sélection et l'installation d'un moteur adéquat ont aussi été réalisées. Un moteur électrique avec une puissance de 1/2 hp accompagné d'un réducteur de vitesse de 5 fois, le tout jumelé à un contrôleur de vitesse, ont donc servi pour entraîner la courroie. De cette façon, le moteur qui tourne à 1800 tours/minute aura, à la sortie du réducteur, une vitesse de rotation de 360 tours/minute. Selon la configuration des rouleaux stabilisateurs du montage et du système poulie-courroie relié au moteur, il faut une vitesse de rotation de 350 tours/minute pour que la vitesse de défilement de la feuille soit de 1,5 m/s. Le moteur fonctionne donc de façon optimale et les surchauffements sont limités, même pour une utilisation s'échelonnant sur une longue période de temps.

2.2 Mesure de l'écoulement

Pour la mesure des vitesses, les valeurs quantitatives expérimentales sont tirées du travail de doctorat de Chantal Binet (2000). Cette dernière s'est servie de la méthode de vélocimétrie laser Doppler (LDV, Laser Doppler Velocimetry) pour mesurer la vitesse de l'écoulement selon une direction choisie, et ce, à différents endroits dans le bain. Pour des explications plus complètes sur la méthode, il est préférable de se référer à la thèse de doctorat de Binet. Ici, seuls les principes de base sont relatés. Cette technique mesure des vitesses locales et instantanées avec l'utilisation d'un laser. C'est donc une technique optique basée sur la mesure du décalage en fréquence de la lumière diffusée par un traceur. Dans le cas du travail de Binet, aucune particule (traceur) n'a été ajoutée, les poussières présentes dans l'eau du robinet étant suffisantes.

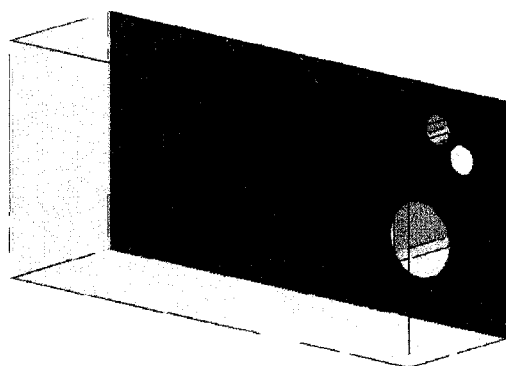
Pour garder l'écoulement représentatif d'une cuve de galvanisation industrielle, il a été nécessaire d'ajuster la vitesse de la courroie dans le modèle à eau de façon à ce que le nombre de Reynolds (équation 1.1) soit équivalent dans les deux systèmes. Ainsi, pour une vitesse de feuille de 2,0 m/s dans un bain industriel, il faudrait que la vitesse de la feuille du modèle à eau soit de 20 m/s, ce qui est relativement élevé. Ceci représente un nombre de Reynolds de l'ordre de 10^6 . En considérant qu'un système avec 10^5 comme nombre de Reynolds est tout aussi turbulent et

garde un même patron d'écoulement qu'un système avec un nombre de Reynolds de 10^6 , il est alors possible d'utiliser une vitesse de courroie de 1,5 m/s. De cette façon, l'écoulement observé dans le modèle à eau est valable aussi pour une cuve 5 fois plus grande avec une vitesse de feuille de 2,0 m/s.

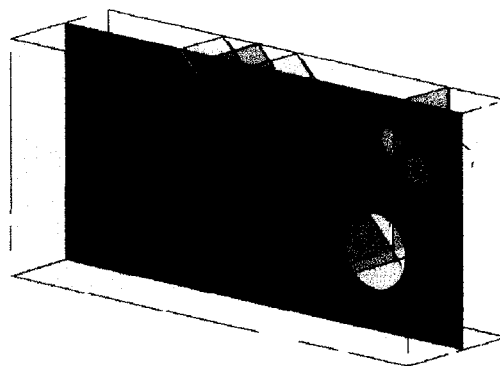
L'écoulement a été mesuré pour une configuration de bain sans lingot, donc dans des conditions isothermes. La figure 2.3 identifie les différents plans où l'écoulement est mesuré. Ainsi, la valeur des vitesses u (en x) et v (en y) (et w (en z) pour certains endroits) est extraite du document pour les points ciblés. Par conséquent, sur chaque plan observé en z soit $z = 0$, $z = -100$ et $z = -195$, 6 lignes à des hauteurs y différentes ont été interrogées afin d'avoir des valeurs de vitesse quantitatives pour permettre d'effectuer une comparaison. Les lignes en question sont montrées à la figure 2.4.

Avec la vélocimétrie laser Doppler, une séquence de plusieurs mesures de vitesse est prise. La valeur des vitesses instantanées en un point, donnée par le résultat d'analyse, est en fait la somme de la vitesse moyenne et de la fluctuation par rapport à la moyenne.

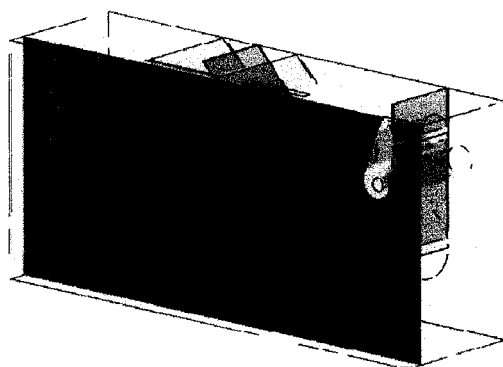
$$u_i = \bar{U} + u'_i \quad (2.1)$$



(a) $z = 0$ mm



(b) $z = -100$ mm



(c) $z = -195$ mm

Figure 2.3 Plans des mesures de vitesse.

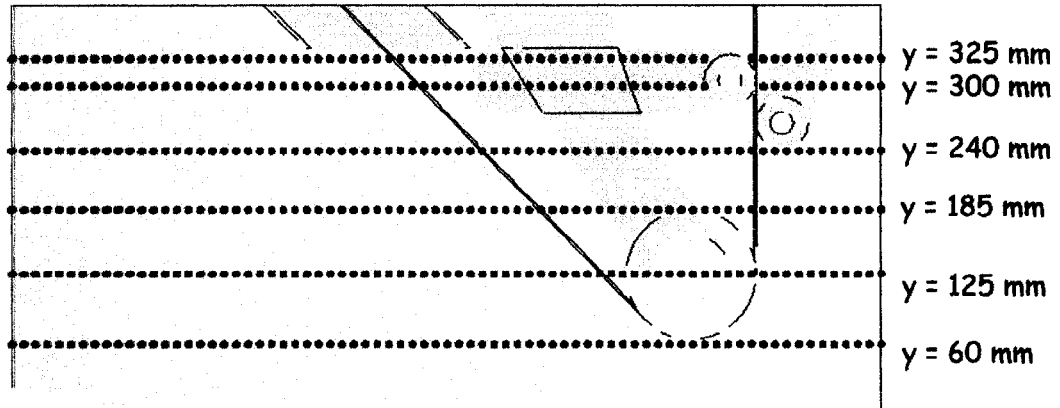


Figure 2.4 Lignes y pour les mesures quantitatives de vitesse

La vitesse moyenne étant :

$$\bar{U} = \frac{1}{N} \sum_{0 < i < N} u_i \quad (2.2)$$

avec i allant de 1 à N soit le nombre total de mesures prises en un point donné.

Il en est de même pour les directions v et w . En incluant l'expression 2.1 aux équations de continuité et de mouvement, on retrouve :

$$\rho \bar{\mathbf{U}} \cdot \nabla \bar{\mathbf{U}} = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu \nabla \bar{\mathbf{U}}] + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau}^t + \rho \mathbf{g} \quad (2.3)$$

$$\nabla \cdot \bar{\mathbf{U}} = 0 \quad (2.4)$$

avec $\tau_{ij}^t = -\rho \overline{u'_i u'_j}$

Le terme de turbulence est $-\overline{u'_i u'_j}$. Étant donné le système en trois dimensions, ce terme est représenté par la matrice suivante :

$$\tau^t = -\rho \begin{bmatrix} \overline{u'u'} & \overline{u'v'} & \overline{u'w'} \\ \overline{v'u'} & \overline{v'v'} & \overline{v'w'} \\ \overline{w'u'} & \overline{w'v'} & \overline{w'w'} \end{bmatrix}$$

Ainsi, pour valider l'écoulement, il est intéressant de comparer non seulement la valeur de la vitesse, mais aussi la grandeur de la turbulence. Idéalement, la matrice τ^t_{ij} est construite pour chaque point expérimental. Par contre, puisqu'il est difficile de recueillir toutes les données, le travail précédent de Binet ne compilait que le tenseur de Reynolds, $\overline{u'v'}$ et la valeur $\overline{u'u'}$ et $\overline{v'v'}$ pour certaines positions dans le bain. Étant donné les faibles valeurs de vitesse associées à la direction z , les vitesses w et fluctuations w' sont moins importantes et le choix de s'attarder sur u et v permet une bonne représentation de l'écoulement et de la turbulence.

2.3 Mesure de la température

2.3.1 Ajustement du modèle à eau

Pour la validation du calcul numérique du transfert de chaleur, la mesure de la variation de température dans le temps en différents points du bain est nécessaire.

L'utilisation de thermocouples pour ce faire s'avère incontournable. En effet, dans un souci de minimiser l'influence des équipements utilisés sur l'écoulement du bain, des méthodes sans contact auraient été préférables. Cela est toutefois impossible car l'objectif est de connaître la température dans le liquide et non simplement à la surface des différentes parois du bain et de la cloche.

Dans un bain de galvanisation industriel, les échanges thermiques sont principalement stimulés par la présence du lingot en fusion et de l'inducteur. Pour le modèle à eau, la simulation du lingot permettra d'apporter les conditions non isothermes nécessaires à la validation du transfert thermique entre le bain et le lingot. Pour représenter le lingot, un échangeur de chaleur a été conçu. Les côtés et le dessous du bloc simulant le lingot sont en cuivre, le dessus est en plexiglass et l'eau de refroidissement circule à l'intérieur. Le bloc est relié à un système de circulation d'eau à température constante comme le montre la figure 2.5. Des tests effectués préalablement aux expériences ont démontré que ce système permettait de maintenir toutes les surfaces du bloc à des températures équivalentes lorsque testé dans l'air. La figure 2.6 illustre la position des points étudiés. La vitesse de la feuille est toujours de 1,5 m/s.

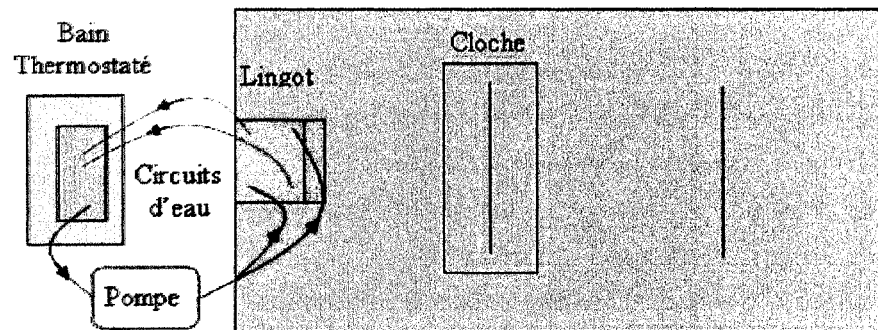


Figure 2.5 Système de refroidissement pour le lingot

2.3.2 Conditions thermiques expérimentales

Différentes expériences ont été menées, chacune impliquant l'acquisition de la variation de température dans le temps en différents points. Pour la plupart des points, la variation de température a été prise plus d'une fois pour s'assurer de la reproductibilité des résultats. Le tableau 2.1 détaille les conditions thermiques des expériences réalisées.

Lors des expériences, la température à la surface extérieure du bloc (celle en contact avec l'eau du bain) est difficilement mesurable. Par contre, la température à l'intérieur du bloc a été mesurée (tableau 2.1) et se maintient entre 10 et 12 °C pour les expériences 4 et 5 et entre 8 et 10 °C pour les autres expériences. On se retrouve avec la situation présentée à la figure 2.7. Évidemment, on ne connaît pas la valeur exacte du coefficient de transfert de chaleur de l'eau [Bird et al., 1960][Incropera et DeWitt, 1990]

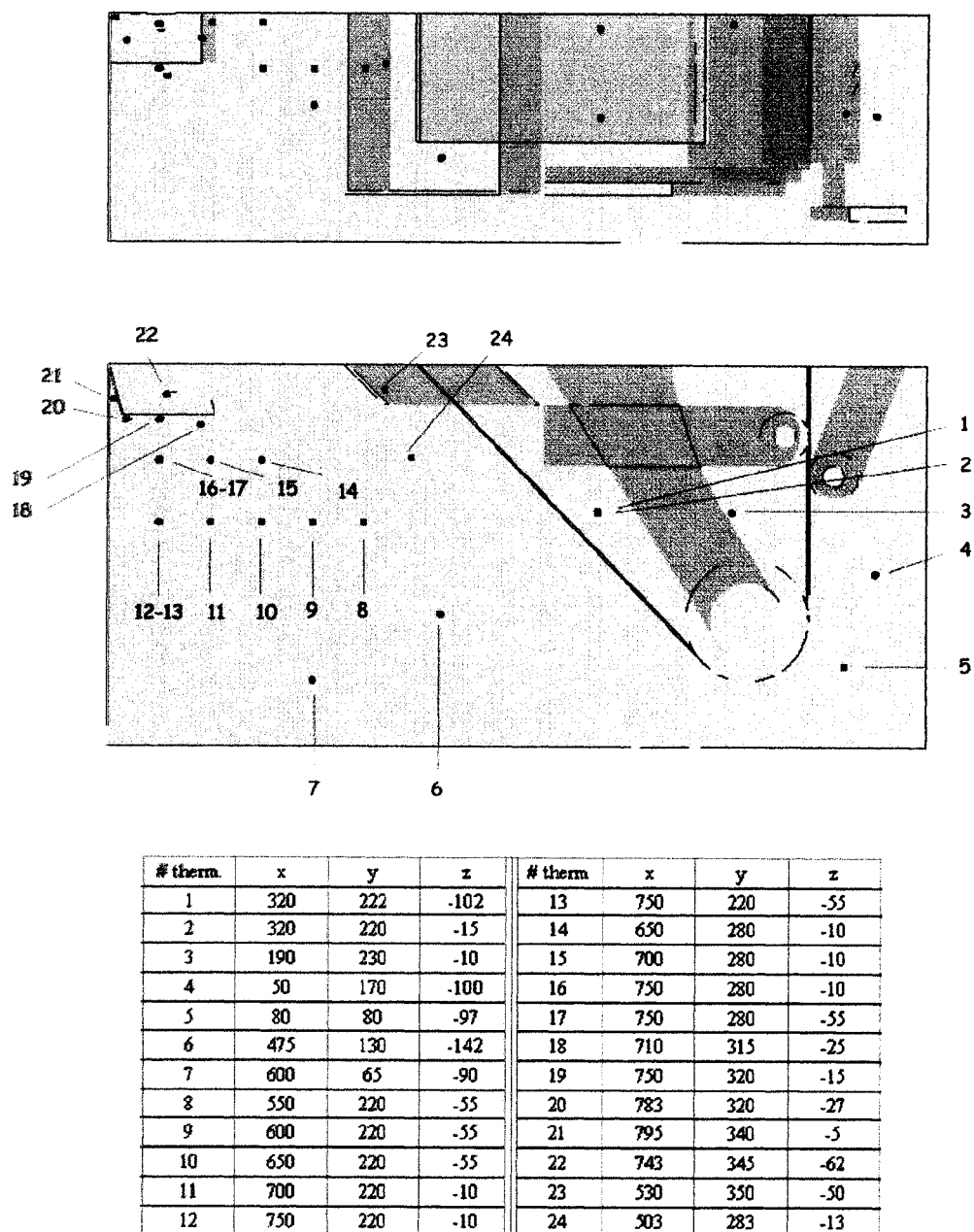


Figure 2.6 Positions des thermocouples dans le modèle à eau

Tableau 2.1 Conditions thermiques des différentes expériences avec lingot

numéro de l'expérience	température initiale de l'eau	température ambiante	température du lingot	notes
4	30,7 ° C	28,5 ° C	10 à 12 ° C	bulles d'air sur lingot
5	30,7 ° C	28 ° C	10 à 12 ° C	bulles d'air sur lingot
6	30,4 ° C	29,5 ° C	8 à 10 ° C	bulles d'air enlevées
7	31,5 ° C	28 ° C	8 à 10 ° C	bulles d'air enlevées
9	29,7 ° C	26,6 ° C	8 à 10 ° C	bulles d'air enlevées
11	30,1 ° C	26,5 ° C	8 à 10 ° C	bulles d'air enlevées
12	31,3 ° C	28 ° C	8 à 10 ° C	bulles d'air enlevées
13	29,9 ° C	26,7 ° C	8 à 10 ° C	bulles d'air enlevées
14	31,1 ° C	27 ° C	8 à 10 ° C	bulles d'air enlevées
15	29,7 ° C	26,5 ° C	8 à 10 ° C	bulles d'air enlevées

à cet endroit puisqu'il dépend entre autres de la température et de la turbulence.

Par contre, des tests avec le modèle numérique ont démontré que la température à la surface extérieure du lingot, dans les conditions de bain des différentes expériences, est sensiblement la même que celle à l'intérieur du lingot. Ainsi, avec un calcul simple de transfert thermique en partant de l'équation du flux de chaleur :

$$q = -\lambda \frac{dT}{dx} \quad (2.5)$$

et sachant que le flux de chaleur est égale de part et d'autre de la paroi cuivre/eau du bain, on peut estimer la valeur du coefficient de transfert de chaleur de l'eau entre 100 et 200 $W/m^2 \cdot ^\circ C$.

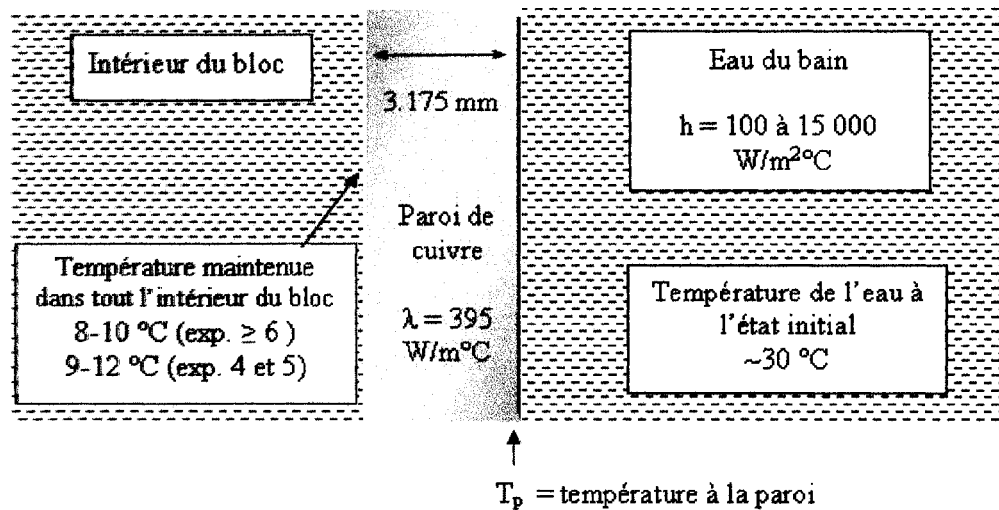


Figure 2.7 Situation entourant le lingot de cuivre avec λ ; la conductivité thermique et h ; le coefficient de transfert de chaleur

Une particularité à ajouter est la formation de plusieurs petites bulles d'air disposées de façon assez uniforme à la surface du lingot à partir du début de l'expérience. Pour l'expérience 7 et les suivantes, ces bulles ont été retirées de la surface avant la mise en marche du moteur et l'apparition des nouvelles bulles en cours d'expérience est négligeable. Pour les expériences 4, 5 et 6, on se retrouve avec la situation de la figure 2.8. Évidemment, les bulles ne recouvrent pas toute la surface du cuivre, mais une estimation visuelle nous permet d'évaluer à environ 25 % la surface recouverte par des bulles. Ainsi, dans les zones sans bulles la situation est telle que présentée à la figure 2.7 et sur les parties avec bulles, le coefficient de transfert thermique est considérablement diminué par la présence de cet isolant. On parle alors de $124\,409 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ comme valeur de transfert thermique pour la paroi de cuivre pour les zones sans bulle d'air et de $52 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ pour celle avec

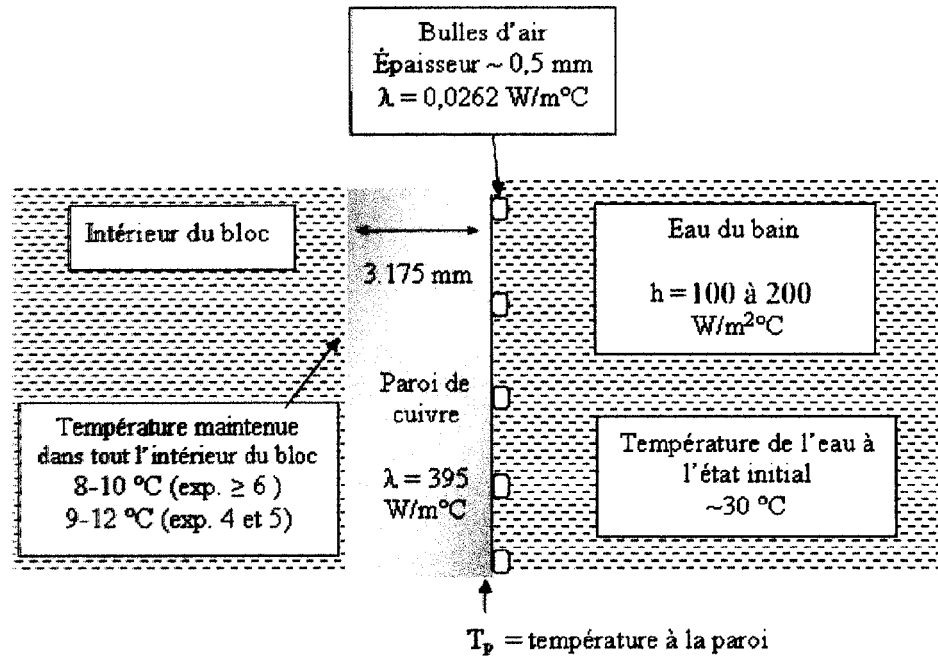


Figure 2.8 Situation entourant le lingot de cuivre avec bulles d'air avec λ ; la conductivité thermique et h ; le coefficient de transfert de chaleur

une bulle d'air de 0,5 mm d'épaisseur. Pour représenter adéquatement l'influence des bulles d'air sur la paroi de cuivre, il est difficile de trouver un coefficient de transfert de chaleur h moyen qui puisse être utilisé dans les calculs, car le tout agit en parallèle avec le transfert thermique de l'eau qui s'avère plus ou moins important selon les régions. Il est toutefois possible d'évaluer approximativement la température moyenne à la surface extérieure du lingot au moyen de l'équation 2.5.

Le tableau 2.2 présente les résultats des calculs de température à la paroi extérieure du bloc de cuivre aux endroits où il y a des bulles d'air. On considère

Tableau 2.2 Calcul des conditions thermiques entourant le lingot avec présence de bulles d'air

$\lambda_{\text{cuivre}} = 395 \text{ W/m} \cdot ^\circ \text{C}$ $\lambda_{\text{air}} = 0,0262 \text{ W/m} \cdot ^\circ \text{C}$ $T_{\text{eau du bain}} = 30 \text{ } ^\circ \text{C}$ $h_{\text{eau}} = 150 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ \text{C}$			
$T_{\text{lingot-intérieur}}$ $^\circ \text{C}$	$\text{épaisseur}_{\text{bulle d'air}}$ mm	$h_{\text{cuivre-bulle d'air}}$ $\text{W/m}^2 \cdot ^\circ \text{C}$	$T_{\text{lingot-paroi extérieure}}$ $^\circ \text{C}$
9	1	26,2	26,9
10	1	26,2	27,0
12	1	26,2	27,3
9	0,25	104,71	21,4
10	0,25	104,71	21,8
12	0,25	104,71	22,6

alors les bulles d'air comme faisant partie de la surface de cuivre. Donc, la valeur du transfert thermique du cuivre est considérablement diminué à tous les endroits où il y a une bulle. En raison de l'incapacité à attribuer une valeur exacte à l'épaisseur des bulles, différentes valeurs ont été utilisées soit 0,25 mm et 1 mm. Les températures 9, 10 et 12 °C servent de référence pour les températures d'eau à l'intérieur du lingot pour les expériences 4,5 et 6 et le coefficient de transfert de chaleur de l'eau entourant le lingot a été fixée à 150 W/m² · °C (figure 2.8). Ainsi, on a pu calculer que l'ajout de l'isolation par l'air des bulles donnait une température supérieure à environ 21 °C à la surface extérieure du lingot aux endroits où il y a une bulle et varie selon l'épaisseur des bulles d'air.

Considérant que les endroits où il n'y a pas de bulles ont approximativement la même température que l'eau à l'intérieur du lingot et que les bulles recouvrent environ de 20 à 30% de la surface, le tableau 2.3 peut être construit pour calculer la température moyenne à la surface du lingot selon les différentes variables. On voit notamment que la température à la surface extérieure du lingot est influencée par toutes ces variables et qu'il faudra en tenir compte lors de la validation. Avec une température d'eau à l'intérieur du lingot de 9°C , la présence de bulles d'air diminue l'échange thermique avec l'eau du bain ce qui peut se traduire par une hausse de la température moyenne à la surface extérieure du lingot qui peut atteindre 11,5 à $14,6^{\circ}\text{C}$, selon l'épaisseur et la proportion réelles des bulles.

Pour chaque expérience, les thermocouples positionnés dans le bain ont permis de s'assurer que la température était uniforme dans tout le volume d'eau avant de débiter une expérience. Notons que la température extérieure (température ambiante du laboratoire) a aussi été mesurée afin de s'assurer que sa variation, inévitable dans ces conditions-ci, était toutefois faible. En effet, à la fin des expériences, il y avait généralement une légère hausse ou baisse de la température ambiante comparativement à la température du début. Cette variation a été au maximum de $1,5^{\circ}\text{C}$ durant les expériences numéros 12 et 14 (sur 3 heures de lecture), pour les autres, il s'agissait d'à peine $0,5^{\circ}\text{C}$ à 1°C .

Tableau 2.3 Calcul de la température moyenne de la paroi extérieure du lingot avec présence de bulles d'air

$T_{\text{lingot-intérieur}}$ ° C	$T_{\text{paroi sans bulle}}$ ° C	$T_{\text{paroi avec bulle}}$ ° C	rapport surface avec bulles/sans bulles	$T_{\text{moyenne-paroi ext.}}$ ° C
9	9,1	21,4-26,9	0,20/0,80	12,1 $\pm$ 0,6
10	10,1	21,8-22,6	0,20/0,80	13,0 $\pm$ 0,5
12	11,1	22,6-27,3	0,20/0,80	14,7 $\pm$ 0,5
9	9,1	21,4-26,9	0,25/0,75	12,9 $\pm$ 0,7
10	10,1	21,8-22,6	0,25/0,75	13,7 $\pm$ 0,7
12	11,1	22,6-27,3	0,25/0,75	15,3 $\pm$ 0,6
9	9,1	21,4-26,9	0,30/0,70	13,7 $\pm$ 0,9
10	10,1	21,8-22,6	0,30/0,70	14,4 $\pm$ 0,8
12	11,1	22,6-27,3	0,30/0,70	16,0 $\pm$ 0,7

Il est important de signaler que l'utilisation de thermocouples entraîne des erreurs sur les mesures. Premièrement, le thermocouple (de type T) lui-même affiche une erreur possible sur la lecture de $\pm 1,0$ ° C. Ensuite, il s'est avéré que l'emploi du moteur causait des interférences dans les mesures. En effet, la mise en marche du moteur entraînait un saut abrupte dans la valeur des températures mesurées (figure 2.9) (qui s'effaçait à la fermeture du moteur) de même qu'une plus grande fluctuation des mesures. Pour la figure 2.9, les mesures ont été prises dans le bain sans le mouvement de la feuille, ce qui permet d'identifier l'effet du moteur exclusivement et sans l'effet de la turbulence causée par le mouvement de

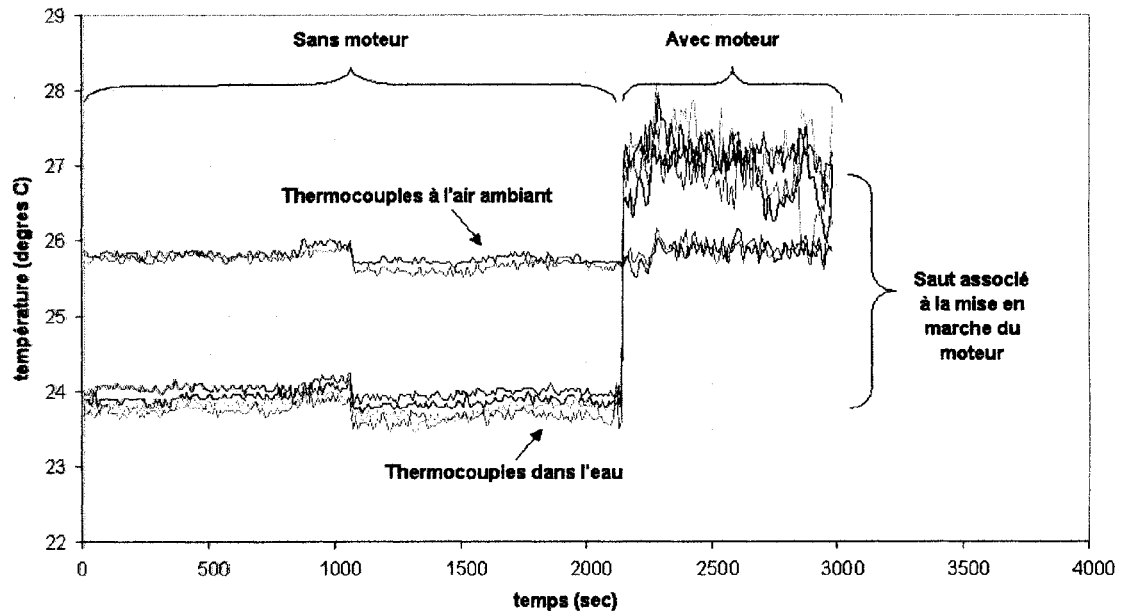


Figure 2.9 Sensibilité des thermocouples face à la mise en marche du moteur

la feuille. Il a été impossible de supprimer ces effets du moteur. Par contre, afin de les minimiser sans toutefois perdre l'effet transitoire des mesures, plusieurs données par seconde ont été prises et une moyenne a été faite sur 10 secondes. De plus, les résultats d'expériences seront exprimés en terme de ΔT afin de ne pas comparer des valeurs absolues mais bien la variation de température de l'eau directement.

Des tests ont été effectués dans le bain d'eau sans lingot et avec moteur pour une période de 20 minutes et, comme l'expose la figure 2.10, les fluctuations de température mesurée montre une tendance dans le temps comparable à la variation des thermocouples dans l'air ambiant (et dans l'eau sans moteur). Ceci valide donc les variations de température mesurées, lesquelles incluent les fluctuations

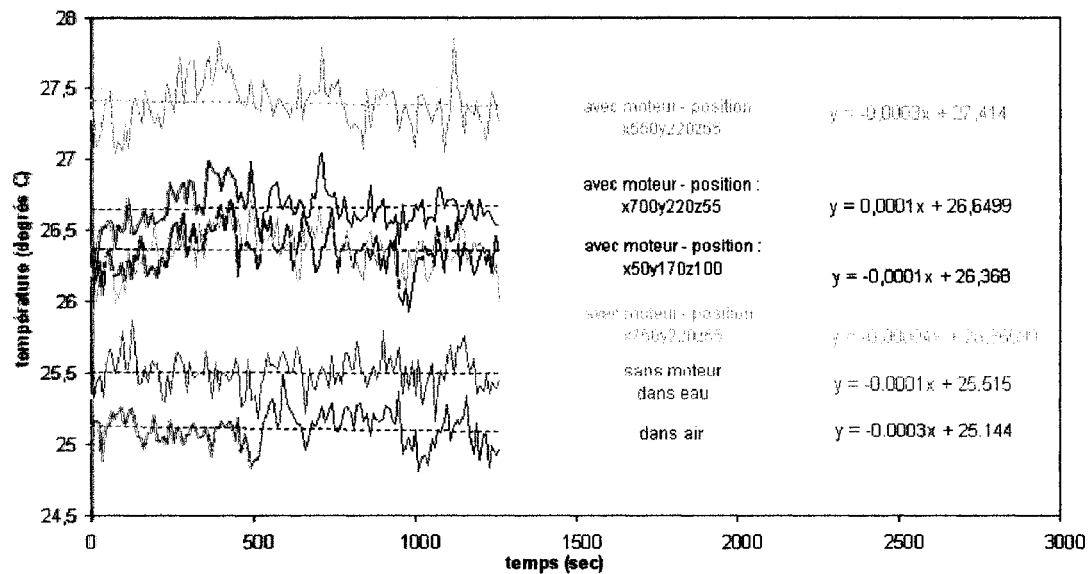


Figure 2.10 Influence du moteur sur la fluctuation des mesures

supplémentaires causées par le moteur. Pour appuyer le tout, la mesure des températures juste avant et juste après la mise en marche du moteur est prise et la différence entre les deux valeurs pourra être comparée à la variation mesurée lors de l'expérience elle-même. Notons que les positions près de la feuille à l'avant du bain et celles tout près du lingot semblent plus influencées par la présence du moteur. Toutes ces positions sont près des parois et des composantes en contact avec la structure du bain à laquelle est aussi rattachée le moteur. Les vibrations causées par le moteur peuvent alors être transmises par la structure du bain, d'où les perturbations plus importantes pour les positions près des parois.

2.4 Description du modèle numérique

Le modèle numérique à valider a été défini en collaboration avec le groupe de recherche de l'IMI. Les différentes hypothèses utilisées pour les simulations sont les suivantes :

1. l'écoulement dans le bain est turbulent,
2. l'effet de la convection naturelle est inclus par l'utilisation de l'approximation de Boussinesq,
3. pour l'écoulement, le régime est permanent (l'effet du temps est négligé),
4. pour le transfert thermique, le régime est transitoire,
5. l'eau est un fluide newtonien,
6. l'écoulement est symétrique par rapport au plan central.

Tel que mentionné précédemment, le modèle se base sur la résolution des différentes équations d'échange [Ilinca et al., 2003]. On retrouve premièrement, pour l'écoulement turbulent, l'équation suivante :

$$\rho \frac{D\mathbf{u}}{Dt} = -\nabla p + \nabla \cdot [(\mu + \mu_T)(\nabla \mathbf{u} + \nabla \mathbf{u}^T)] + \rho \mathbf{g} \quad (2.6)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0$$

ρ , $\mathbf{u}$, p , μ et g désignent respectivement la densité, la vitesse, la pression, la viscosité et l'accélération gravitationnelle. Puisqu'il y a une variation de la densité

en fonction de la température pour les conditions non isothermes, l'effet de la convection naturelle est ajouté par l'approximation de Boussinesq .

$$\rho = \rho_0(1 + \beta g(T - T_0)) \quad (2.7)$$

avec β ; le coefficient de dilatation thermique. En combinant les deux équations on retrouve :

$$\rho_0 \frac{D\mathbf{u}}{Dt} = -\nabla p + \nabla \cdot [(\mu + \mu_T)(\nabla \mathbf{u} + \nabla \mathbf{u}^T)] + \rho_0 \mathbf{g} \beta (T - T_0) \quad (2.8)$$

Dans le présent cas, le coefficient de dilatation thermique de l'eau varie avec la température et cet aspect est considéré dans le calcul. Selon les valeurs du coefficient de dilatation thermique de l'eau dans l'intervalle de température concerné [Incropera et DeWitt, 1990], l'équation polynomiale suivante peut représenter adéquatement la variation de cette propriété en fonction de la température en degrés C :

$$\beta = -1,185 \cdot 10^{-7} T^2 + 1,553121 \cdot 10^{-5} T - 5,619843 \cdot 10^{-5}$$

Pour ce qui est de la température, l'équation du transfert thermique avec un écoulement turbulent est utilisée :

$$\rho c_p \frac{DT}{Dt} = \nabla \cdot [(\lambda + \lambda_T) \nabla T] \quad (2.9)$$

avec c_p la chaleur spécifique, T la température et λ la conductivité thermique.

Le modèle de turbulence utilisé dans les calculs est le modèle $k - \epsilon$; modèle le plus largement utilisé en industrie puisqu'il répond bien aux situations réelles.

Les équations à résoudre sont :

$$\begin{aligned}\rho \left(\frac{\partial k}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla k \right) &= \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P - \rho \epsilon \\ \rho \left(\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \epsilon \right) &= \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\epsilon} \right) \nabla \epsilon \right] + C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} (P) - C_{\epsilon 2} \rho \frac{\epsilon^2}{k}\end{aligned}\quad (2.10)$$

avec les constantes utilisées définies comme suit :

$$\sigma_k=1.0 \quad , \quad \sigma_\epsilon=1.3 \quad , \quad C_{\epsilon 1}=1.44 \quad , \quad C_{\epsilon 2}=1.92 \quad , \quad C_\mu = 0.09$$

Le terme P définit la production de la turbulence et est donné par $\mu_T [\nabla \mathbf{u} : (\nabla \mathbf{u} + \nabla \mathbf{u}^T)]$.

Ces équations permettent de calculer la valeur de l'énergie cinétique de la turbulence k et de sa dissipation ϵ .

La viscosité et la conductivité thermique turbulente peuvent être explicitées de la façon suivante :

$$\mu_T = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}$$

$$\lambda_T = \frac{\mu_T c_p}{Pr_T} \quad (2.11)$$

avec le nombre de Prandtl turbulent Pr_T égal à 1. Dans un système turbulent, la viscosité et la conductivité thermique turbulente prédominent généralement sur les valeurs laminares. La valeur de la viscosité turbulente est généralement de 2 ordres de grandeur plus élevée que la viscosité du liquide.

Comme mentionné précédemment, une partie de la validation du modèle se base sur la comparaison de la grandeur de la turbulence analytique à celle de la turbulence expérimentale. On note, dans l'équation 2.8, que la considération de la turbulence est incluse par l'ajout du terme $\mu_T(\nabla u + \nabla u^T)$ qui modélise le taux de cisaillement des fluctuations turbulentes $\tau_{ij}^t = -\rho \overline{u'_i u'_j}$.

Afin de bien représenter les situations réelles, des modifications doivent être apportées au modèle de turbulence pour le comportement près des murs. En effet, dans ces zones, l'écoulement est dominé par la viscosité du fluide et la turbulence n'y est pas développée.

Le modèle de l'IMI inclut donc une loi de paroi [Launder et Spalding, 1974] (velocity wall function) qui est appliquée sur toutes les surfaces, c'est-à-dire les murs du bain,

la feuille, les parois de la cloche, le lingot lorsque présent et les équipements du montage immergés. Ce modèle a pour but d'utiliser des équations semi-empiriques qui représentent adéquatement le comportement des variables dans ces régions et relie les contraintes de cisaillement du mur τ_m à la vitesse tangentielle relative :

$$\tau_m = \frac{\rho |u - u_m| C_\mu^{1/4} k_m^{1/2}}{U^+} \quad (2.12)$$

avec

$$U^+ = \begin{cases} y^+ & \text{si } y^+ < y_c^+ \\ \frac{1}{\kappa} \ln(E y^+) & \text{si } y^+ \geq y_c^+ \end{cases}$$

$$y^+ = \frac{\rho C_\mu^{1/4} k_m^{1/2} y}{\mu} \quad (2.13)$$

avec la constante de Von Karman $\kappa = 0.41$, u_m et k_m la vitesse et l'énergie cinétique turbulente au mur et E un paramètre de surface imposé à 9,0 pour les parois lisses. Selon cette loi, une valeur adimensionnelle y^+ supérieure à 11,26 mène à une loi logarithmique, et pour un y^+ inférieur à 11,26, une loi linéaire s'applique. La valeur de y (la distance séparant le mur de la plus proche cellule) se situe

idéalement de telle sorte que y^+ soit en dehors de la région visqueuse (figure 2.11) et préféablement dans le début de la région logarithmique.

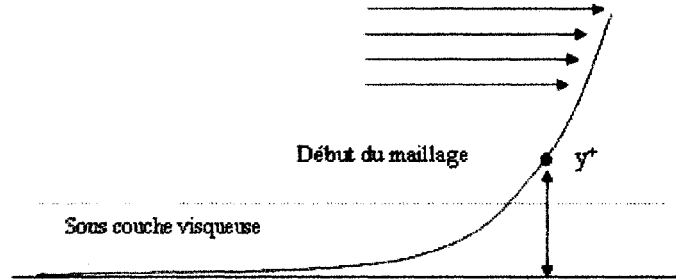


Figure 2.11 Schématisation de l'écoulement près du mur

Une adaptation semblable des conditions frontières est appliquée au profil de température :

$$q_m = h_T(T - T_m) \quad (2.14)$$

$$h_T = \frac{\rho c_p C_\mu^{1/4} k_m^{1/2}}{T^+} \quad (2.15)$$

avec h_T , le coefficient de transfert de chaleur à la paroi et T^+ une fonction de y^+ . Sur les murs du bain, la surface libre et les surfaces du lingot, la chaleur échangée avec l'air ambiant doit aussi être considérée avec l'équation :

$$q_m = h_c(T_m - T_a) \quad (2.16)$$

avec h_c la valeur du transfert thermique s'effectuant à travers la paroi. La combinaison des équations 2.14 et 2.16 permet d'obtenir l'équation suivante :

$$q_m = h(T - T_a) \quad (2.17)$$

avec $h = \frac{h_T h_c}{h_T + h_c}$

En combinaison avec cette loi de paroi, des conditions limites de Dirichlet (normale) et de Neumann (tangentielle) sont imposées afin de représenter l'écoulement dans le modèle à eau et de résoudre les différentes équations différentielles :

$$\begin{aligned} u_m &= u_{feuille} && \text{sur feuille (et sur rouleaux)} \\ u_m &= 0 && \text{sur parois fixes} \\ [(\mu + \mu_T)(\nabla \mathbf{u} \cdot \mathbf{n}) - pn] &= \tau_m && \text{sur parois fixes et feuille} \\ \tau &= 0 && \text{sur surface libre} \\ u \cdot \mathbf{n} &= 0 && \text{sur parois fixes, feuille et surface libre} \\ \frac{du}{dn} &= 0 && \text{sur plan de symétrie} \end{aligned} \quad (2.18)$$

L'ensemble de toutes les équations est résolue selon l'algorithme présenté à la figure 2.12. A chaque pas de temps, l'itération globale est réalisée pour les équations

de continuité, de quantité de mouvement, de turbulence et d'énergie. Pour les calculs dans des conditions isothermes, la solution en régime permanent est obtenue par la résolution des équations de continuité, de quantité de mouvement et de turbulence. Pour cette situation, 30 itérations globales ont été réalisées pour obtenir la solution finale, ce qui est équivalent à environ 3 jours de calcul. Pour le problème thermique avec la présence du lingot, la solution transitoire est obtenue pour un temps de galvanisation de 2 heures 46 minutes (10 000 secondes) en utilisant un pas de temps de 10 secondes. Pour 1 itération de convergence à chaque pas de temps, ceci équivaut à environ 2 semaines de calcul. La solution du calcul dans des conditions isothermes est utilisée comme condition initiale de l'écoulement pour les calculs dans des conditions non-isothermes.

Pour un bain sans lingot, le maillage utilisé est composé de 284 445 éléments (tétraédriques et de surfaces) et 53 391 noeuds et pour un bain avec lingot il possède 304 835 éléments et 53 391 noeuds. La figure 2.13 montre le maillage et le raffinement fait dans les zones plus critiques, soit près des composantes en mouvement.

2.5 Valeurs utilisées pour les calculs

Afin de faire les calculs adéquats, les propriétés de l'eau de même que celles de certaines composantes du modèle doivent être connues et sont présentées au

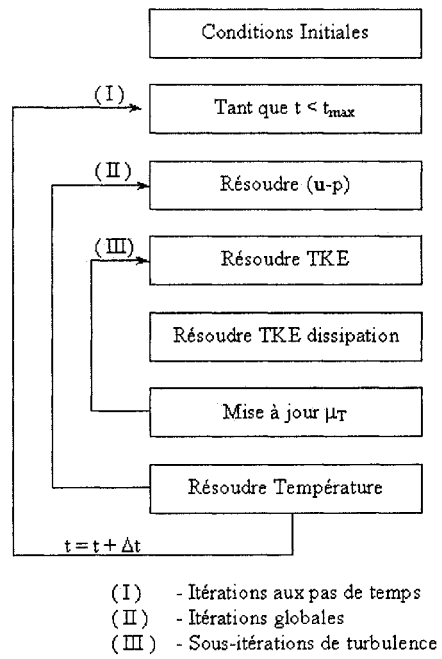


Figure 2.12 Algorithme de calcul [Ilinca et al., 2003]

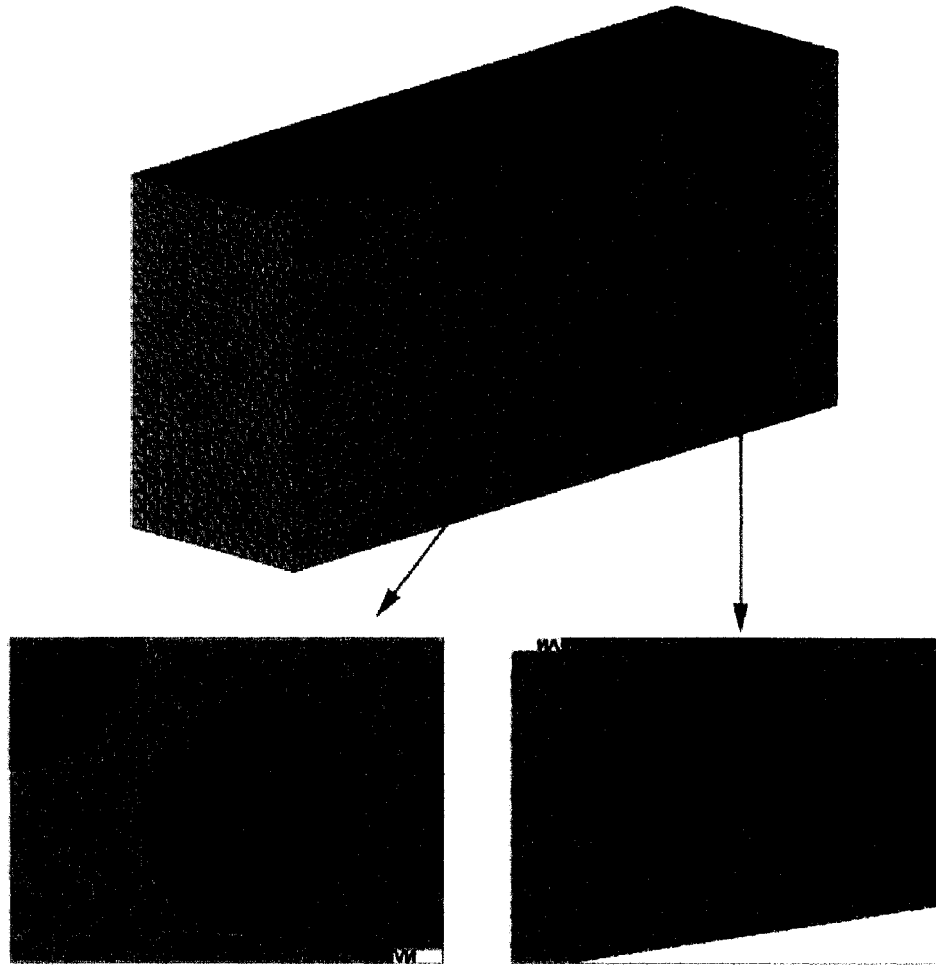


Figure 2.13 Maillage du modèle à eau pour simulation numérique

tableau 2.4 pour une température de 30 ° C. Il est à noter que les variables utiles pour les équations 2.7 à 2.16 sont entrées dans le calcul sous forme adimensionnelle en se rapportant à des valeurs de référence prédéterminées.

Pour les expériences isothermes, la température est fixée à 20 ° C ; température à laquelle Binet a fait les expériences. Pour les calculs dans les conditions non isothermes, plusieurs combinaisons de conditions thermiques sont utilisées afin de bien représenter les expériences sur le modèle (section 2.3.2). Le tableau 2.5 résume les conditions thermiques des calculs à lancer et les expériences sur le modèle à eau pouvant s’y rapporter.

Pour les calculs 1 à 3, la température du lingot est celle de l’eau à l’intérieur du bloc de cuivre et donc h_c (équation 2.16) est associé au transfert thermique à travers la paroi de cuivre. De cette façon, les deux coefficients de transfert de chaleur (h_c et h_T) sont pris en considération par l’application de la loi en parallèle : $h = \frac{h_T h_c}{h_T + h_c}$ pour la loi de paroi. Pour le calcul 4, le 14 ° C est imposé à la surface extérieure du lingot de cuivre, comme il a été calculé dans la section 2.3.2 pour la situation avec bulles d’air. Pour la simulation, le lingot est alors considéré comme une masse de 14 ° C avec un contact parfait avec l’eau du bain. Ceci se traduit par un h_c très élevé (4 000 000) pour les parois de cuivre. De cette façon, on s’assure que pour l’équation 2.17, la valeur h_T est prédominante. On a constaté que l’utilisation

du coefficient de transfert de chaleur du cuivre de $124\,409\text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$ permettait relativement le même résultat qu'un h très élevé, mais pour être fidèle dans la représentation des expériences, des conditions différentes ont été imposées.

Il faut noter que le 14°C imposé pour le calcul 4 a été calculé avec la présence de bulles d'air et qu'une certaine erreur est possible (tableau 2.3). De plus, pour les expériences 4 et 5, la température à l'intérieur du lingot peut aller jusqu'à 12°C , ce qui donne une température moyenne sur la paroi extérieure du lingot de $14,2$ à $16,7^\circ\text{C}$ (tableau 2.3). Le 14°C servira alors de référence.

L'analyse des différentes solutions des calculs numériques permettra de comparer les solutions analytiques avec les résultats des prises de mesures expérimentales.

Tableau 2.4 Propriétés de l'eau à 30 ° C et des composantes dans le bain

EAU	
densité	995,65 kg / m ³
viscosité	0,0007977 Pa · s
chaleur spécifique	4178,4 J/ Kg · ° C
conductivité thermique	0,6154 W/m · ° C
coefficient d'expansion thermique	3,02 x 10 ⁻⁴
FEUILLE (caoutchouc)	
vitesse	1,5 m/s
conductivité thermique	0,13 W/m · ° C
épaisseur	0,0015 m
transfert de chaleur	86,67 W/m ² · ° C
PAROI (plexiglass)	
conductivité thermique	0,26 W/m · ° C
épaisseur	0,0113 m
transfert de chaleur	23,009 W/m ² · ° C
LINGOT	
conductivité thermique	395 W/m · ° C
épaisseur	0,003175 m
transfert de chaleur	124 409 W/m ² · ° C
SURFACE LIBRE	
coefficient de transfert de chaleur	20,00 W/m ² · ° C

Tableau 2.5 Conditions thermiques des différentes expériences numériques avec lingot

calcul	température initiale de l'eau	température extérieure	température du lingot	expériences reliées
calcul 1	29,9 ° C	26,5 ° C	9 ° C / $h=124\,409\text{ W/m}^2 \cdot \text{° C}$	9-11-13-15
calcul 2	29,9 ° C	26,5 ° C	10 ° C / $h=124\,409\text{ W/m}^2 \cdot \text{° C}$	9-11-13-15
calcul 3	31,3 ° C	28,0 ° C	9 ° C / $h=124\,409\text{ W/m}^2 \cdot \text{° C}$	7-12-14
calcul 4	30,6 ° C	28,5 ° C	14 ° C / $h=4\,000\,000\text{ W/m}^2 \cdot \text{° C}$	4-5-6

CHAPITRE 3

OBSERVATIONS, VALIDATIONS ET DISCUSSION

Ce chapitre présente les résultats expérimentaux et les résultats des simulations numériques afin de valider ce modèle construit par le groupe de recherche de l'IMI. Les comparaisons s'effectuent selon les conditions énoncées dans le précédent chapitre.

3.1 Validation de l'écoulement dans des conditions isothermes

3.1.1 Analyse de la comparaison de la vitesse

Les graphiques 3.1 à 3.18 illustrent la comparaison entre les vitesses mesurées dans des conditions isothermes [Binet, 2000] et celles résultant des calculs numériques dont les paramètres de calcul sont tels que décrit précédemment. Pour chaque ligne mesurée dans le bain (figure 2.5), les graphiques de comparaison pour la vitesse u (en x) et v (en y) sont reproduits, et ce, pour les 3 plans étudiés ($z=0$, $z=-100$ et $z=-195$). Les vitesses w expérimentales n'avaient été rapportées que pour certaines lignes sur le plan $z=-195$ où les vitesses sont très faibles ; on se concentrera alors sur u et v lesquelles sont représentatives de l'écoulement dans les plans xy . Notons qu'il peut exister un certain décalage entre l'expérimental et le numérique

concernant la position des composantes immergées dans le bain. Pour construire le modèle numérique, les mesures de la configuration du modèle à eau ont été faites le plus fidèlement possible, mais étant donné qu'une période de temps et certaines manipulations ont séparé la prise des mesures expérimentales et la reproduction du bain pour le modèle numérique, certaines différences peuvent exister.

Pour $y = 60$ mm (figures 3.1 et 3.2), les valeurs expérimentales et numériques des vitesses en y sont comparables excepté pour un point directement sous le rouleau où la valeur expérimentale est plus grande que la valeur numérique. Pour u en $z=0$ et en $z=-100$ mm, il y a aussi une petite différence lorsque l'on se trouve directement sous le rouleau principal, différence qui s'estompe dès que l'on s'en éloigne d'environ 50 mm par l'avant comme par l'arrière. Malgré l'écart sur la valeur, il est quand même possible de voir la ressemblance du profil d'écoulement. La proximité d'une surface en mouvement est peut-être la cause d'une erreur sur la mesure. En effet, les points mesurés se trouvent directement sous le rouleau et, considérant les erreurs possibles de la méthode sur la position, les mesures prises sont peut-être influencées par la vitesse de la surface en mouvement.

Pour $z = -195$ mm (figure 3.3), les valeurs expérimentales montrent un écoulement assez important qui n'est pas calculé par le modèle analytique et que, physiquement,

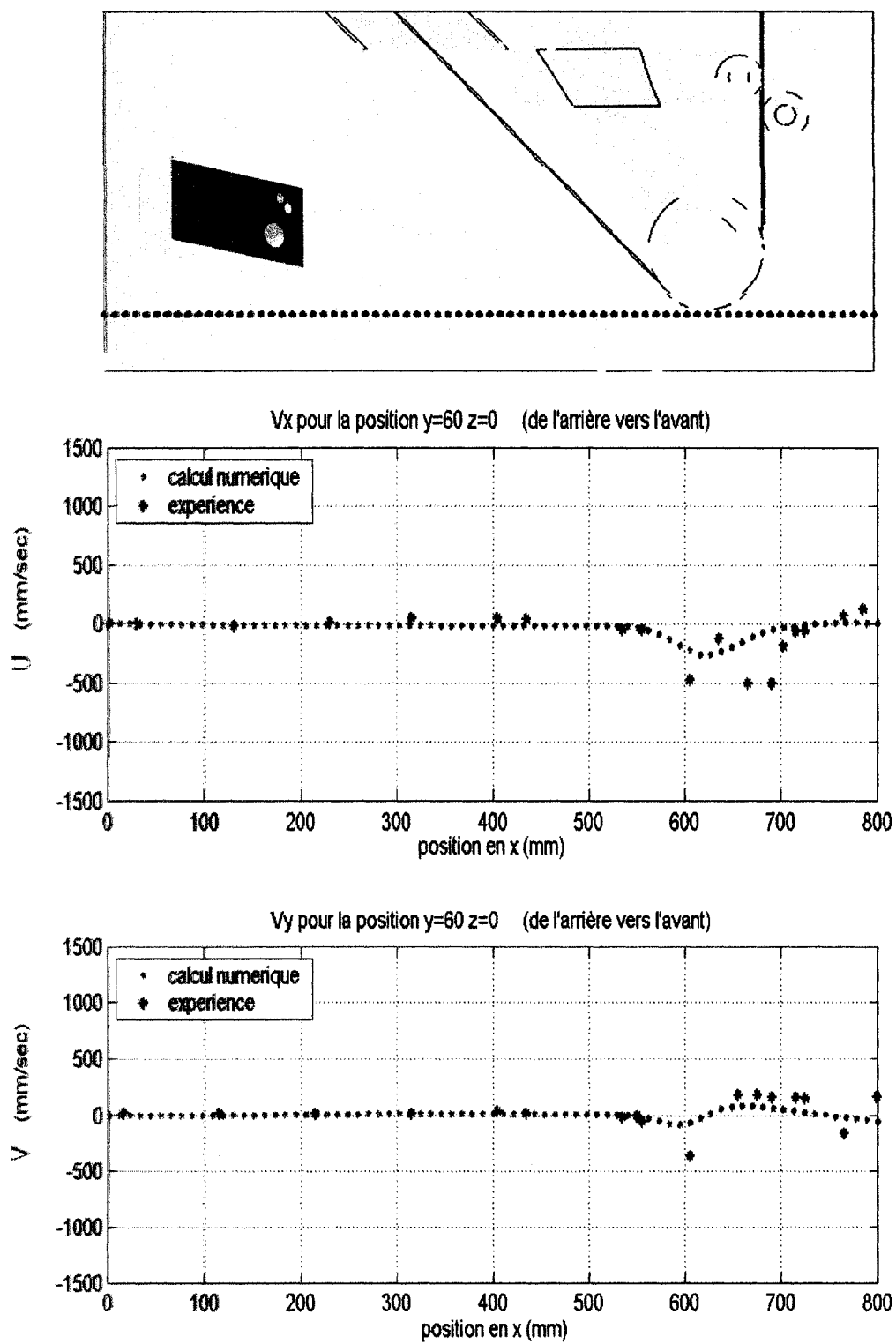


Figure 3.1 Comparaison des vitesses à la ligne $y = 60$ mm et $z = 0$ mm

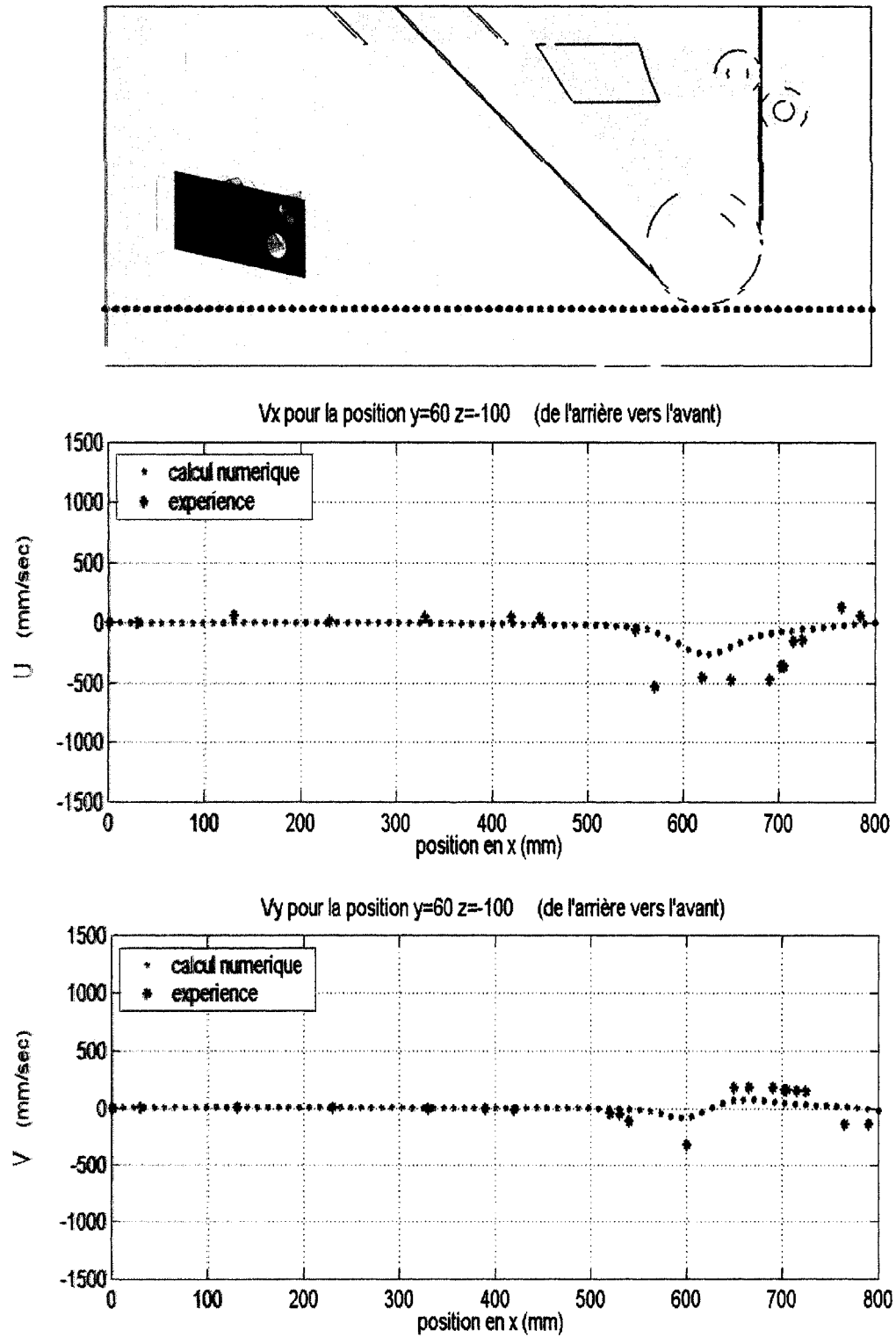


Figure 3.2 Comparaison des vitesses à la ligne $y = 60$ mm et $z = -100$ mm

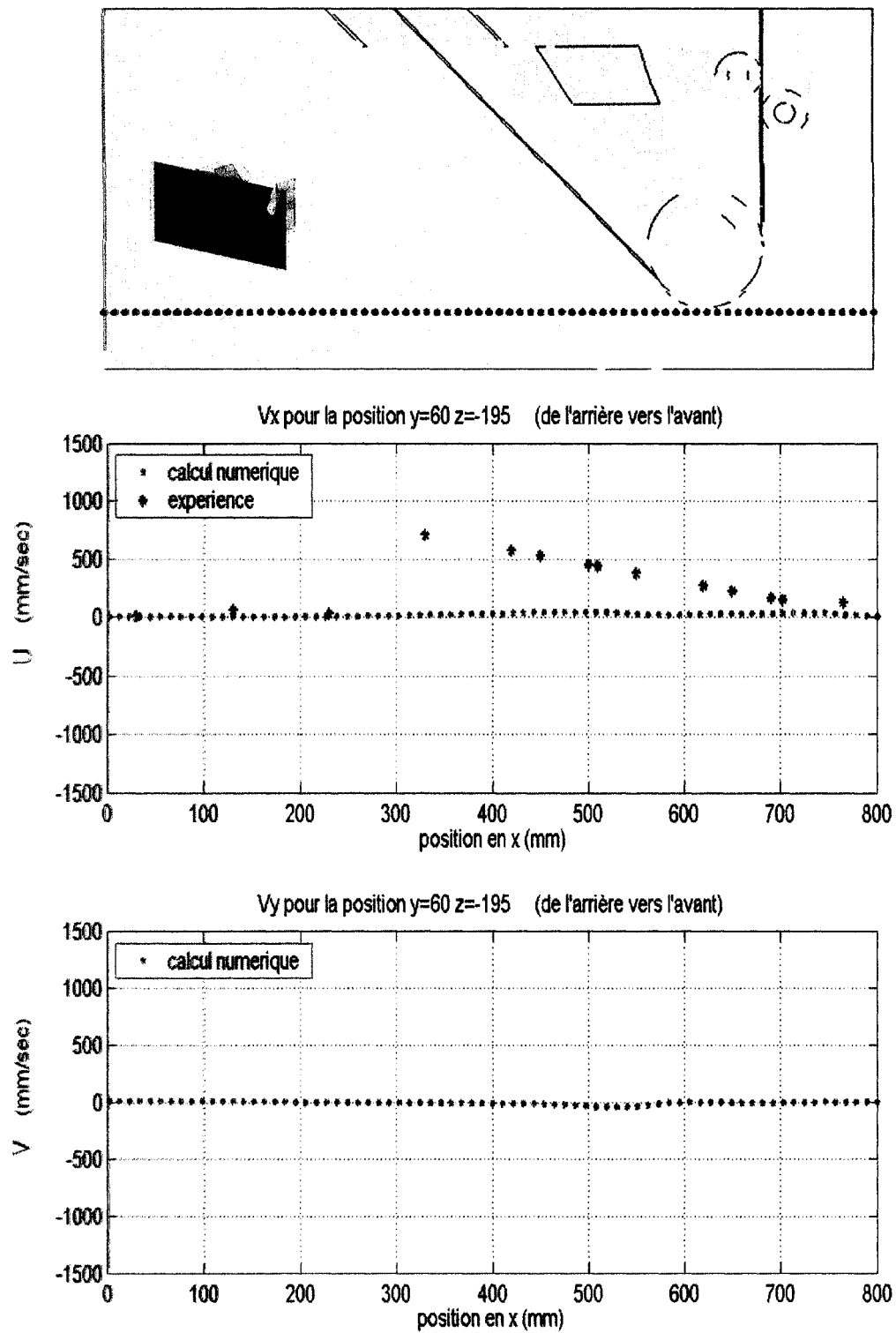


Figure 3.3 Comparaison des vitesses à la ligne $y = 60$ mm et $z = -195$ mm

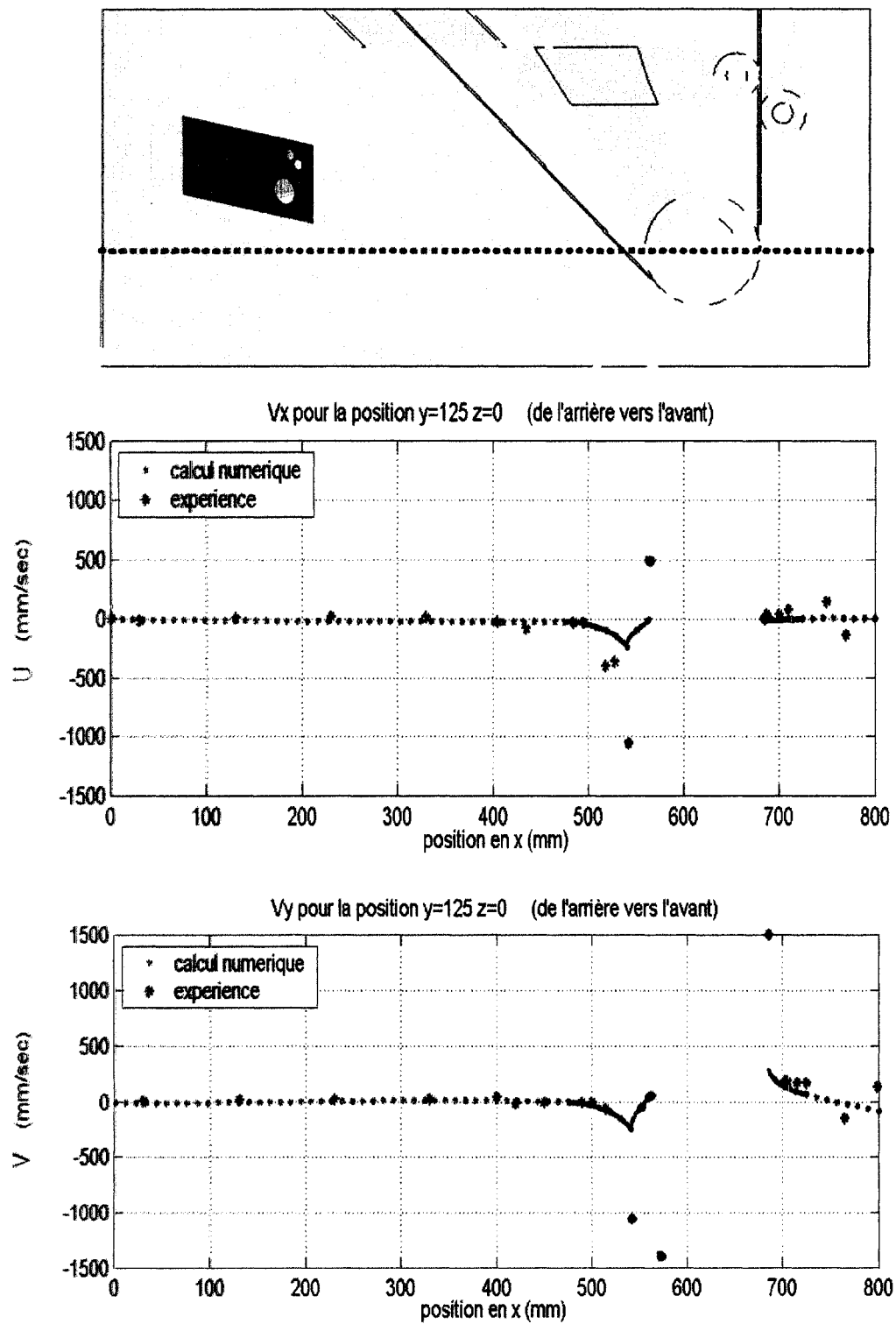


Figure 3.4 Comparaison des vitesses à la ligne $y = 125$ mm et $z = 0$ mm

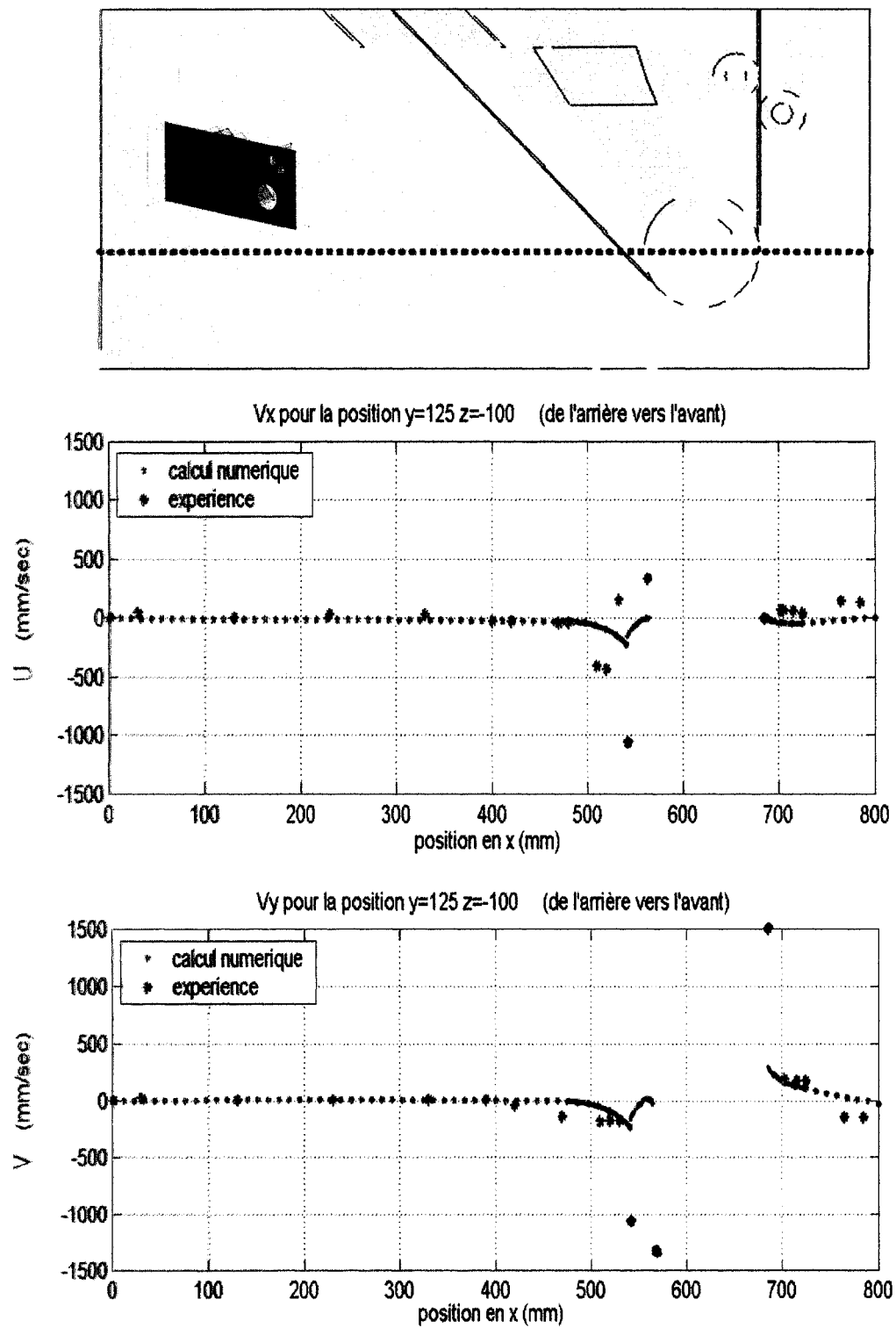


Figure 3.5 Comparaison des vitesses à la ligne $y = 125$ mm et $z = -100$ mm

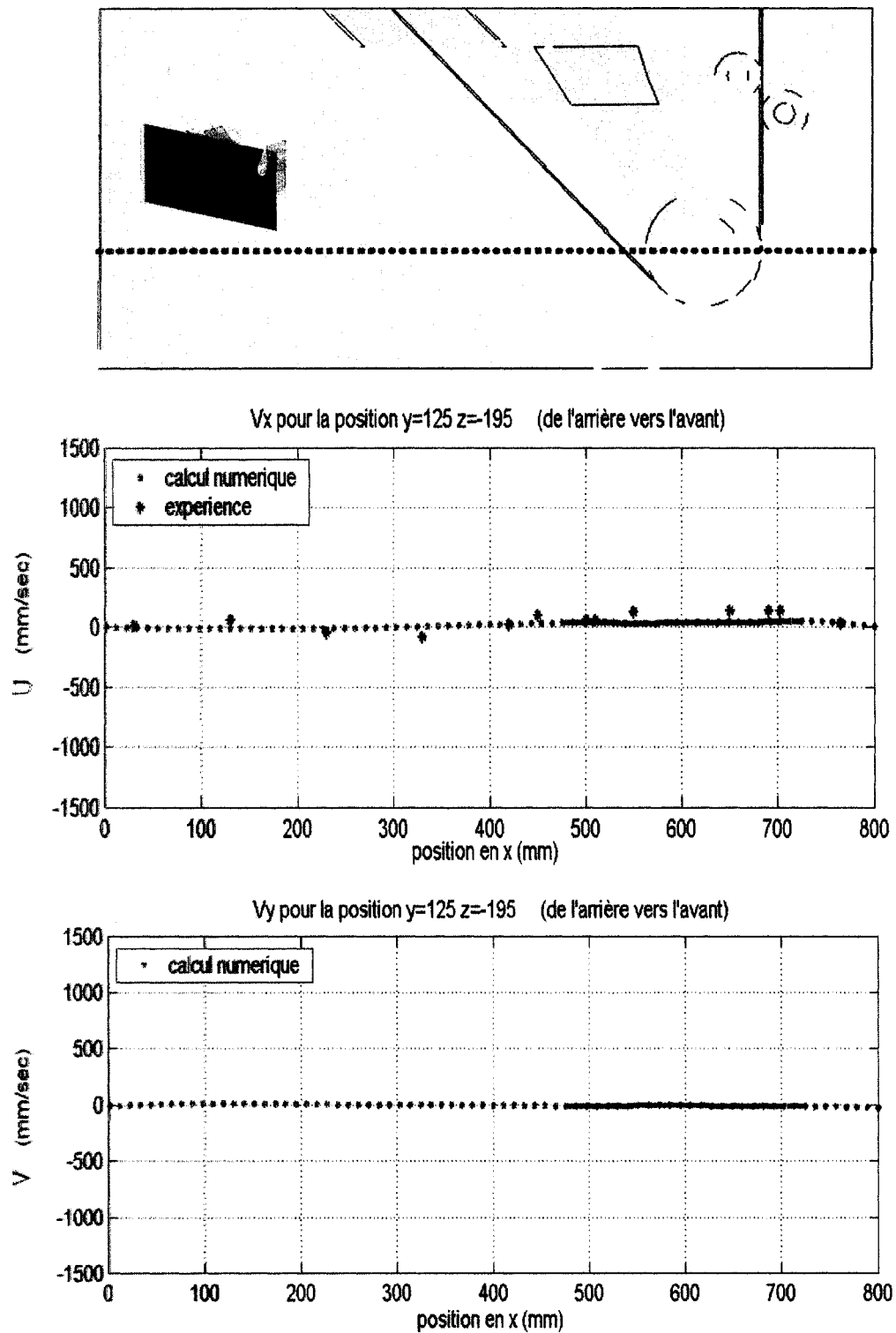


Figure 3.6 Comparaison des vitesses à la ligne $y = 125$ mm et $z = -195$ mm

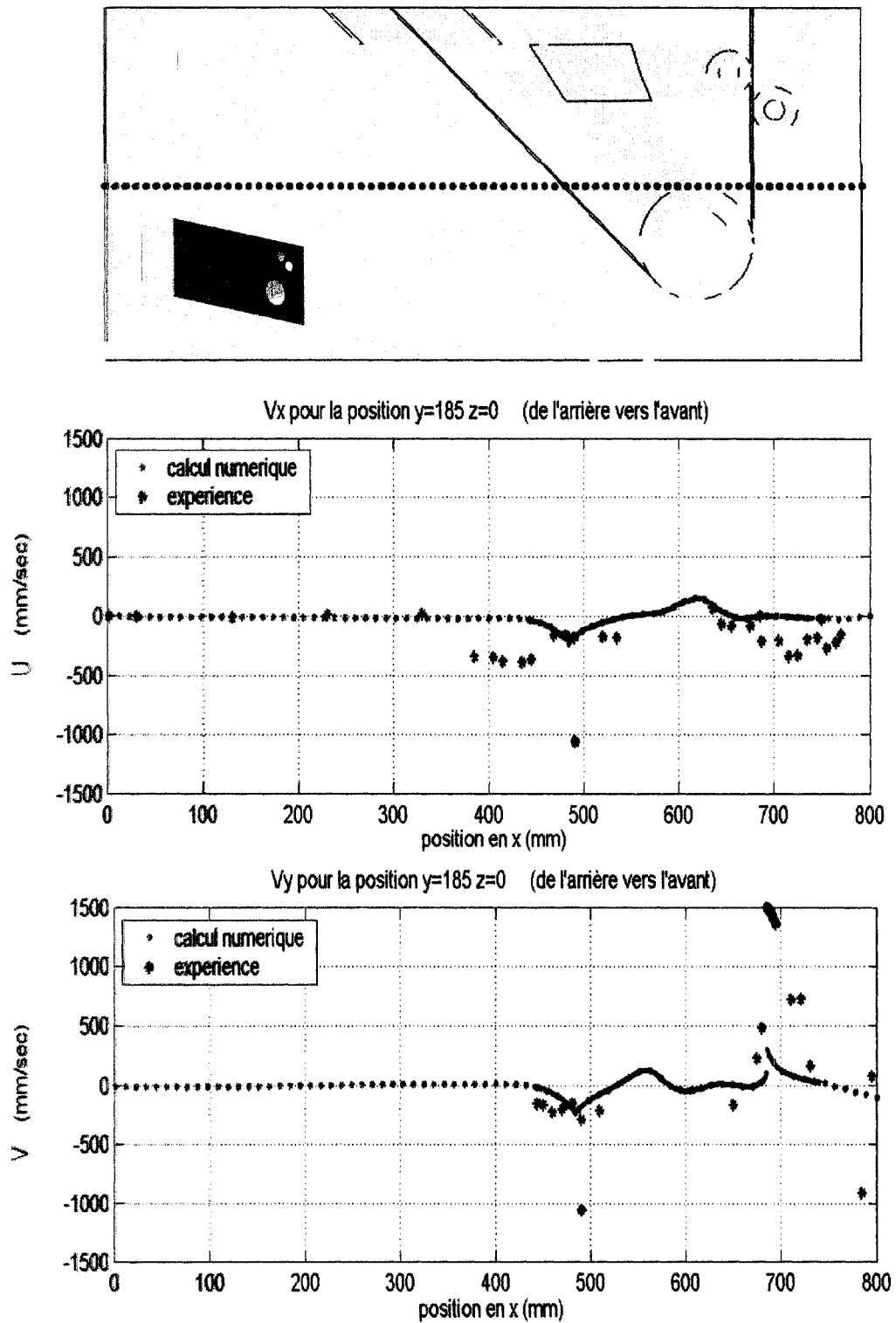


Figure 3.7 Comparaison des vitesses à la ligne $y = 185$ mm et $z = 0$ mm

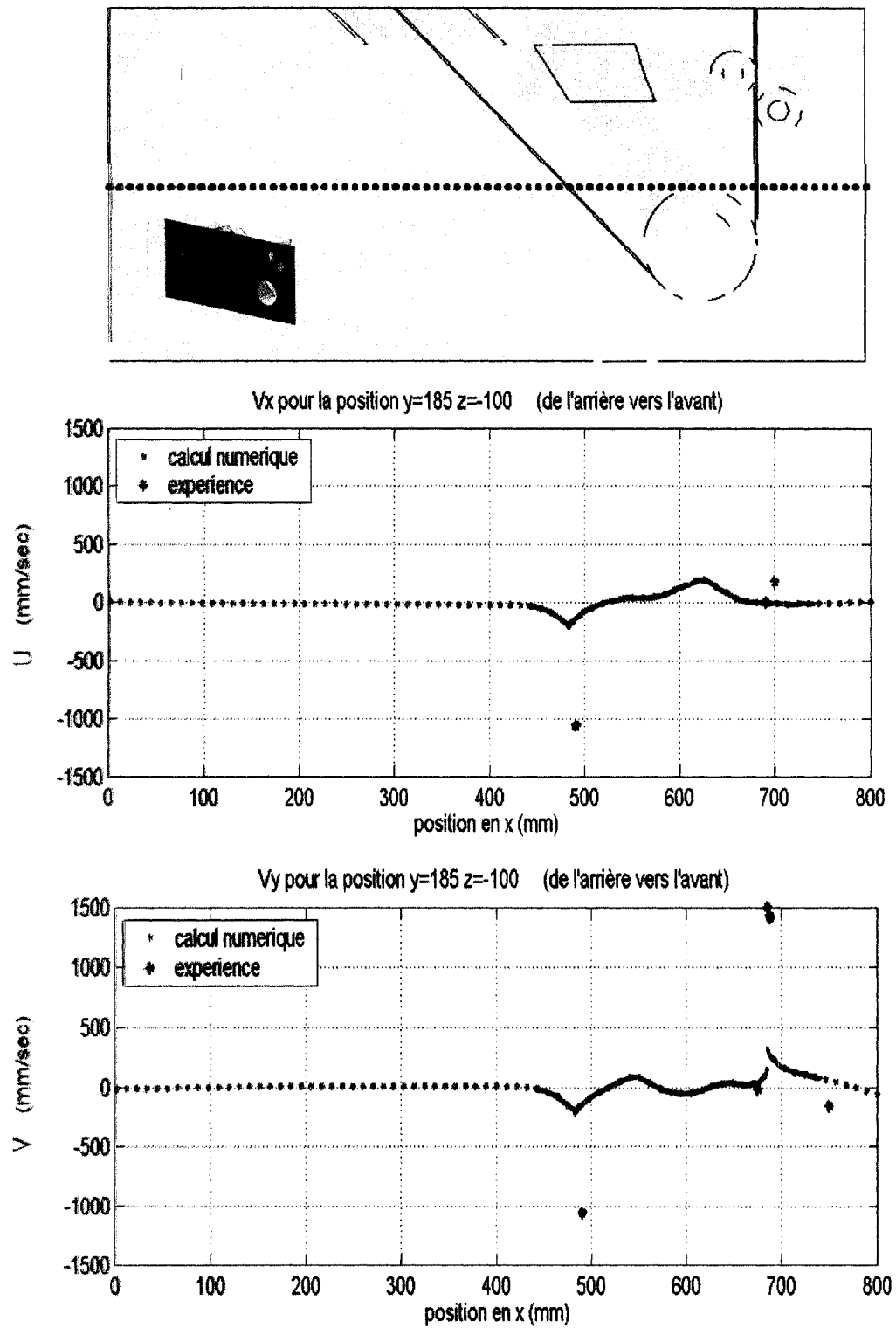


Figure 3.8 Comparaison des vitesses à la ligne $y = 185$ mm et $z = -100$ mm

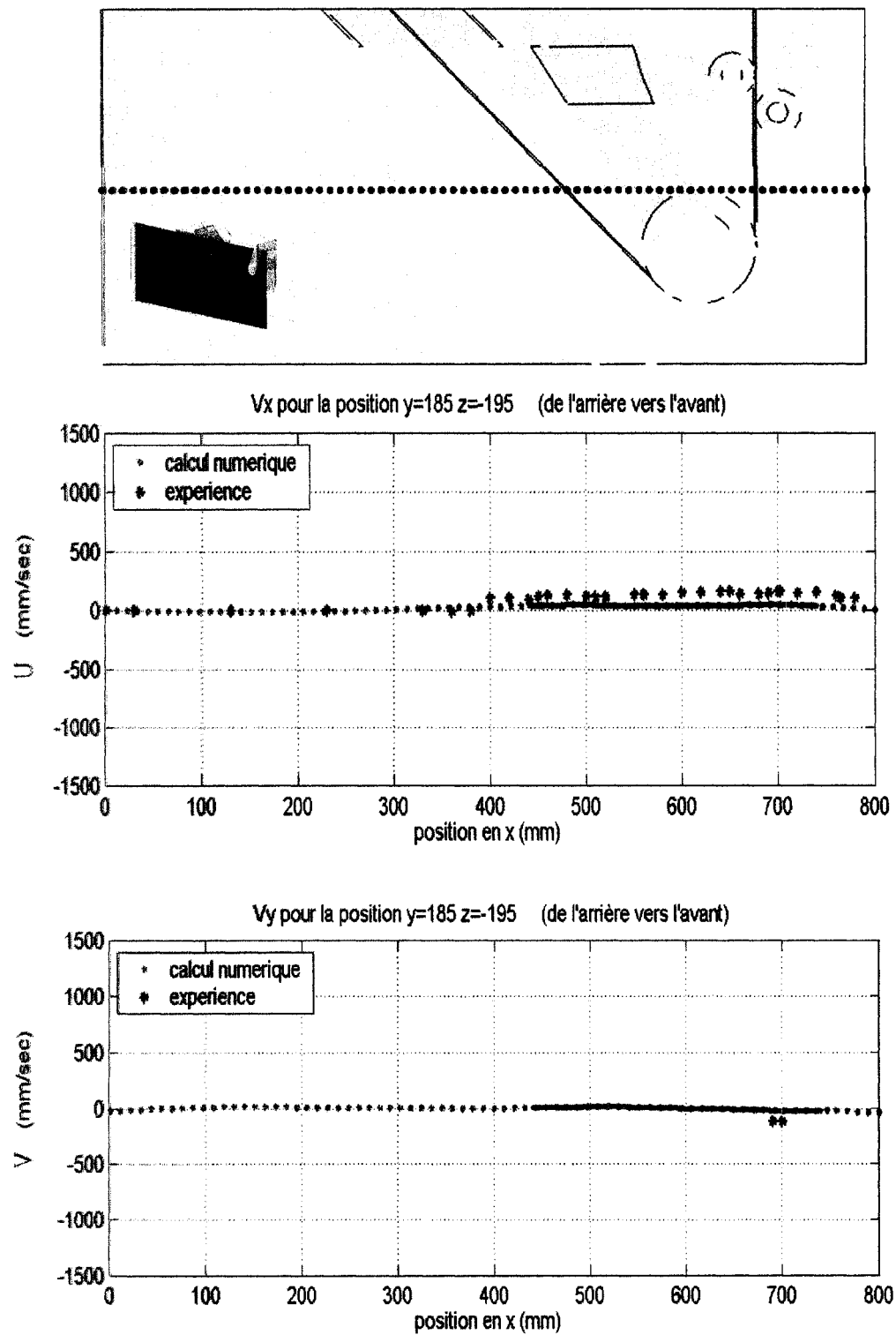
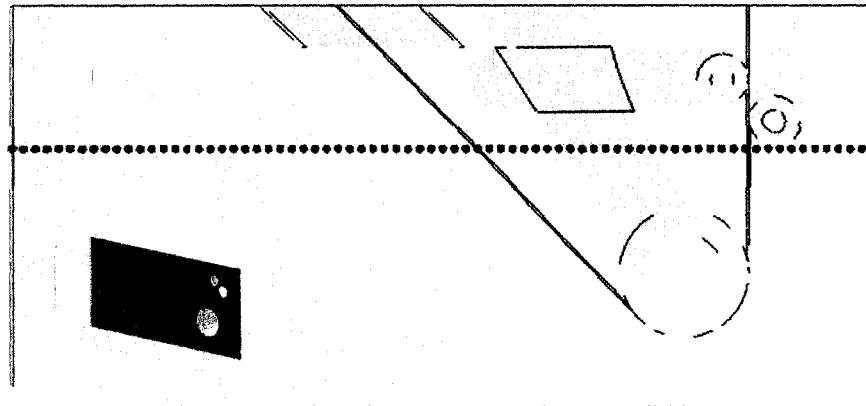
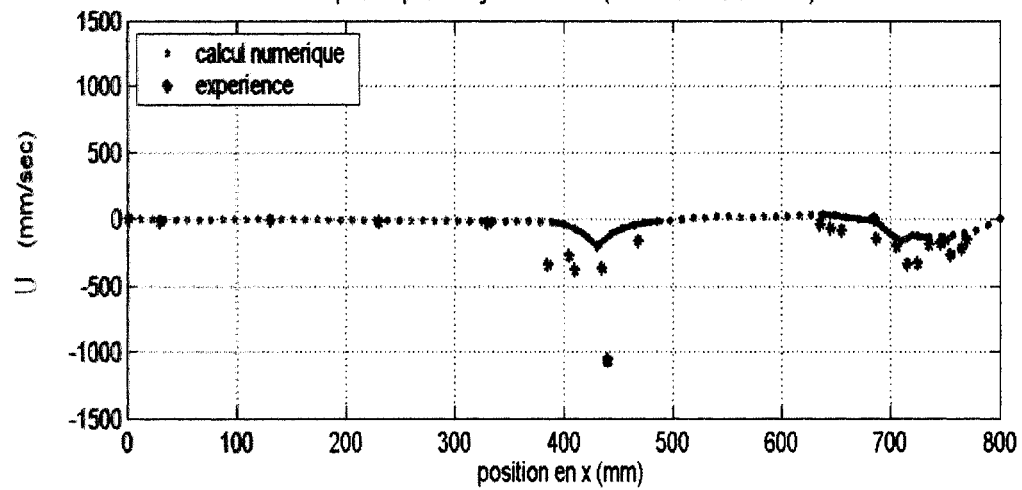


Figure 3.9 Comparaison des vitesses à la ligne $y = 185$ mm et $z = -195$ mm



Vx pour la position $y=240$ $z=0$ (de l'arrière vers l'avant)



Vy pour la position $y=240$ $z=0$ (de l'arrière vers l'avant)

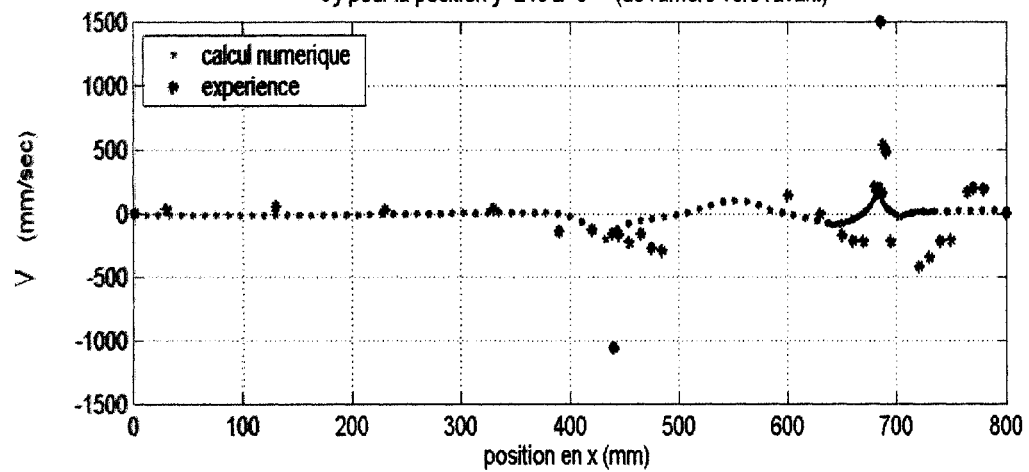


Figure 3.10 Comparaison des vitesses à la ligne $y = 240$ mm et $z = 0$ mm

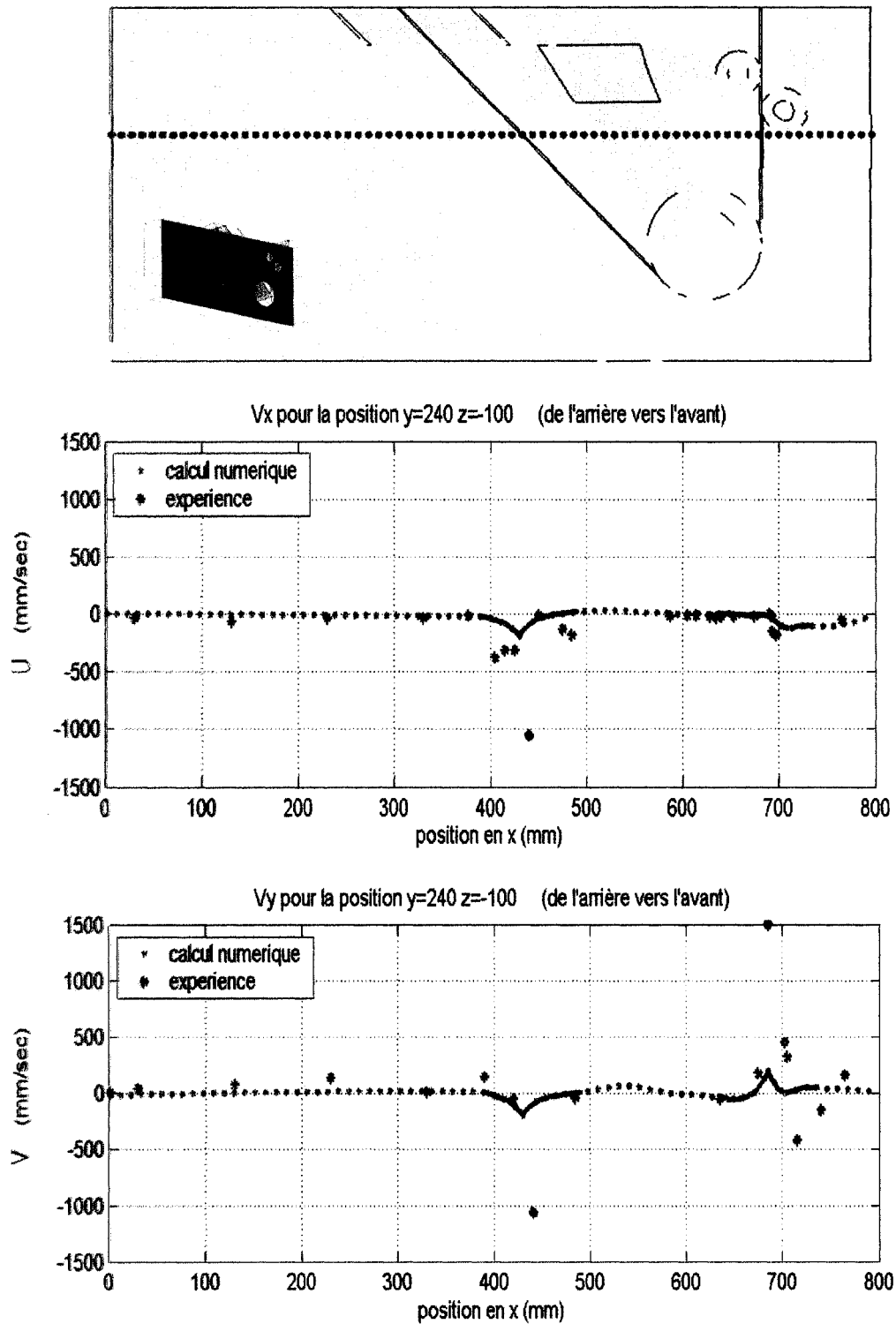


Figure 3.11 Comparaison des vitesses à la ligne $y = 240$ mm et $z = -100$ mm

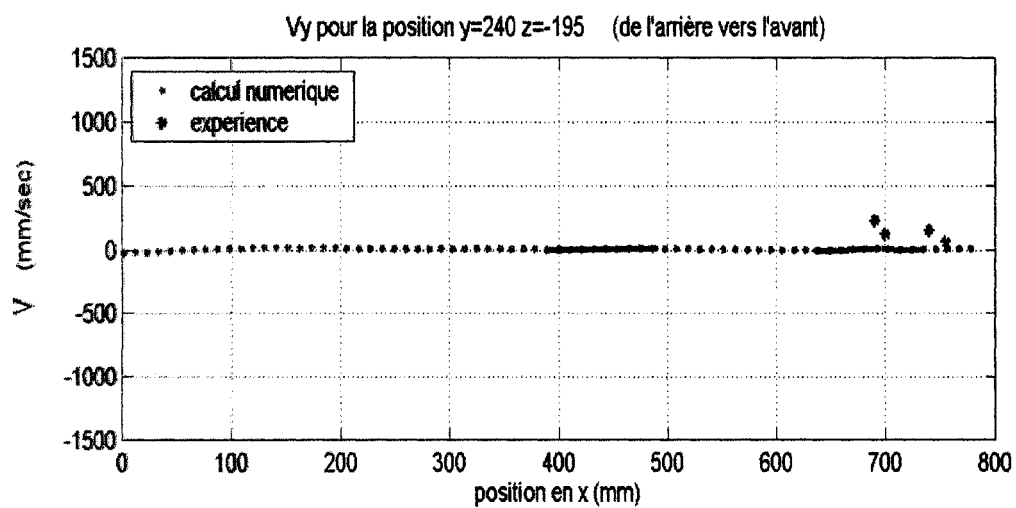
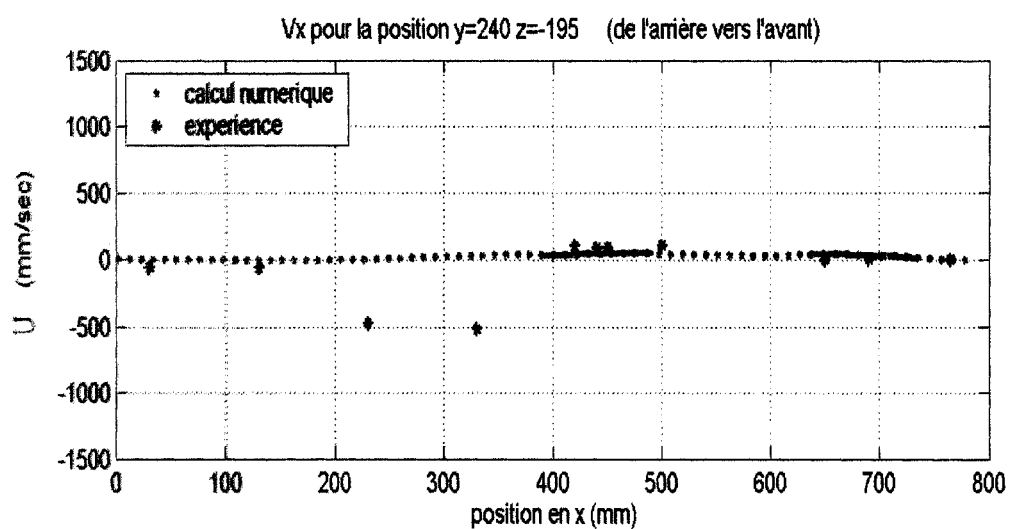
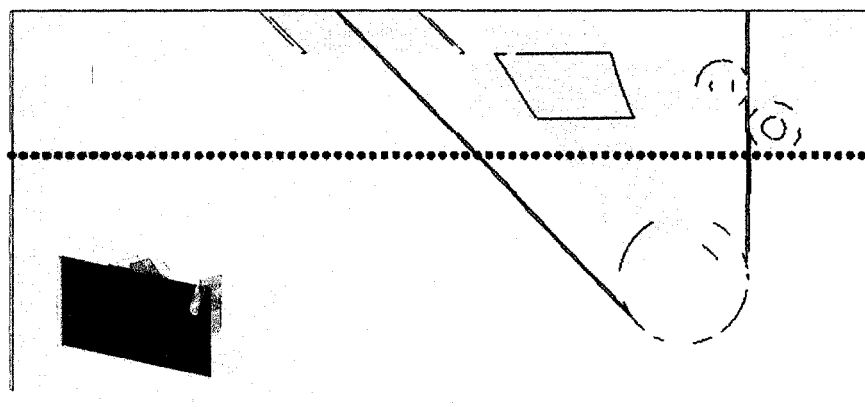


Figure 3.12 Comparaison des vitesses à la ligne $y = 240$ mm et $z = -195$ mm

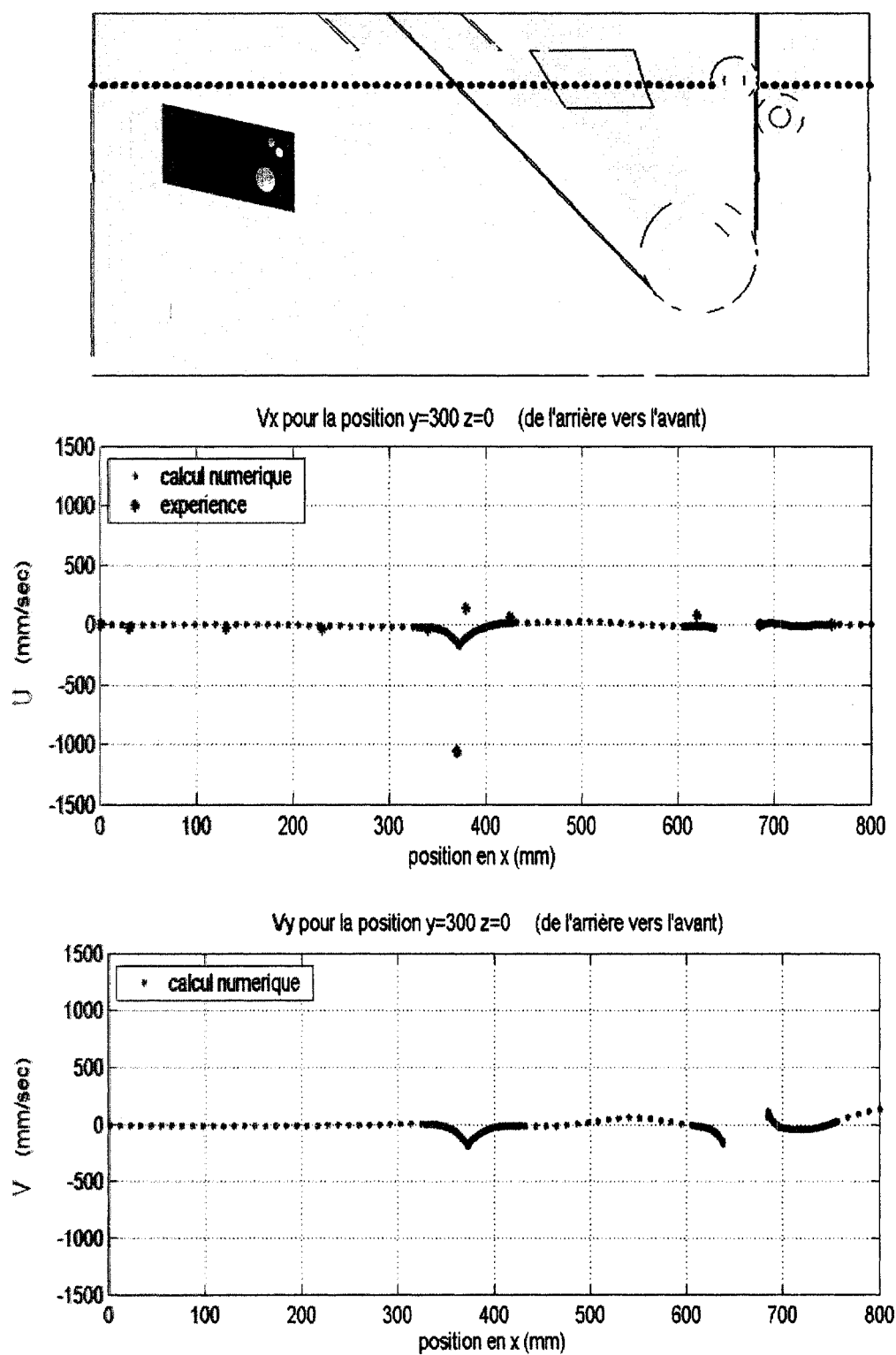


Figure 3.13 Comparaison des vitesses à la ligne $y = 300$ mm et $z = 0$ mm

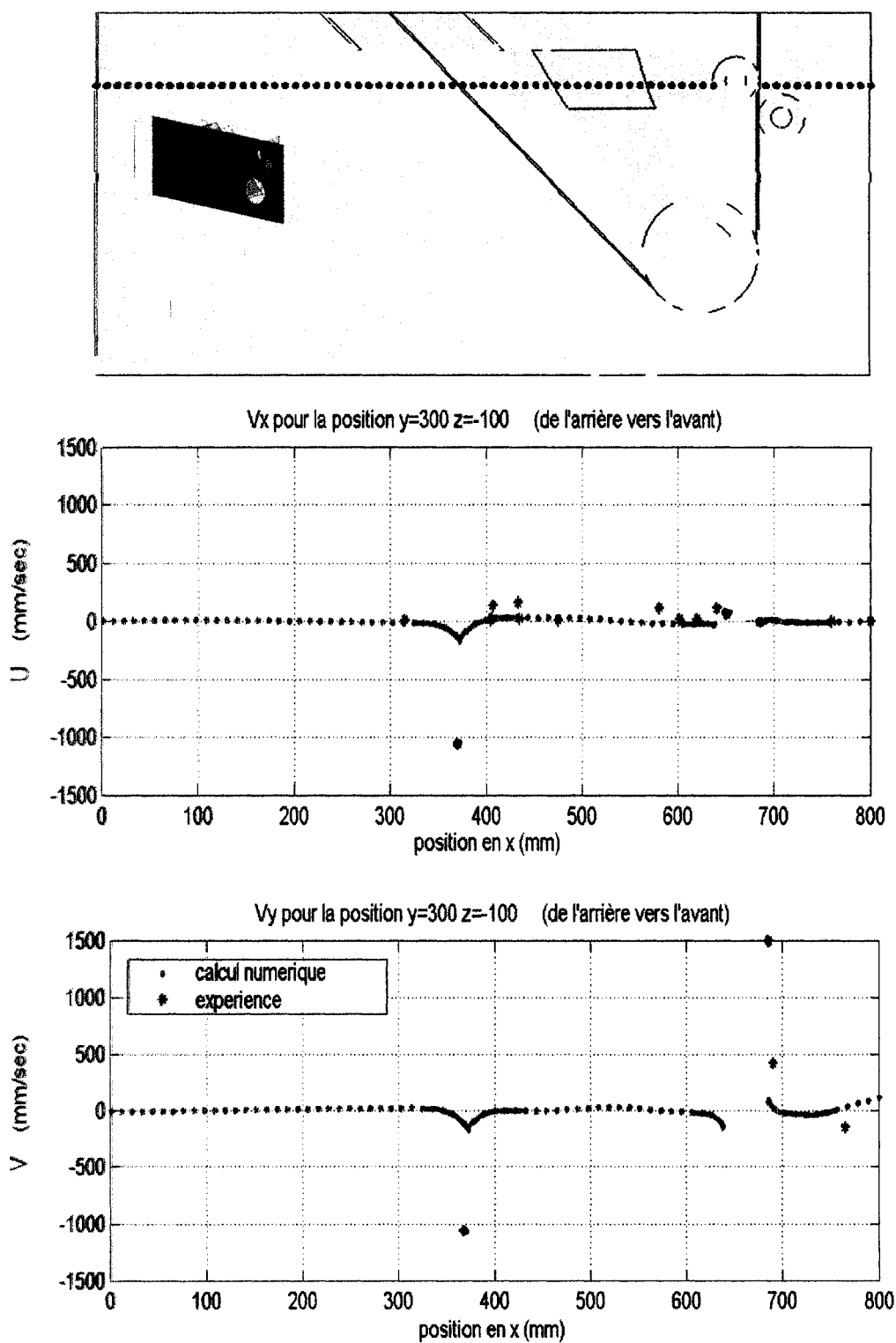


Figure 3.14 Comparaison des vitesses à la ligne $y = 300$ mm et $z = -100$ mm

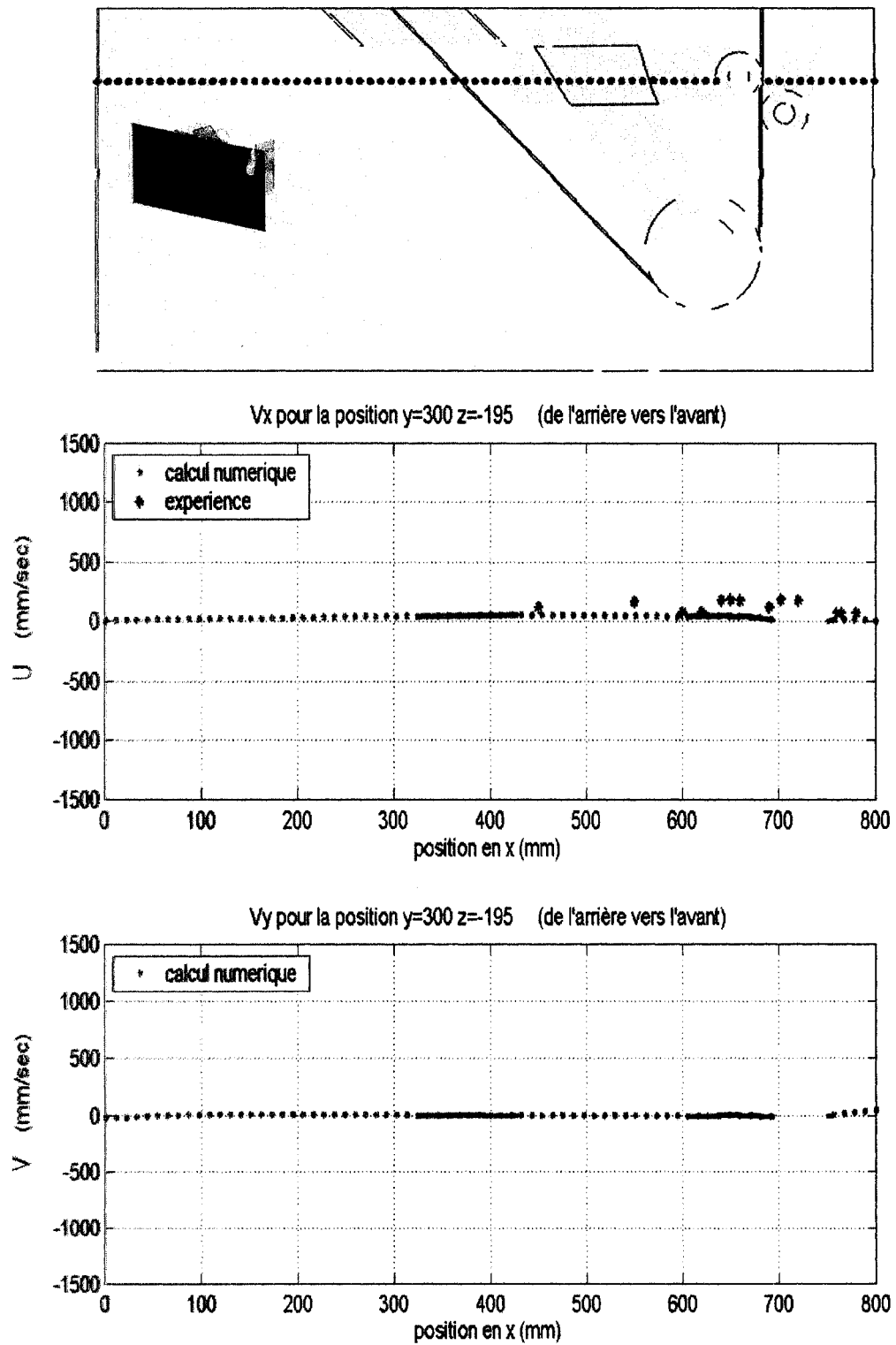


Figure 3.15 Comparaison des vitesses à la ligne $y = 300$ mm et $z = -195$ mm

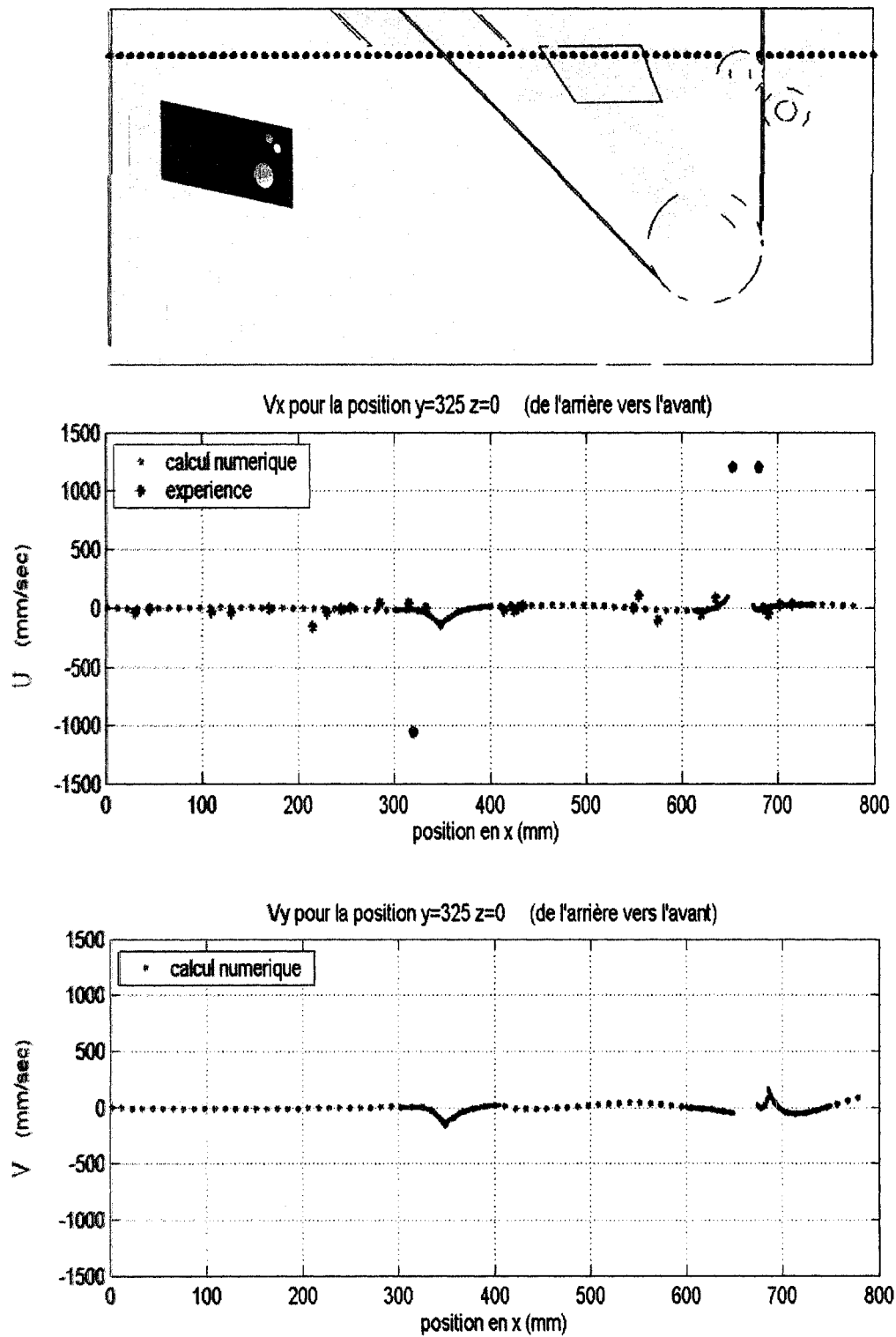


Figure 3.16 Comparaison des vitesses à la ligne $y = 325$ mm et $z = 0$ mm

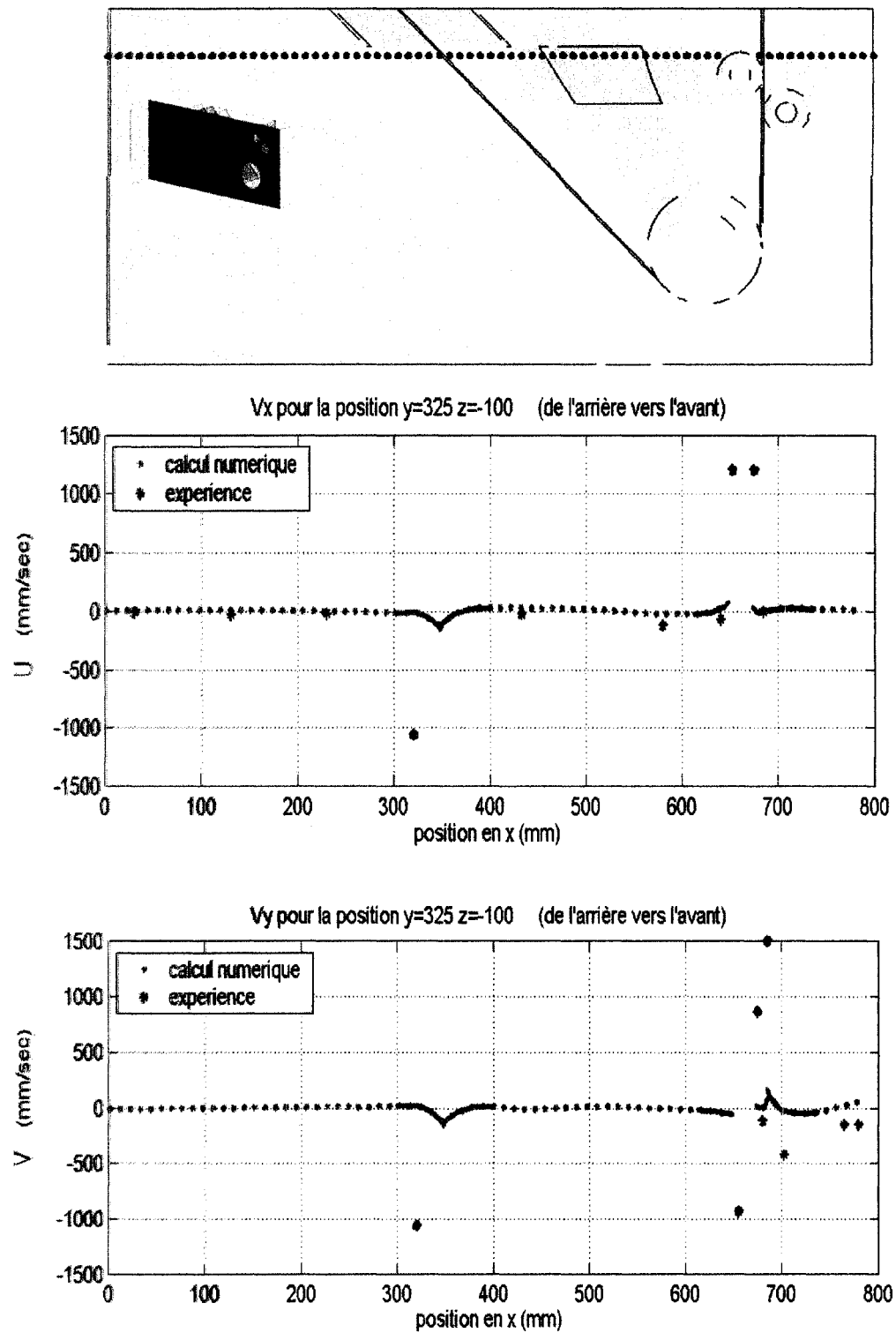


Figure 3.17 Comparaison des vitesses à la ligne $y = 325$ mm et $z = -100$ mm

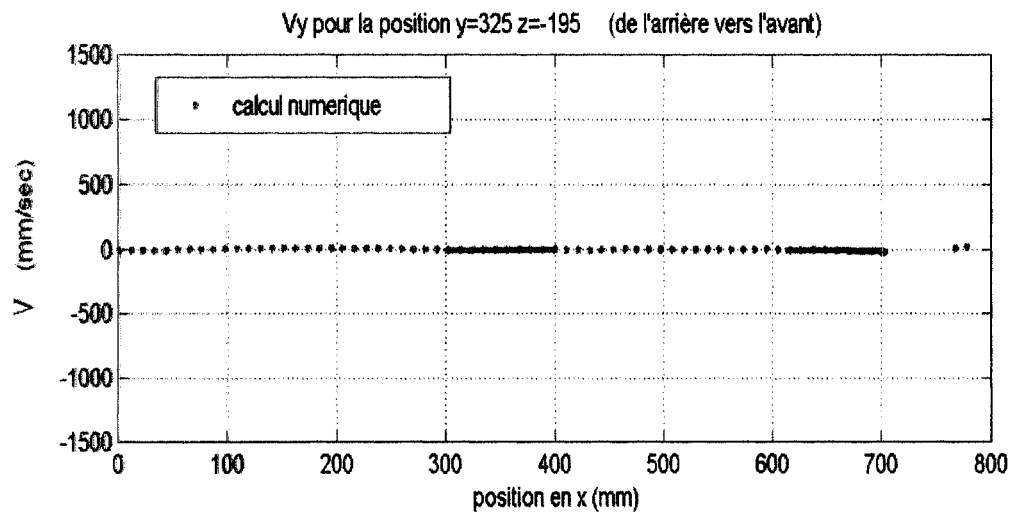
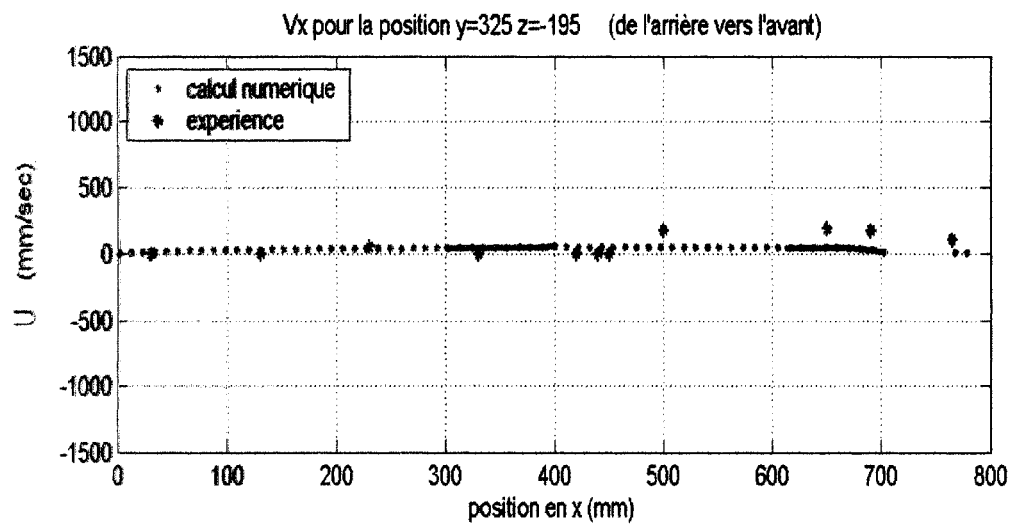
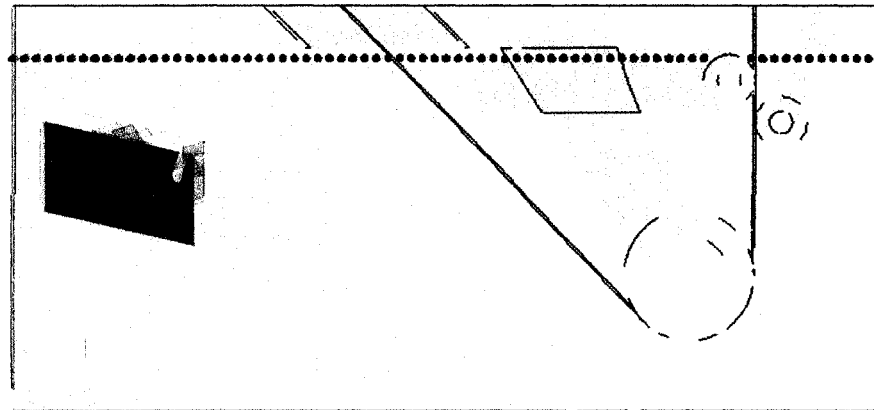


Figure 3.18 Comparaison des vitesses à la ligne $y = 325$ mm et $z = -195$ mm

il est difficile d'expliquer. La proximité de la surface peut avoir perturbé les mesures ou bien l'écoulement lui-même.

Pour $y = 125$ mm (figures 3.4 et 3.5), les valeurs expérimentales et numériques se rapprochent beaucoup. On peut toutefois noter une différence en certains points. Ces points, identifiés en vert, indiquent une valeur beaucoup plus grande pour les vitesses prises sur le modèle à eau comparé au résultat du calcul numérique. Ils semblent correspondre à la vitesse de la feuille ou de l'un des rouleaux directement. En effet, sur le plan de symétrie ($z=0$) et sur $z=-100$ mm, la vitesse de 1500 mm/sec est rapportée pour v (direction y). Selon leur position sur le schéma du bain en haut des deux pages, cette valeur correspond à la vitesse de la feuille. En raison de la présence de la loi de paroi dans le modèle numérique, la valeur de 1500 mm/sec donnée à la feuille ne sera jamais rapportée dans les fichiers de résultats. En effet, la première vitesse rapportée (celle le plus près de la feuille) n'est jamais celle de la surface en mouvement (feuille, rouleau) mais bien celle du premier noeud qui est calculée à partir des équations définies plus tôt (section 2.4) pour la loi de paroi. Pour cette dernière, la valeur de 4 mm est donnée à y ce qui permet de positionner y^+ au début de la couche logarithmique.

Malgré cette différence de vitesse à la surface des éléments en mouvement, on note, qu'expérimentalement, les valeurs tout près de la feuille ou du rouleau

se réajustent rapidement pour suivre la tendance des résultats numériques et s'y comparent très bien. Notons aussi que les résultats de simulation numérique montrent l'asymétrie des vitesses de part et d'autre de la feuille qui entre, ce qui n'est pas très évident à identifier avec les mesures expérimentales (figure 3.5). Pour $z = -195$ mm et $y = 125$ mm (figure 3.6), les vitesses numériques et expérimentales sont comparables.

Pour les figures 3.7 et 3.8 à $y = 185$ mm, la remarque précédente pour les vitesses des surfaces en mouvement est encore valable, et ce, toutes les fois où l'on traverse la feuille ou un rouleau. On remarque que, tout près de la feuille sur le plan $z=0$, les vitesses expérimentales se réajustent rapidement pour être similaires au résultat numérique. Pour u , les valeurs expérimentales rapportées sont beaucoup plus élevées à environ 30 mm avant l'entrée de la feuille et 40 mm après sa sortie. Par contre, les vitesses les plus près de la feuille sont très comparables. Il semble y avoir, dans le modèle à eau, un tourbillon relativement intense, mais qui, physiquement est difficile à expliquer, car les rouleaux stabilisateurs sont encore loin et pour l'entrée, il n'y a rien qui puisse perturber autant à cette distance.

Dans le graphique de v sur le plan de symétrie (figure 3.7), on note encore une différence, assez marquée cette fois, du profil de vitesse de part et d'autre de la feuille pour les valeurs numériques. Les valeurs expérimentales rapportées indiquent

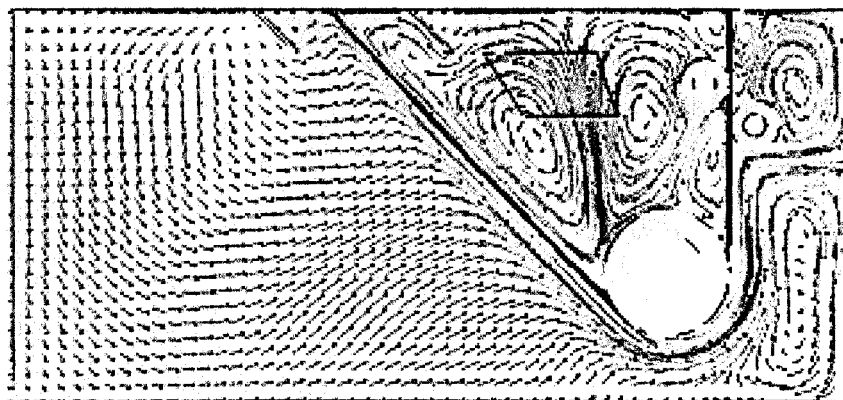
aussi cette asymétrie, ce qui valide cet aspect des résultats de la simulation numérique. La comparaison des valeurs sur le plan $z=-195$ mm (figure 3.9) indique une bonne représentation du modèle numérique.

De façon globale, les valeurs expérimentales et numériques pour la ligne à $y=240$ mm sont comparables (figures 3.10 et 3.11). En v , on remarque que les tourbillons semblent de plus forte intensité autour de la feuille qui sort. La proximité du rouleau peut avoir créé cet effet comme cela a été remarqué pour $y=60$ mm lorsque l'on se trouvait directement sous le rouleau. En $z = -195$ mm, près des parois latérales (figure 3.12), on remarque encore des vitesses expérimentales beaucoup plus élevées vers l'arrière du bain et qui sont difficilement explicables surtout qu'on ne les retrouve pas sur toutes les hauteurs mesurées.

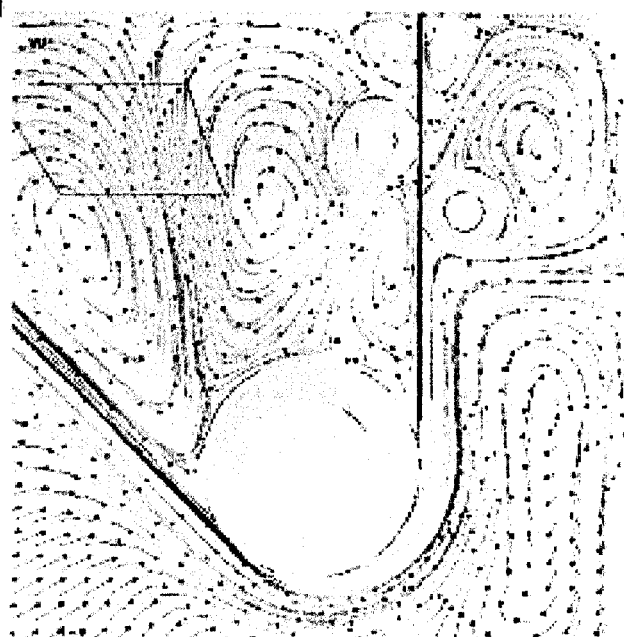
Pour tous les plans, les valeurs expérimentales disponibles concordent bien avec les valeurs numériques pour $y = 300$ mm (figures 3.13 à 3.15). Il en est de même pour $y = 325$ mm (figures 3.16 à 3.18). Mais dans ce cas, le décalage dû à la différence de configuration est plus marqué pour l'entrée de la feuille. Pour la zone située dans le V formé par la feuille, on remarque que, pour toutes les lignes étudiées, la grandeur et le sens des vitesses expérimentales semblent être bien représentés par le modèle numérique.

Le sens de l'écoulement est généralement le même du point de vue expérimental et numérique. Ainsi, même si certaines zones présentent un écart dans les valeurs, on peut voir que l'écoulement numérique représente bien l'écoulement observé dans le modèle à eau. Il y a seulement la zone près de la paroi avant où l'on peut quelques fois constater une divergence dans le sens de l'écoulement. Les figures 3.19, 3.20 et 3.21 montrent l'écoulement sur les plans $z=0$, $z=-100$ et $z=-195$ mm tel que calculé par le modèle numérique. Ainsi, tout le long de la paroi avant, on constate la présence de tourbillons due à l'écoulement de la feuille qui rencontre l'effet de l'écoulement du rouleau stabilisateur. La vitesse peut alors changer rapidement de direction sur une faible distance. De plus, les mesures expérimentales ne permettent pas de déduire l'écoulement à l'arrière du bain puisque les vitesses y sont très faibles. Avec la simulation numérique, par contre, il est possible de voir un patron d'écoulement différent sur les divers plans (figures 3.19 à 3.20).

Il est important de mentionner l'existence de certaines limites expérimentales qui ont pu aboutir à des erreurs. En effet, selon les expériences menées sur le modèle à eau avant l'amélioration des différentes composantes, la feuille se décentrait dramatiquement après un court laps de temps, soit environ 2 à 3 minutes selon le parallélisme des différents rouleaux avant le départ. Il était très difficile de stabiliser la feuille. La quantité de mesures prises n'était alors peut-être pas suffisante pour indiquer une tendance réelle dans les fluctuations (le tout avant que la feuille se



Vue de l'ensemble du bain



Agrandissement de la zone a l'avant du bain



Figure 3.19 Visualisation de l'écoulement sur le plan $z = 0$

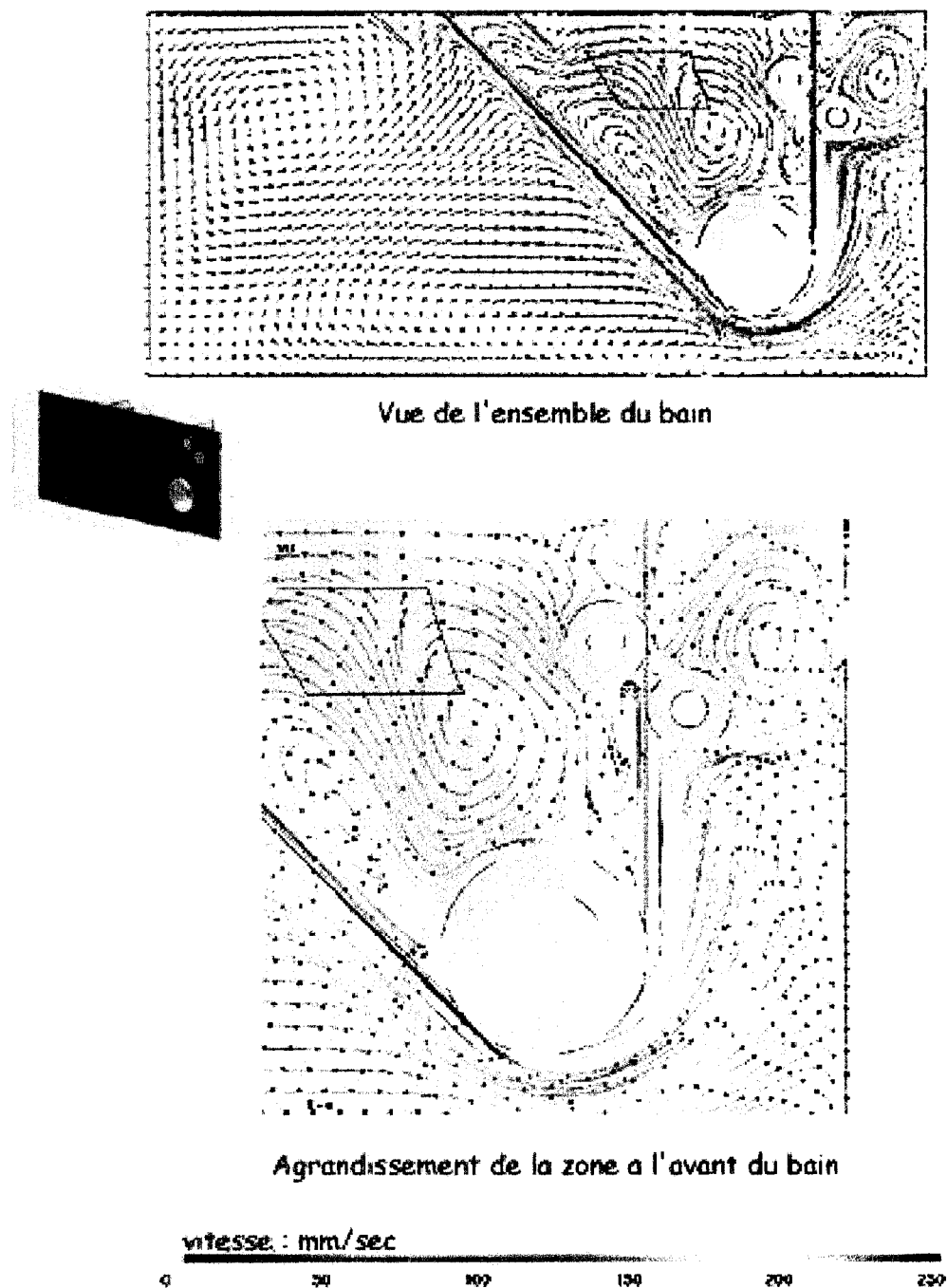
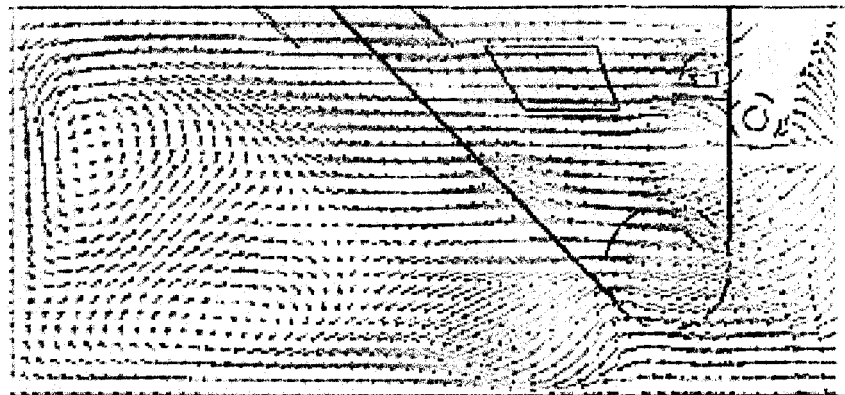
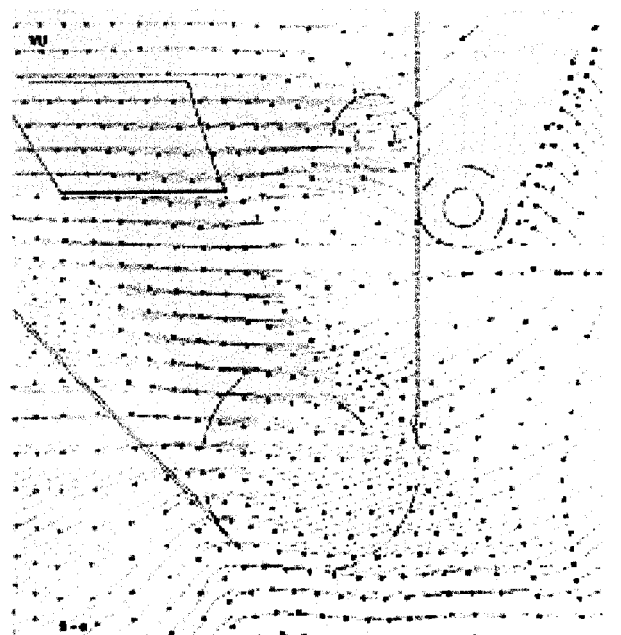


Figure 3.20 Visualisation de l'écoulement sur le plan $z = -100$



Vue de l'ensemble du bain



Agrandissement de la zone à l'avant du bain



Figure 3.21 Visualisation de l'écoulement sur le plan $z = -195$

décentre). La valeur moyenne peut alors être légèrement faussée par le manque de mesures, principalement lorsque l'on se retrouve dans une zone turbulente, soit près de la feuille (en dehors de la sous-couche visqueuse), dans la zone en V formée par la feuille et à l'avant du bain, plus on se rapproche du rouleau stabilisateur. De plus, certaines mesures ont probablement été prises alors que la feuille avait un mouvement dans la direction z . Aussi, étant donné que le procédé de mesure de vitesse au laser Doppler a été entrepris au tout début, la prise de mesure n'a peut-être pas été faite entièrement dans un régime permanent, comme c'est le cas pour les valeurs numériques rapportées. La figure 3.22 illustre les résultats d'un calcul en régime transitoire et l'on voit que l'état permanent est atteint après environ 3 minutes. La variation des mesures en transitoire représente le processus physique de stabilisation de l'écoulement. Donc si certaines mesures ont été prises pendant le régime transitoire, on voit que cela peut influencer les valeurs mesurées.

La figure 3.23 présente des graphiques illustrant des premiers résultats de mesure de vitesse obtenus avec la méthode de vélocimétrie par images de particules (Particle Image Velocimetry - PIV) utilisée pour des expériences en cours. On remarque notamment que les vitesses numériques se comparent davantage aux récents résultats avec le PIV qu'avec ceux obtenus par la technique de vélocimétrie par laser, notamment dans la figure 3.23a) lorsque l'on se retrouve sous le rouleau. À $y = 185$ mm, les tourbillons présents à l'entrée et à la sortie de la feuille, tels qu'observés

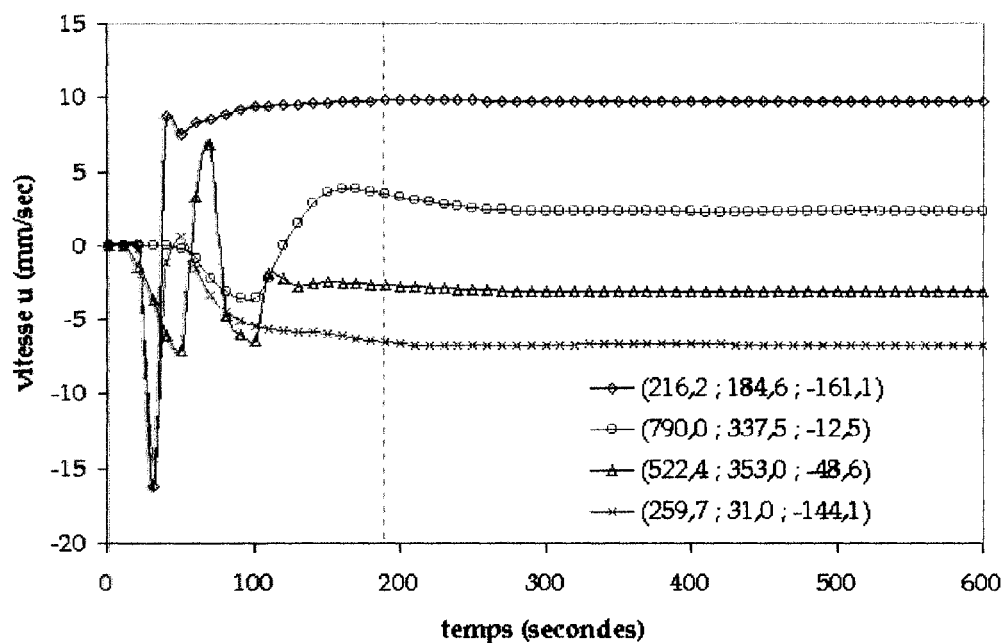


Figure 3.22 Vitesse en fonction du temps pour un calcul transitoire dans des conditions isothermes

avec les résultats de vélocimétrie laser, ne sont plus notés (figure 3.23b)). Pour ces nouvelles expériences, la feuille était beaucoup plus stable et les mesures ont été prises entièrement dans un état permanent. Ainsi, l'élimination des causes d'erreurs énumérées peut permettre de très bonnes comparaisons. De plus, les grandes vitesses observées le long de la paroi latérale pour certains y (figures 3.3 et 3.12) ne sont plus observées avec le PIV (figure 3.23c)).

Pour résumer ces observations tout en tenant compte des possibles erreurs expérimentales, on peut conclure que le modèle numérique simule bien l'écoulement observé dans le bain. Les zones critiques, soient celles tout près de la feuille ou des rouleaux en mouvement, sont généralement bien interprétées par le modèle

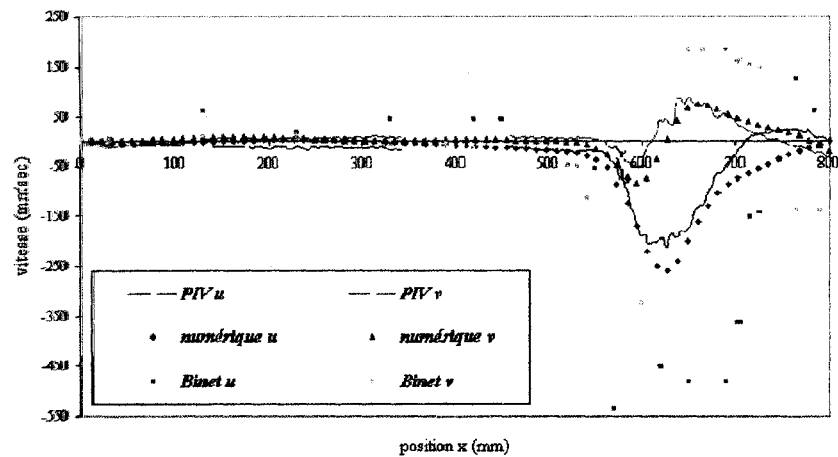
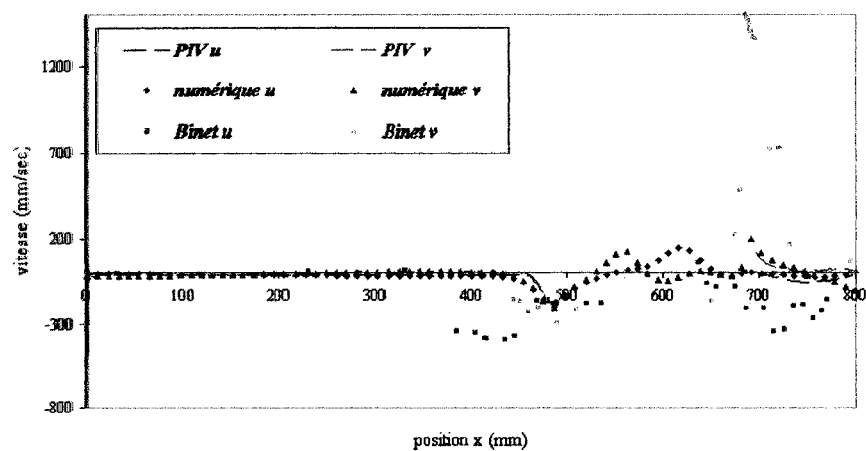
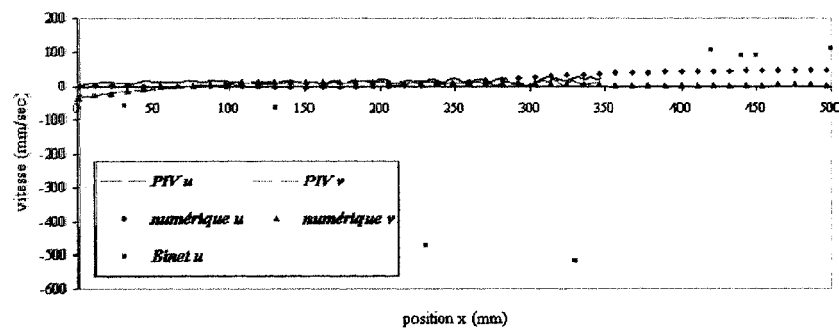
(a) Vitesse sur ligne $y=60$ et $z=-100$ (b) Vitesse sur ligne $y=185$ et $z=0$ (c) Vitesse sur ligne $y=240$ et $z=-195$ - section arrière du bain

Figure 3.23 Comparaison des résultats de vitesse de Binet (2000) avec le modèle numérique et des résultats préliminaires du PIV

numérique. La conformité entre les valeurs expérimentales et numériques permet d'avancer que le modèle de turbulence utilisé et la loi de paroi représentent bien la réalité du bain de galvanisation puisque de bons résultats sont obtenus dans tout le volume du bain. Étant donné que dans un système turbulent c'est la viscosité turbulente qui prédomine (par rapport à la viscosité laminaire) dans le calcul de la vitesse dès que l'on sort de la sous-couche visqueuse (figure 2.12), on peut comprendre que l'interprétation de la viscosité turbulente par le modèle $k - \epsilon$ est adéquate.

3.1.2 Analyse de la turbulence

Le projet de Binet rapporte certaines valeurs de turbulence qui peuvent être utilisées pour être comparées avec celles du modèle numérique. En quantifiant la turbulence, il est possible de vérifier directement si le calcul de cette dernière par le modèle $k - \epsilon$ représente bien la réalité. Les valeurs expérimentales rapportées dans le document de Binet concernent seulement u' et v' , la valeur w' n'est pas disponible. Selon le modèle de turbulence $k - \epsilon$ [Launder et Spalding, 1974], la valeur expérimentale associée à l'énergie de turbulence k est la moitié de la trace de la matrice τ^t , donc $\frac{1}{2}(\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2})$. Puisque seules les mesures du système en deux dimensions sont disponibles, il y aura une erreur sur la valeur expérimentale, mais une comparaison approximative peut néanmoins être établie (équation 3.1). Le tenseur de Reynolds

(équation 3.2) étant représentatif de la turbulence, il sera aussi utilisé pour la comparaison [Durbin et Pettersson Reif, 2000]. Ainsi :

$$\frac{1}{2}(\overline{u'^2} + \overline{v'^2}) = k \quad (3.1)$$

$$-\rho \overline{u'v'} = \mu_T \left(\frac{du}{dy} + \frac{dv}{dx} \right) \quad (3.2)$$

Les figures 3.24 à 3.27 montrent la comparaison des valeurs de turbulence pour les positions étudiées. On remarque premièrement que la turbulence est très faible à l'arrière du bain pour devenir plus importante lorsque l'on s'approche de la feuille ou des rouleaux en mouvement. Pour toutes les positions, la valeur du k expérimental suit approximativement la même tendance que celle calculée par le modèle numérique, mais avec une plus faible amplitude. Notons qu'il manque la valeur du $\overline{w'^2}$ et que cela peut influencer la grandeur exacte de la valeur de k . Pour le tenseur de Reynolds, par contre, les similitudes sont difficiles à établir. Loin de la feuille, on ne lit qu'une faible turbulence dans les deux cas. Près de la feuille toutefois, les valeurs n'ont pas vraiment de similitude. De plus, les valeurs expérimentales ne sont que positives, ce qui n'est pas le cas pour les valeurs numériques. En fait, seule la viscosité se doit d'être positive, pour le reste, les dérivées des vitesses (ou fluctuations expérimentales) peuvent aller dans les deux sens.

Près de la feuille, les valeurs de la turbulence telle que calculées par le modèle numérique sont plus grandes que les valeurs expérimentales, ce qui est contraire à ce qui a été généralement observé pour les grandeurs des vitesses. La méthode de vélocimétrie laser peut être mise en doute quant à sa sensibilité face aux mesures de la fluctuation de la vitesse. De plus, les erreurs évoquées précédemment en ce qui concerne la non-stabilité de la feuille sont à considérer dans le cas des mesures des facteurs de turbulence expérimentales. Ces causes d'erreurs prennent plus d'importance ici et influencent les valeurs de turbulence calculées puisqu'elles concernent directement les fluctuations. La turbulence est une notion physique très sensible et les perturbations physiques apportent une grande influence sur leur mesure.

Encore ici, il est possible de montrer quelques résultats d'expériences en cours réalisées avec la méthode du PIV où l'on voit que le facteur de Reynolds numérique se compare à celui expérimental (figures 3.28a) et 3.29a)) même s'il y a beaucoup d'instabilité, principalement dans la région sous le rouleau principal (figure 3.28a). La valeur de l'énergie cinétique turbulente k est comparable pour les deux méthodes expérimentales, mais est inférieure à celle calculée analytiquement. L'absence de la valeur w' est probablement une cause de cette différence d'amplitude.

Dans ce cas de la comparaison de la turbulence, le modèle numérique ne représente

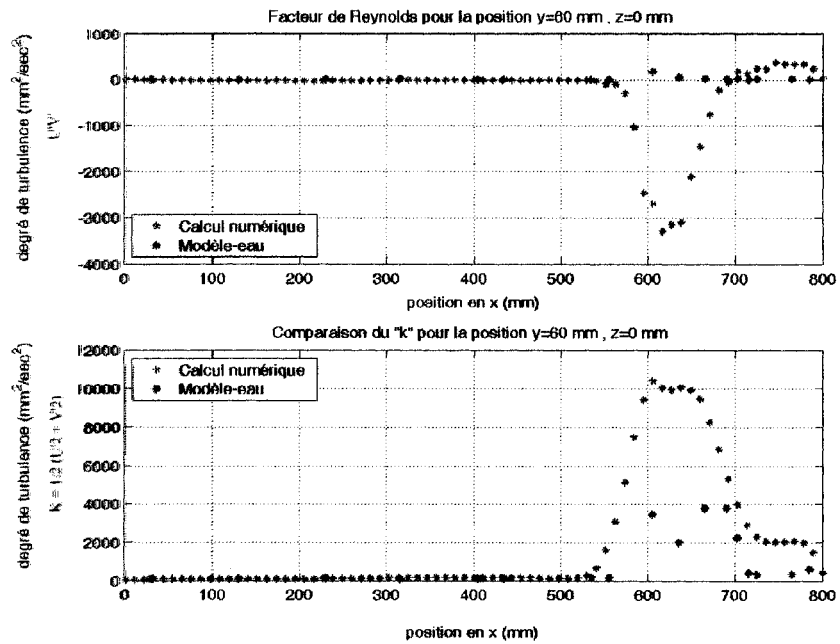


Figure 3.24 Comparaison de la turbulence à la ligne $z=0$ mm à $y=60$ mm

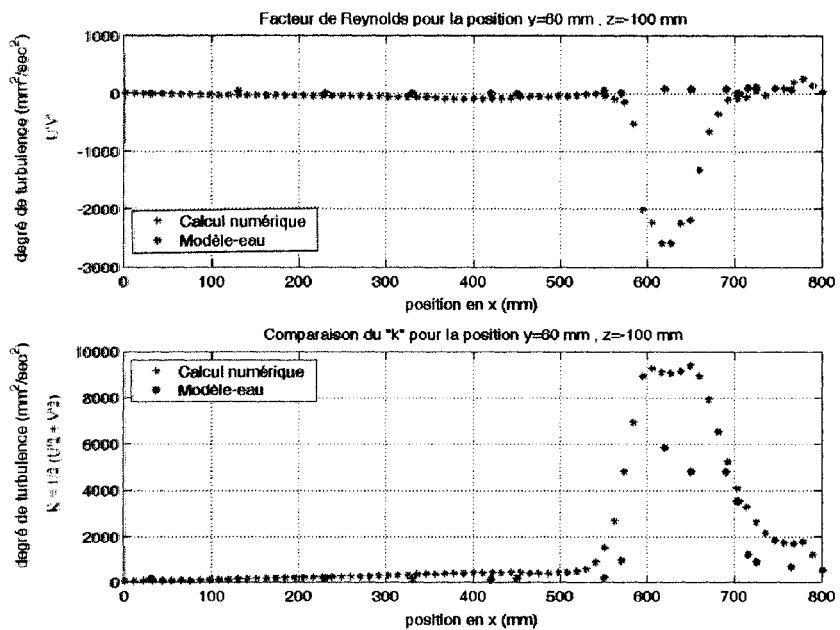


Figure 3.25 Comparaison de la turbulence à la ligne $z=-100$ mm à $y=60$ mm

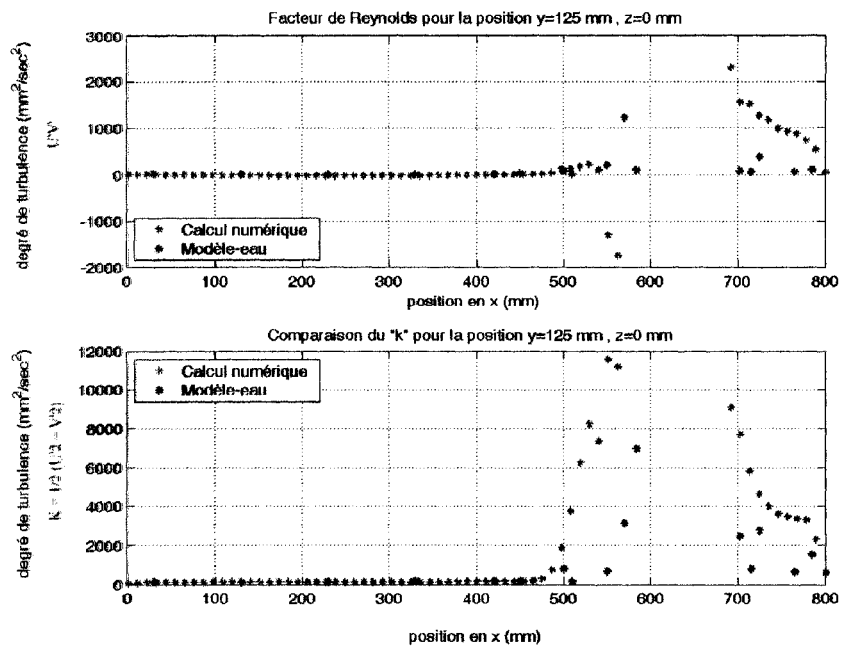


Figure 3.26 Comparaison de la turbulence à la ligne $z=0$ mm à $y=125$ mm

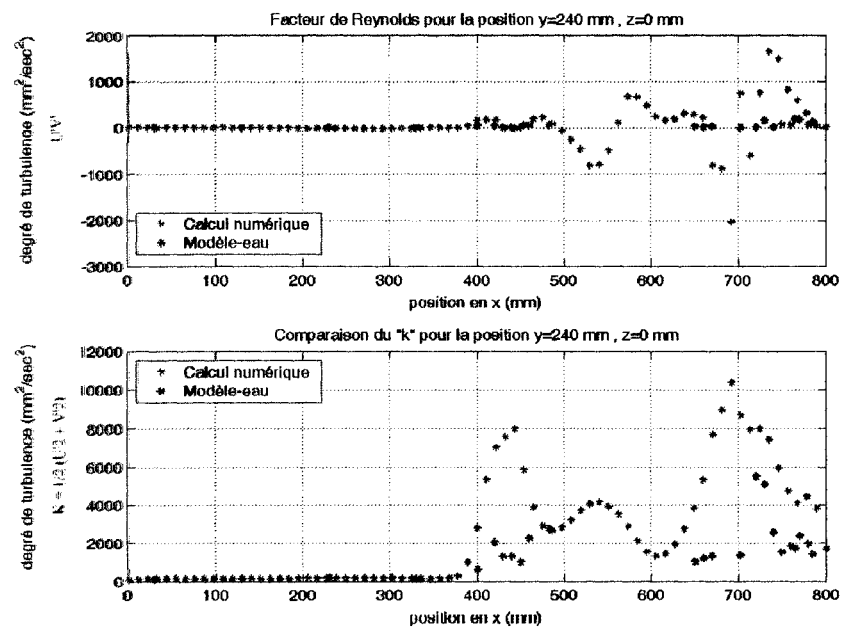
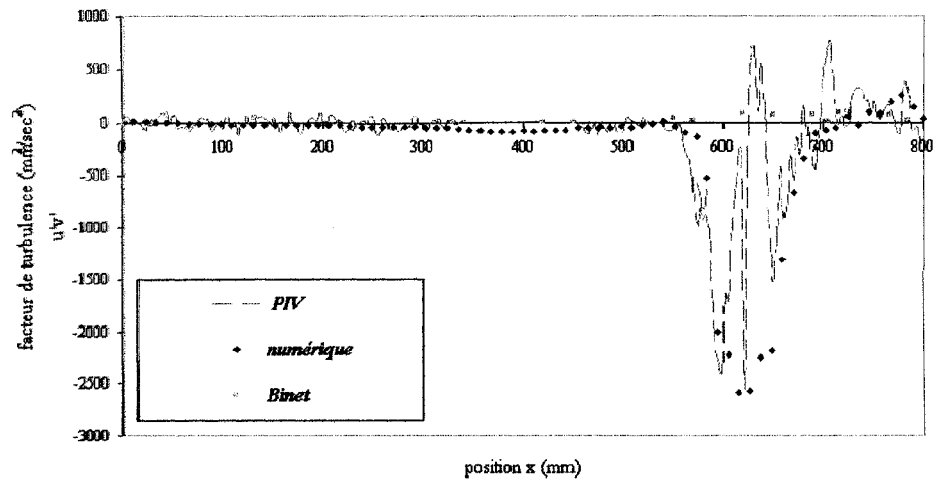
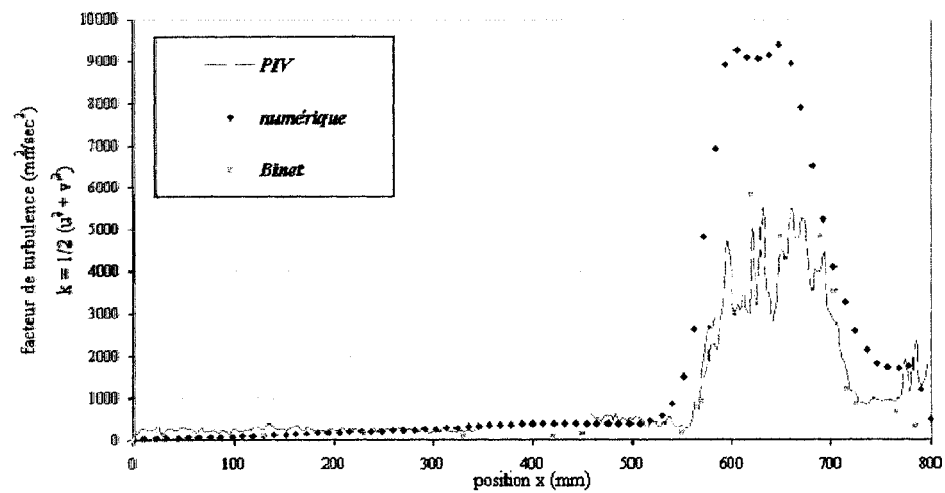


Figure 3.27 Comparaison de la turbulence à la ligne $z=0$ mm à $y=240$ mm

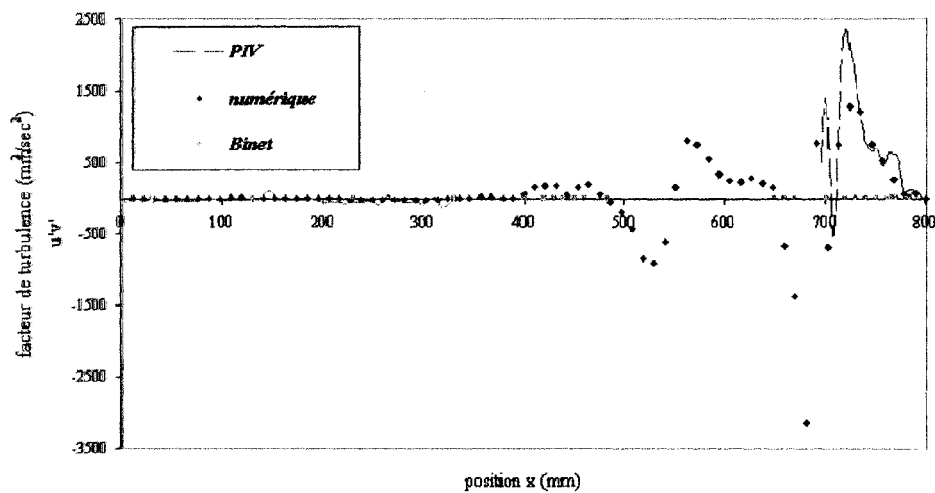


(a) Facteur de Reynolds $u'v'$ pour $y=60$ et $z=-100$

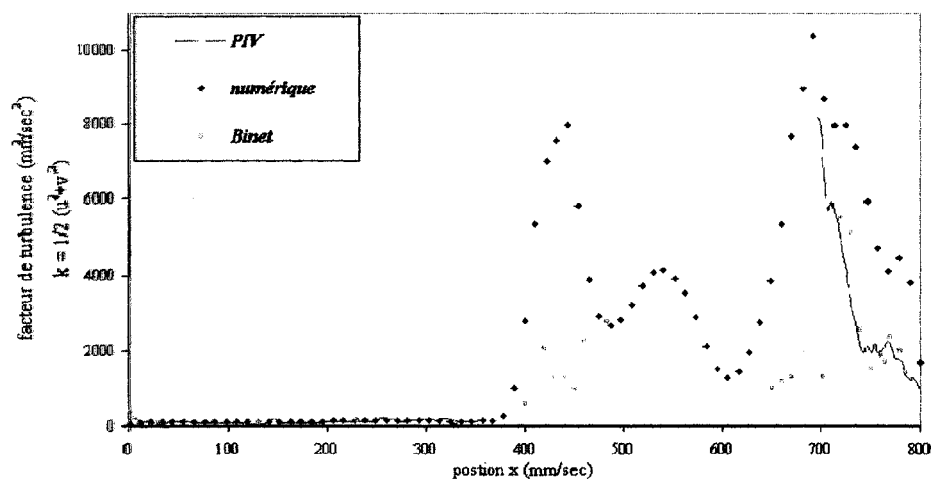


(b) k pour $y=60$ et $z=-100$

Figure 3.28 Comparaison des résultats de Binet (2000) avec le modèle numérique et des résultats préliminaires du PIV pour $y=60$ et $z=-100$



(a) Facteur de Reynolds $u'v'$ pour $y=240$ et $z=0$



(b) k pour $y=240$ et $z=0$

Figure 3.29 Comparaison des résultats de Binet (2000) avec le modèle numérique et des résultats préliminaires du PIV pour $y=240$ et $z=0$

pas tout à fait les lectures expérimentales prises avec la technique de vélocimétrie par laser, surtout en ce qui concerne le facteur de Reynolds. Étant donné l'ambiguïté des mesures, il est difficile de conclure en la non-conformité du modèle de turbulence dans le modèle numérique surtout que l'écoulement se compare généralement bien et que la méthode du PIV a permis d'obtenir des résultats semblables aux résultats numériques. Si l'on se réfère seulement à la comparaison des vitesses, il semble que le modèle numérique avec son modèle de turbulence représente relativement bien l'écoulement présent dans le bain de galvanisation.

3.2 Validation de la distribution de température

Un graphique est présenté pour toutes les positions de thermocouple étudiées. Sur chacun d'eux, il est possible d'y voir :

- **Les résultats expérimentaux**

(1 à 6 selon la position)- Ils sont identifiés par le numéro de l'expérience (tableau 2.1).

- **Les résultats de la simulation du calcul #1**

(eau à 29,9 ° C, air ambiant à 26,8 ° C et lingot intérieur à 9 ° C) - résolu avec 1 et 3 itérations globales à chaque pas de temps de 10 secondes.

- **Les résultats de la simulation du calcul #2**

(eau à 29,9 ° C, air ambiant à 26,8 ° C et lingot intérieur à 10 ° C) - résolu avec 1 itération à chaque pas de temps de 10 secondes.

– **Les résultats de la simulation du calcul #3**

(eau à 31,3 ° C, air ambiant à 28,5 ° C et lingot intérieur à 9 ° C) - résolu avec 1 itération à chaque pas de temps de 10 secondes.

– **Les résultats de la simulation du calcul #4**

(eau à 30,6 ° C, air ambiant à 28,5 ° C et lingot extérieur à 14 ° C) - résolu avec 1 itération à chaque pas de temps de 10 secondes.

Le choix du pas de temps de 10 secondes oblige 1000 solutions pour 10 000 secondes (2 heures 46 minutes) de simulation. Étant donnée la variation de température rapide du début, un pas de temps supérieur pourrait fausser la solution et mal interpréter la variation de température du début. Toute la courbe de la variation de température serait alors déphasée. Des tests ont d'ailleurs montré cet effet et le pas de temps de 10 secondes permet plus de précision.

Toutes les simulations sont effectuées en régime transitoire. Les variations de température calculées et mesurées sont représentatives de l'évolution de la température à une position donnée et sont reliées au transfert thermique dans le bain. Comme expliqué précédemment dans les sections 2.3.2 et 2.4, l'intérêt de faire plusieurs simulations différentes est justifié par les conditions thermiques expérimentales qui varient d'une expérience à l'autre. En raison de l'imprécision de la température exacte à la surface du bloc simulant le lingot (figure 2.7 et 2.8), des températures

de lingot différentes ont été aussi imposées. Il avait été souligné que les expériences 4, 5 et 6 se rapprocheraient du calcul à 14 ° C étant donné l'ajout d'un isolant par la présence de bulles d'air et que les autres se situeraient autour du 9 ° C ou 10 ° C (tableau 2.5).

Pour chacune des courbes expérimentales sur les graphiques, deux valeurs de ΔT sont données entre crochets. La première correspond à celle lue directement sur la courbe du graphique. Quant à la seconde, elle représente la différence de température entre l'instant juste avant l'expérience et celui juste après. Ce dernier ΔT n'englobe pas l'interférence du moteur (section 2.3.2) et représente une bonne référence pour vérifier l'exactitude de la courbe expérimentale.

Si l'on se concentre sur les différentes positions étudiées et la similitude entre les variations de températures expérimentales et numériques, on peut séparer le bain en 4 zones (figure 3.30).

La zone A (figures 3.31 à 3.35) est celle regroupant les points près de la feuille où l'on constate une grande instabilité des données expérimentales. Cette zone est située loin du lingot et inclut des thermocouples à l'intérieur et à l'extérieur du V formée par la feuille, près et plus éloignés de la surface. Lorsque l'on s'attarde à la différence entre les 2 ΔT mesurés expérimentalement, on constate qu'il y

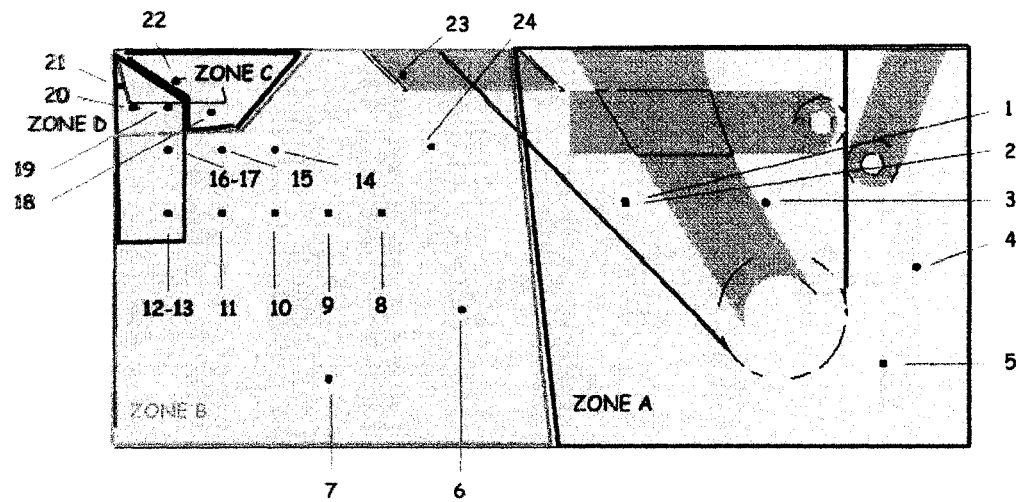


Figure 3.30 Division du bain en zones pour analyse des résultats du transfert thermique

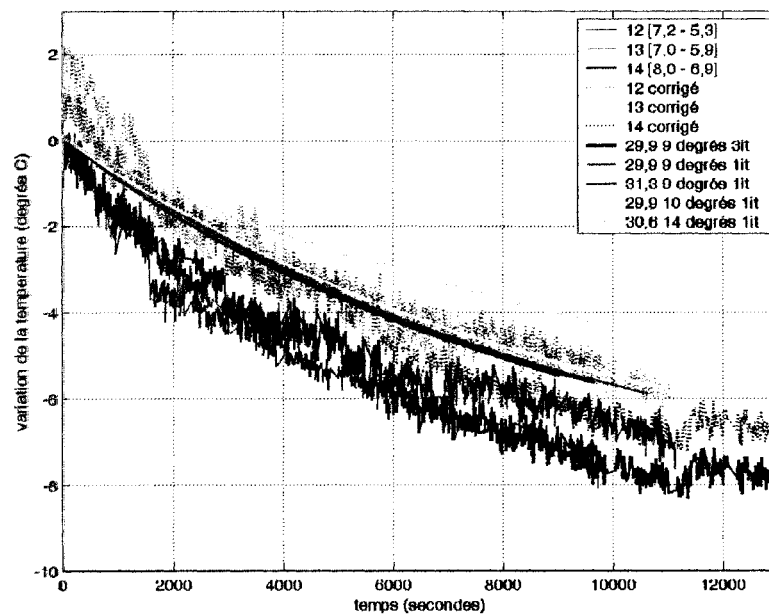


Figure 3.31 Variation de température expérimentale et numérique pour le point 1 (320,222,-102) - zone A

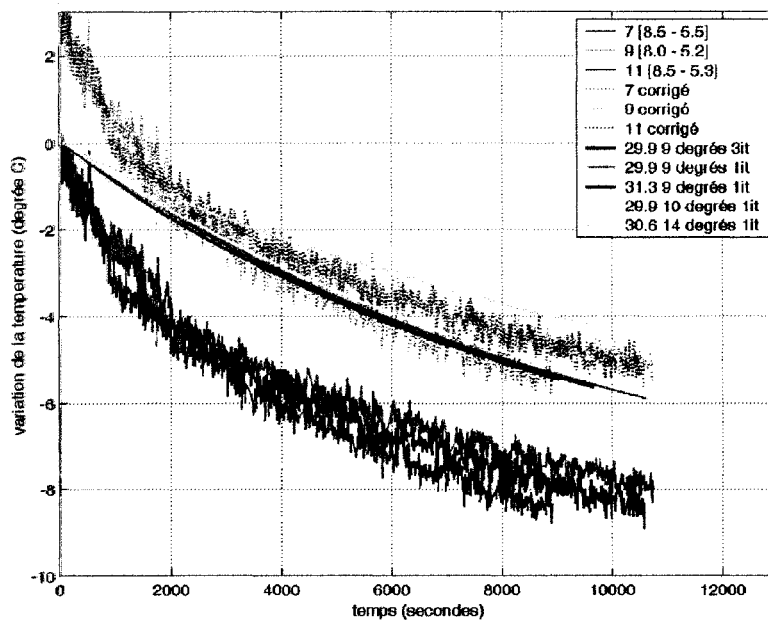


Figure 3.32 Variation de température expérimentale et numérique pour le point 2 (320,220,-15) - zone A

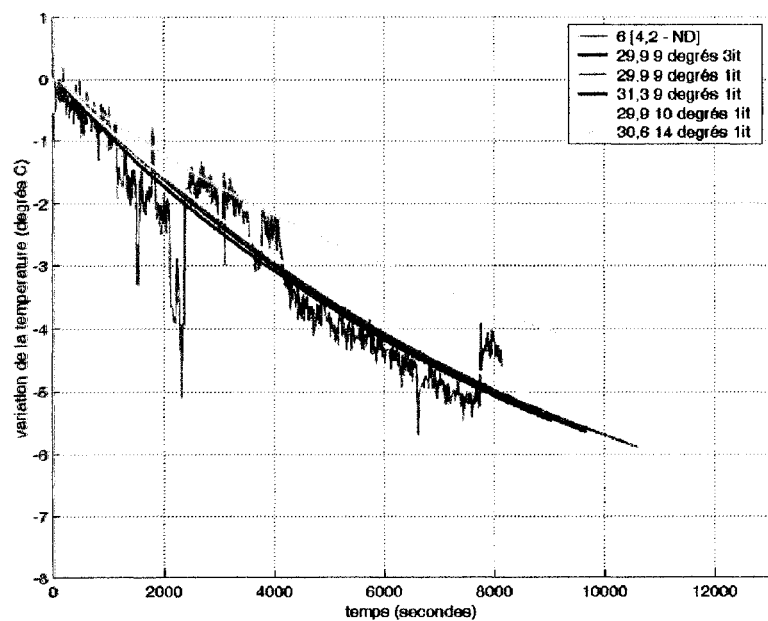


Figure 3.33 Variation de température expérimentale et numérique pour le point 3 (190,230,-10) - zone A

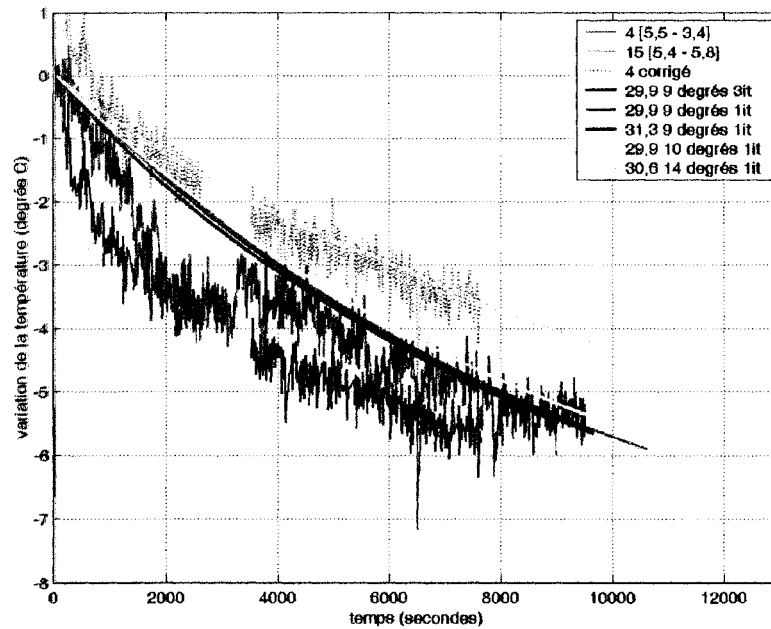


Figure 3.34 Variation de température expérimentale et numérique pour le point 4 (50,170,-100) - zone A

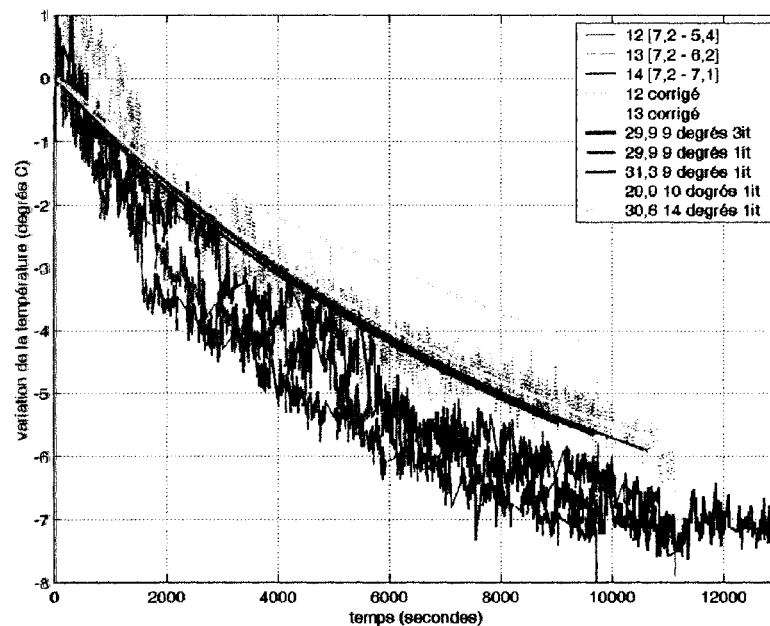


Figure 3.35 Variation de température expérimentale et numérique pour le point 5 (80,80,-97) - zone A

a souvent un grand écart entre les deux valeurs. Sur les courbes expérimentales mesurées pour ces positions, il est possible de remarquer une chute importante dans les premiers instants de l'expérience de même qu'une grande fluctuation des mesures. Étant donné qu'il n'y a rien, physiquement, qui pourrait expliquer une telle diminution, on peut se tourner vers le moteur et les interférences notées. Ainsi, de nouvelles courbes ont été tracées pour se réajuster aux ΔT mesurés sans moteur. Ces nouvelles courbes se comparent très bien aux courbes numériques. La courbe expérimentale du point 3 (190,230,-10) montre bien la variation quelque fois très instable du thermocouple. Même si la valeur de la température change rapidement et varie beaucoup, on voit que la pente de la courbe numérique se compare à celle expérimentale.

Comme établi au départ, les courbes des expériences 4,5 et 6 s'associent à la courbe du lingot à 14 ° C et les autres à celles du lingot à 9 ° C ou 10 ° C, sauf pour le point 3 (190,230,-10) où il est difficile de tirer des conclusions. La grande fluctuations des valeurs expérimentales et la faible différence entre les courbes numériques à 9 et 10 ° C rend difficile la possibilité d'établir laquelle des températures de lingot se rapproche davantage de l'expérimental. Ainsi, une incertitude de 1 degré dans l'interprétation des conditions thermiques expérimentales associées au lingot n'apporte pas une grande influence sur les résultats de simulation numérique obtenus.

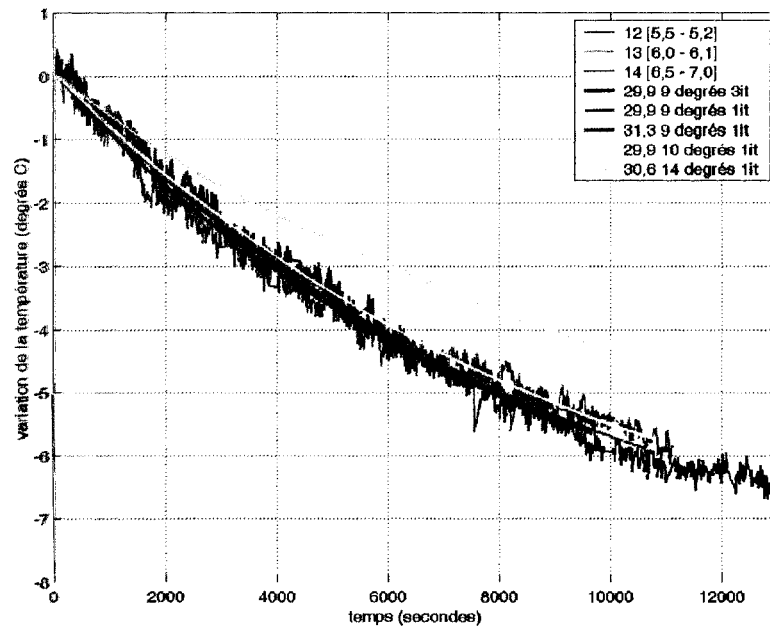


Figure 3.36 Variation de température expérimentale et numérique pour le point 6 (475,130,-142) - zone B

La zone B (figures 3.36 à 3.47) englobe les points dans le milieu du bain où la variation de température du modèle numérique représente très bien celles recueillies par les expériences. Les deux ΔT expérimentaux se comparent habituellement très bien, il y a seulement les résultats de l'expérience 15 qui montrent toujours un petit écart allant de 0,5 à 0,9 ° C à 9500 secondes (2h38). Si on ajuste ces courbes, on remarque qu'elles tombent alors très près des courbes numériques, puisqu'il y a toujours une légère déviation entre les courbes associées à l'expérience 15 et les courbes numériques à la fin des simulations. Pour les autres expériences sans la présence des bulles d'air, elles suivent généralement très bien les courbes des simulations numériques pour les cas avec le lingot à 9 et 10 ° C.

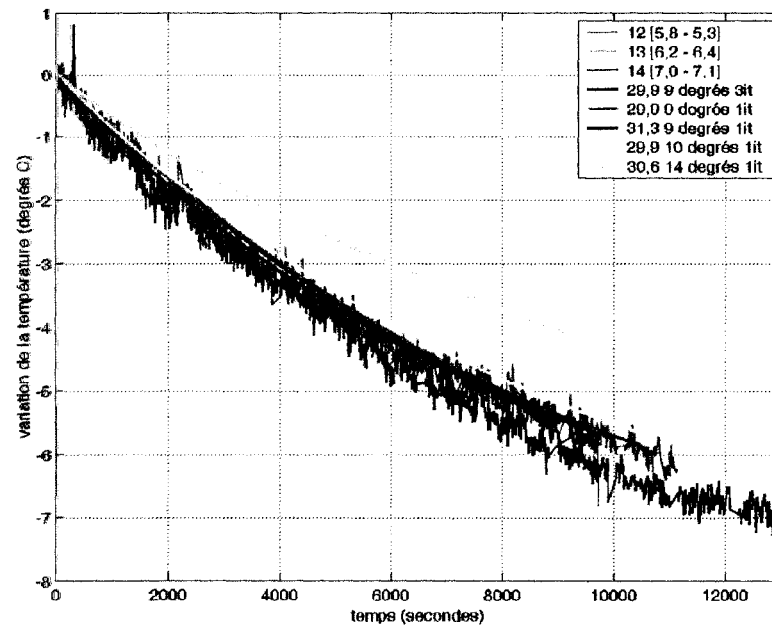


Figure 3.37 Variation de température expérimentale et numérique pour le point 7 (600,65,-90) - zone B

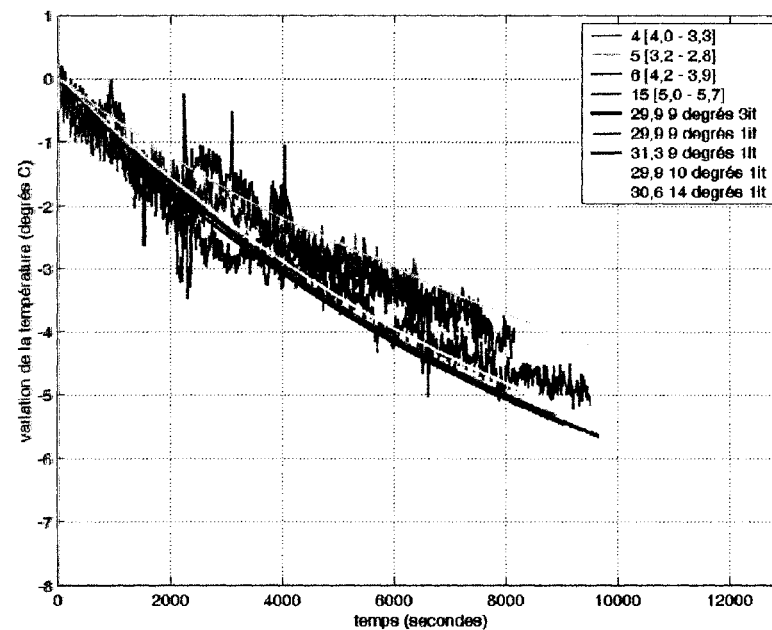


Figure 3.38 Variation de température expérimentale et numérique pour le point 8 (550,220,-55) - zone B

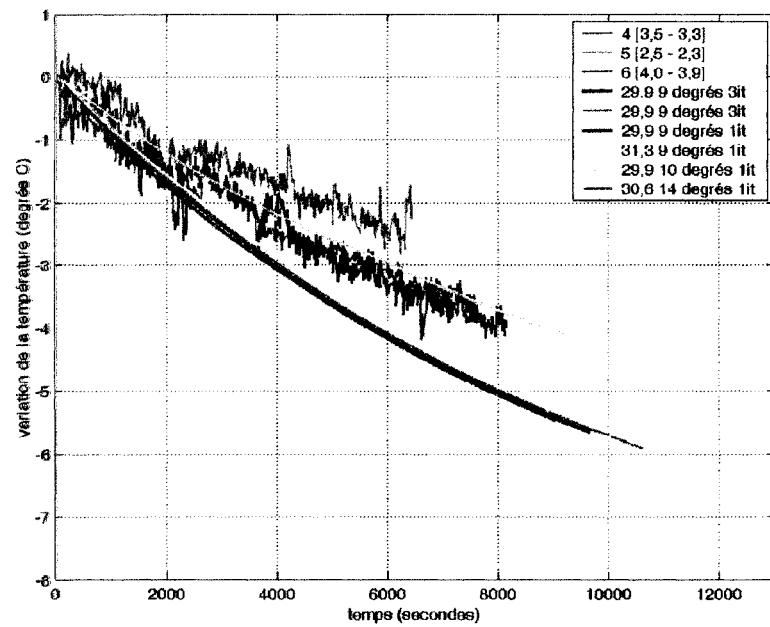


Figure 3.39 Variation de température expérimentale et numérique pour le point 9 (600,220,-55) - zone B

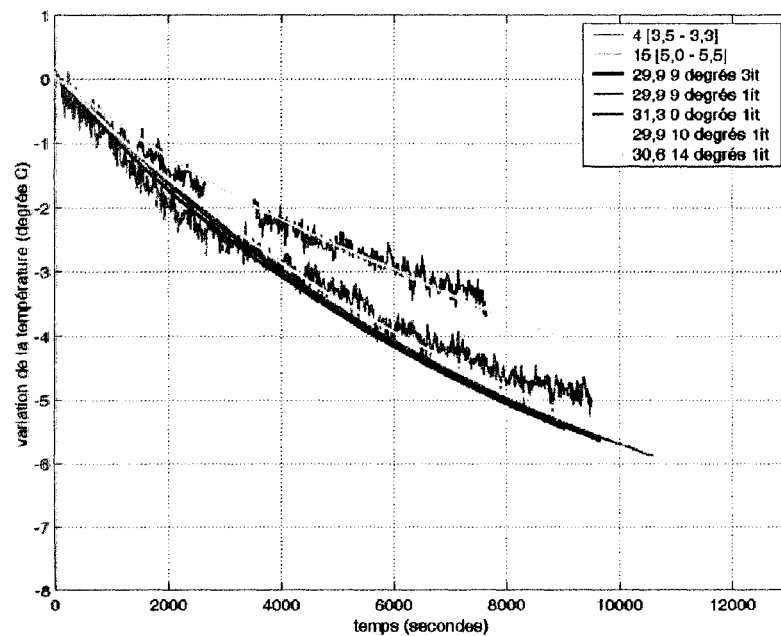


Figure 3.40 Variation de température expérimentale et numérique pour le point 10 (650,220,-55) - zone B

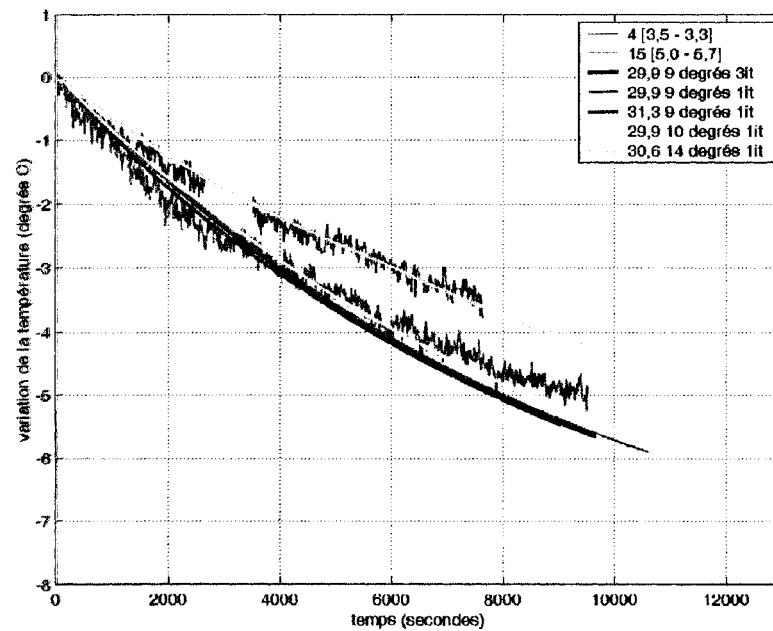


Figure 3.41 Variation de température expérimentale et numérique pour le point 11 (700,220,-10) - zone B

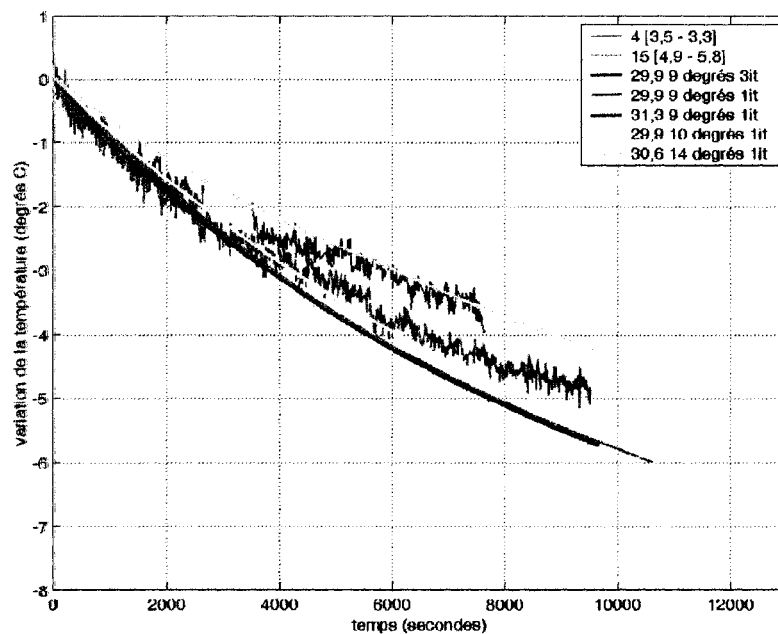


Figure 3.42 Variation de température expérimentale et numérique pour le point 13 (750,220,-55) - zone B

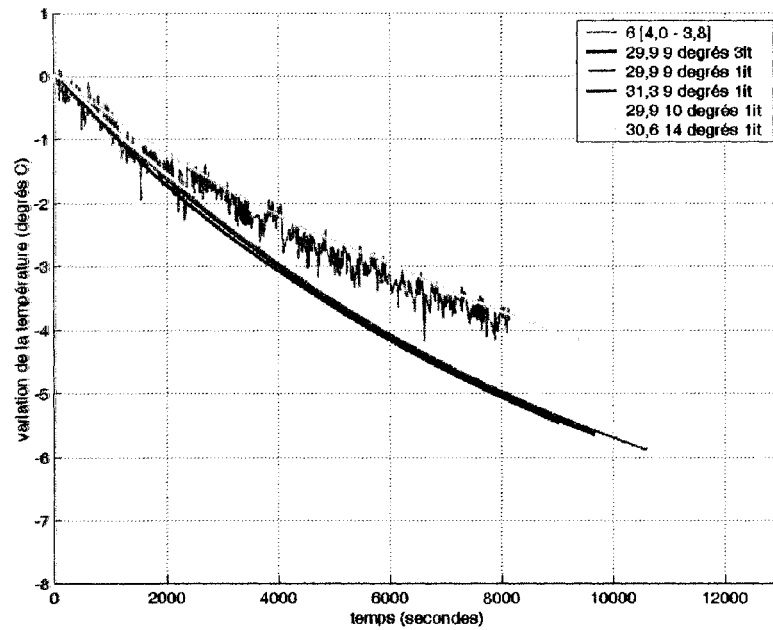


Figure 3.43 Variation de température expérimentale et numérique pour le point 14 (650,280,-10) - zone B

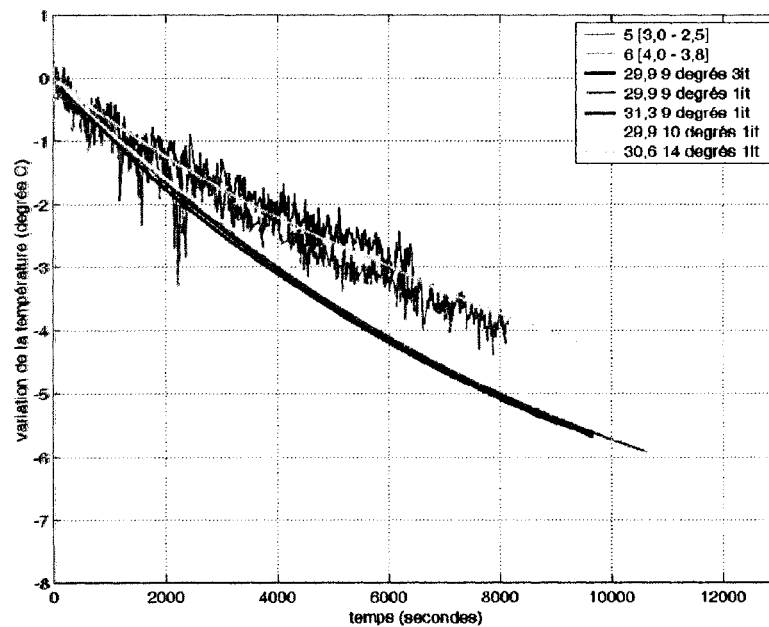


Figure 3.44 Variation de température expérimentale et numérique pour le point 15 (700,280,-10) - zone B

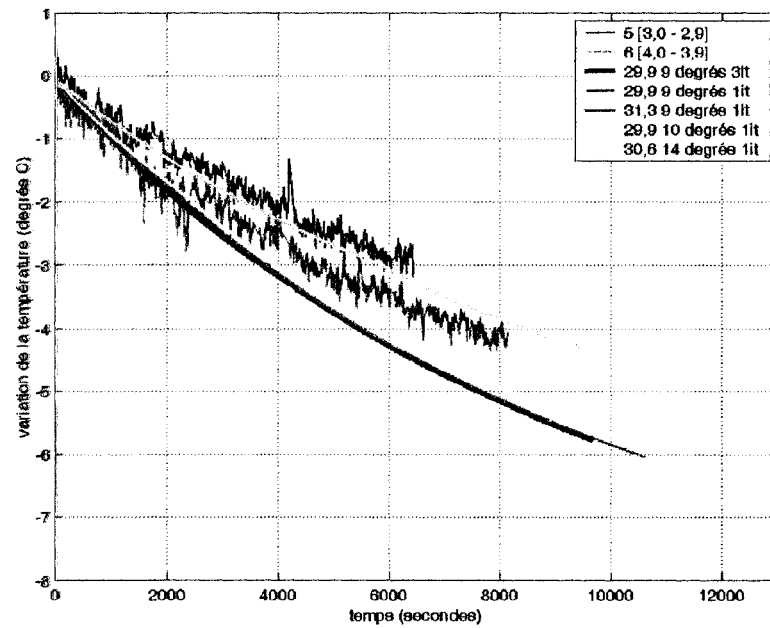


Figure 3.45 Variation de température expérimentale et numérique pour le point 17 (750,280,-55) - zone B

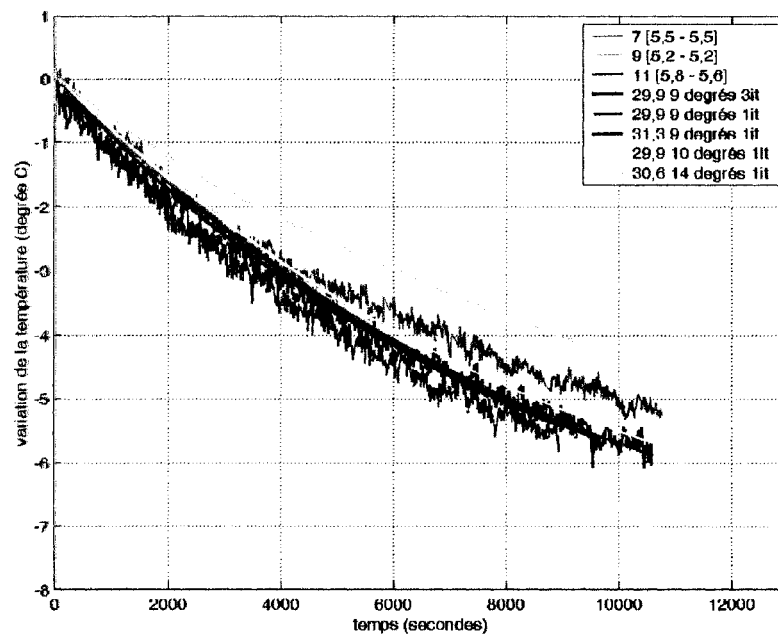


Figure 3.46 Variation de température expérimentale et numérique pour le point 23 (530,350,-50) - zone B

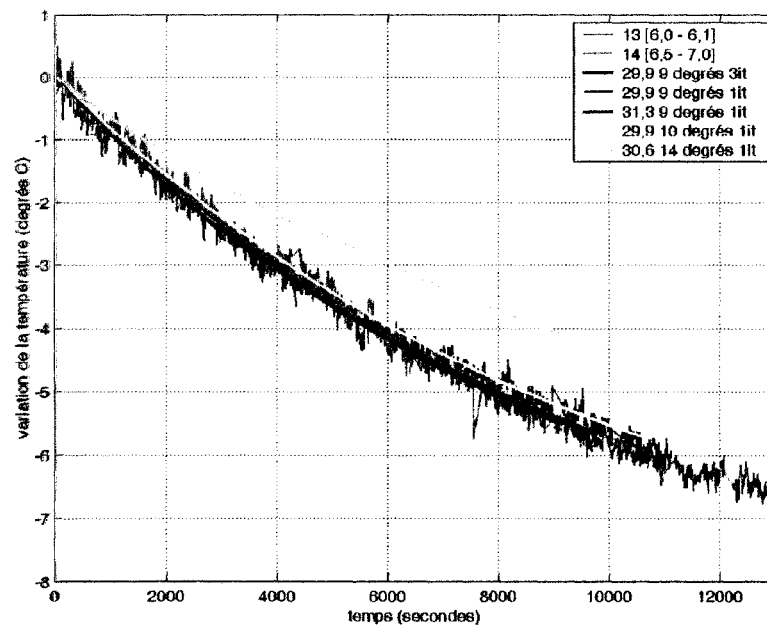


Figure 3.47 Variation de température expérimentale et numérique pour le point 24 (503,283,-13) - zone B

Pour les courbes des expériences 4, 5 et 6, on constate qu'elles suivent très bien la variation de température rapportée par la simulation avec un lingot à 14°C mais avec quelquefois un petit écart entre les valeurs quantitatives. Dans la section 2.3.2, il a été calculé que la présence de bulles d'air apporte une incertitude puisque la présence de cet isolant est difficilement quantifiable. À partir de ces résultats, on peut constater que le modèle numérique représente bien le transfert thermique même à une température de lingot plus élevée.

Pour une position donnée avec les mêmes conditions de température du lingot, les courbes obtenues expérimentalement sont sensiblement similaires, ce qui montre que les différences au niveau des conditions thermiques initiales (température initiale

du bain et température extérieure) n'apportent pas de grands changements. Pour toutes les mesures expérimentales, il faut se rappeler que certaines températures, jugées constantes dans les simulations numériques, peuvent varier légèrement au cours d'une même expérience, ce qui peut apporter certaines nuances dans les courbes de la variation de température expérimentale.

Les calculs numériques montrent justement que les deux conditions testées avec une même température de lingot (calcul 1 (bleu) vs calcul 3(rouge)) sont très similaires et ainsi, la différence entre les deux conditions ne peut être détectée de façon précise par les thermocouples. De plus, la différence entre la simulation numérique avec le lingot à 9°C (calcul 1 (bleu)) et celle avec le lingot à 10°C (calcul 2 (jaune)) est faible ; à 10 000 secondes, seulement $0,2^{\circ}\text{C}$ sépare les deux courbes.

Dans la zone C (figures 3.48 et 3.49), on se situe près du lingot et les courbes expérimentales et numériques sont très similaires. Le modèle numérique représente bien le transfert thermique que l'on retrouve dans cette zone. Les courbes expérimentales ne permettent toutefois pas de voir clairement la variation de température rapide du début, cette variation n'étant que de $0,3$ degré.

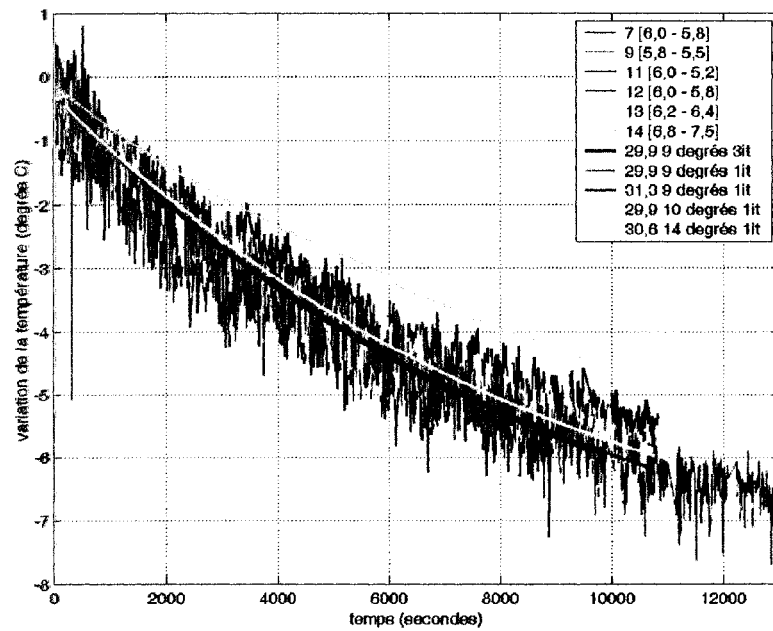


Figure 3.48 Variation de température expérimentale et numérique pour le point 18 (710,315,-25) - zone C

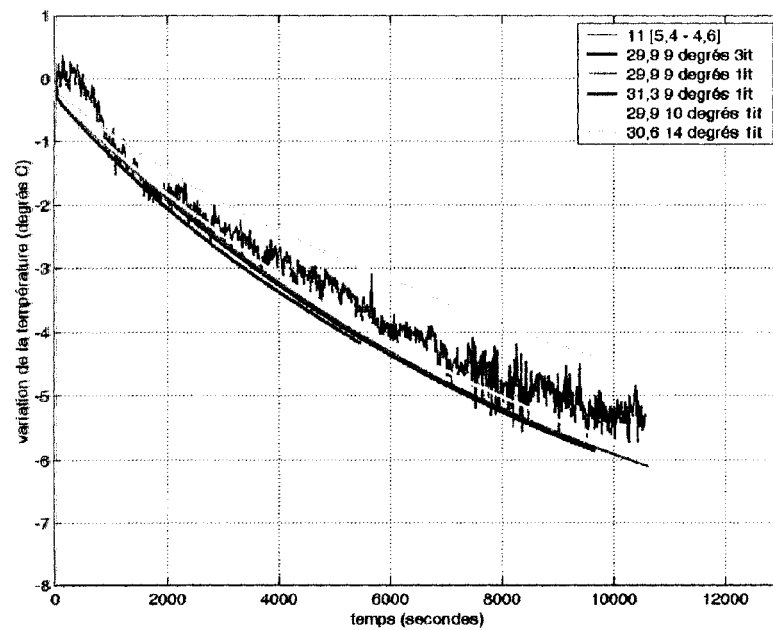


Figure 3.49 Variation de température expérimentale et numérique pour le point 22 (743,345,-62) - zone C

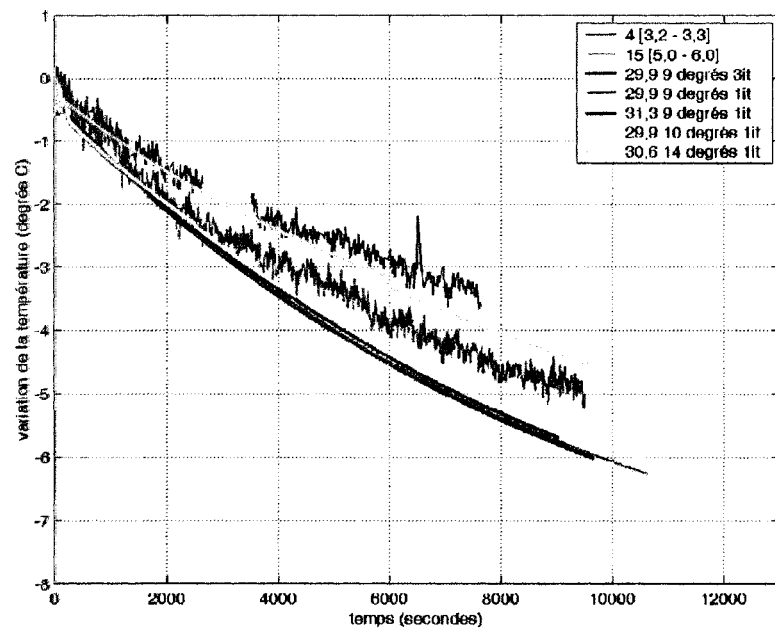


Figure 3.50 Variation de température expérimentale et numérique pour le point 12 (750,220,-10) - zone D

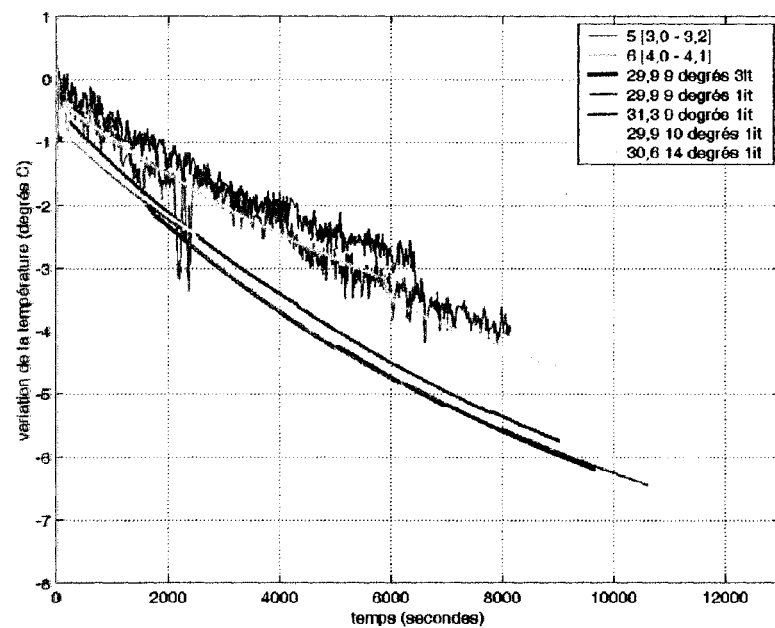


Figure 3.51 Variation de température expérimentale et numérique pour le point 16 (750,280,-10) - zone D

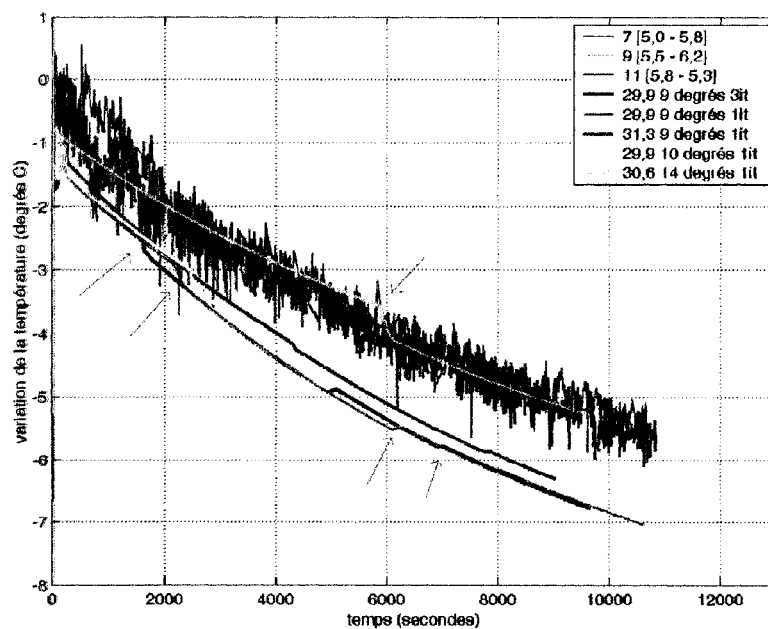


Figure 3.52 Variation de température expérimentale et numérique pour le point 19 (750,320,-15) - zone D

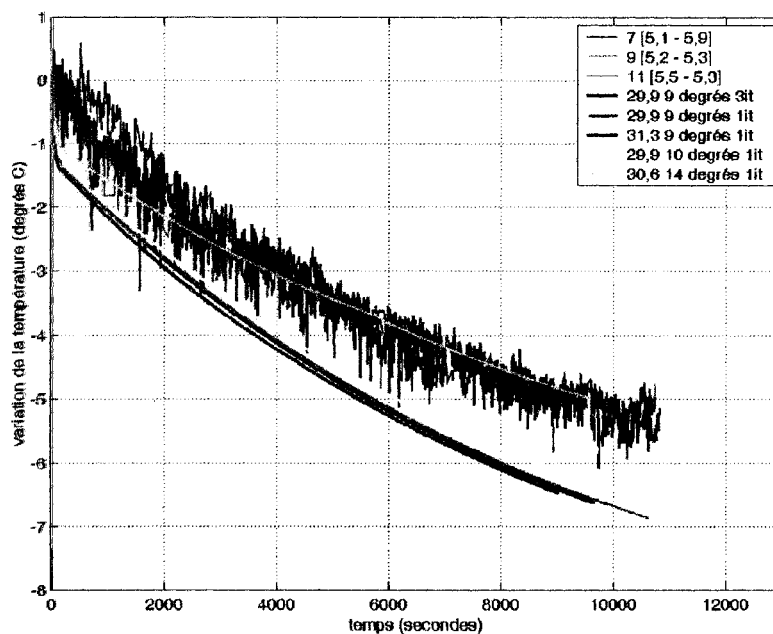


Figure 3.53 Variation de température expérimentale et numérique pour le point 20 (783,320,-27) - zone D

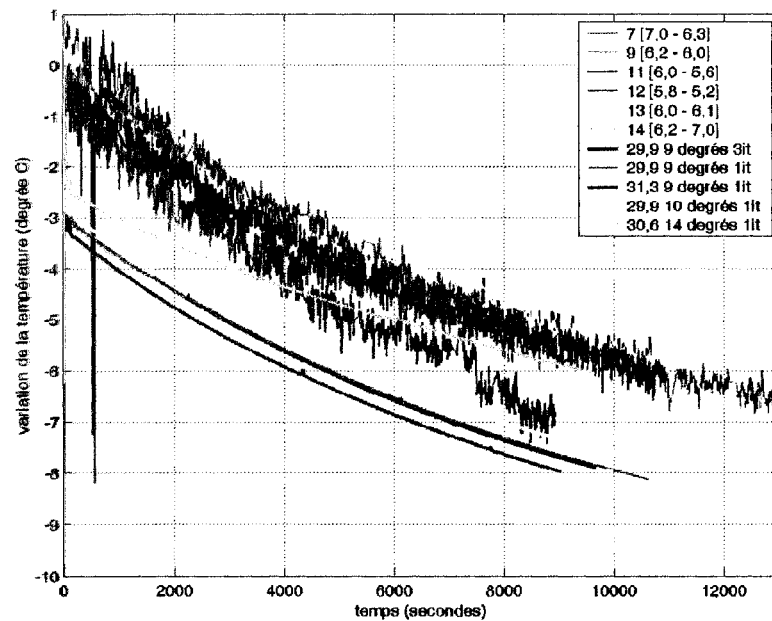
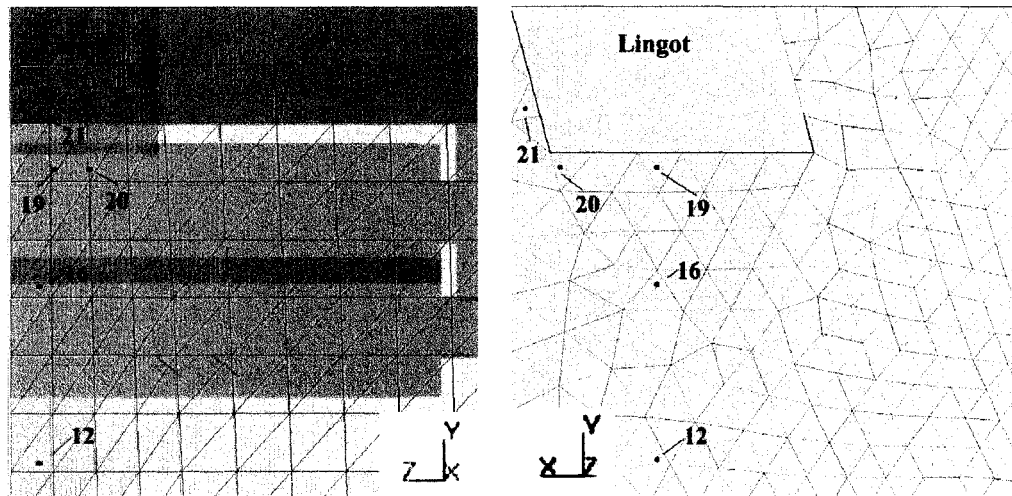


Figure 3.54 Variation de température expérimentale et numérique pour le point 21 (795,340,-5) - zone D

Dans la dernière zone D (figures 3.50 à 3.54), il s'agit des thermocouples les plus près de la zone arrière du lingot où les courbes numériques montrent une variation importante de la température dans les premières secondes, ce qui n'est pas rapporté par les expériences. Toutefois, le transfert thermique représenté par la pente est semblable après ces premières secondes. L'écart créé entre ces deux courbes vient principalement des premières secondes où le calcul numérique prévoit une baisse de température importante créée par le choc des températures (30 vs 9) pour les positions près du lingot (zones C et D). Les positions sous le lingot sont aussi affectées à cause de l'effet de la convection naturelle.

Pour expliquer cette différence entre les valeurs expérimentales et les résultats numériques pour les points près du lingot, on peut se tourner vers des explications d'ordre expérimental et aussi d'ordre numérique. Ainsi, lors des expériences, il y a probablement eu quelques secondes avant que la température du lingot n'atteigne la température moyenne mesurée car de l'eau plus chaude était déjà présente dans le lingot. Ainsi, le choc thermique ressenti par toutes les positions près du lingot ne serait pas aussi violent que celui prévu.

Du côté numérique, la résolution des équations se fait aux noeuds des éléments et il y a interpolation pour les autres endroits dans l'élément. La figure 3.55 montre la position des noeuds de la zone D avec le maillage dans le coin du lingot. On voit que les points les plus influencés se retrouvent dans la couche de premiers éléments autour du lingot et que les éléments sont assez grossiers. Un maillage plus fin dans la zone la plus près du lingot aurait permis de connaître la distribution de température de façon plus détaillée. Ainsi, peut-être que le saut de température est en réalité concentré sur une fine couche très près du lingot, mais le maillage actuel ne permet pas de représenter cette possible réalité. Par contre, étant donné que le point 16 ((750,280,-10) - figure 3.51) présente aussi un saut et qu'il n'est pas situé dans la première couche d'éléments, on constate que le saut ressenti pour les autres positions tout près du lingot serait toujours présent, mais peut-être moins important. Cette limite du maillage est ressentie localement à l'intérieur des



(a) Vue de côté - plan zy

(b) Vue de devant - plan xy

Figure 3.55 Maillage près du lingot avec points de la zone D

éléments autour du lingot, mais de façon globale, la distribution de température calculée est représentative du transfert thermique dans tout le volume du bain. Un maillage fin est utile pour connaître les détails dans les endroits critiques où un changement rapide de la température (ou de la vitesse) existe.

L'endroit où le maillage a le plus d'impact est à la position 21 (795,340,-5) (figure 3.54) qui se retrouve dans un élément qui touche à la fois au lingot et à la paroi; deux surfaces où il y a refroidissement par convection. Il est donc difficile de calculer réellement ce qui se passe à l'intérieur de cet élément. Il aurait fallu un maillage beaucoup plus fin à cet endroit.

Ainsi, une combinaison des deux facteurs pourrait expliquer l'écart noté dans les premiers instants du calcul. On remarque toutefois que la pente des variations de température expérimentale est bien représentée par le modèle numérique. Ce dernier calcule le transfert thermique numérique à l'aide de modèles (loi de paroi, modèle de turbulence) et non par l'imposition directe des conditions frontières. Le fait que le modèle représente bien le transfert thermique expérimental permet d'avancer que le modèle numérique est très valable, même pour cette zone plus critique.

Certains points sous le lingot démontrent régulièrement une variation abrupte dans la température autour de 2000 ou 6000 secondes ; variation qu'on ne retrouve pas sur les courbes expérimentales. La figure 3.52 est un exemple où quelques uns de ces sauts sont identifiés par des flèches vertes. La première tentative pour éliminer cette chute a été de réaliser des calculs avec 3 itérations de convergence pour chaque pas de temps pour les calculs de la première condition (eau à $29,9^{\circ}\text{C}$ et air ambiant à $26,5^{\circ}\text{C}$). Comme les courbes le montrent, la chute abrupte de température est encore identifiable. Même si la réponse du calcul est plus stable, on parle d'un calcul d'une durée d'environ 6-7 semaines pour 3 itérations comparativement à 2-3 semaines pour 1 itération. La meilleure convergence du calcul ne vaut sûrement pas le temps alloué, c'est pourquoi tous les autres calculs de comparaison ont été

faits avec 1 seule itération pour chaque pas de temps de 10 secondes. Le maillage semble plutôt être la cause de la présence de ces sauts.

Cette variation rapide de la température se fait principalement ressentir pour les positions sous le lingot, tout près de ce dernier. L'explication probable est que la zone de température où l'eau est plus froide s'agrandit lentement, mais étant donné la limite du maillage, la zone plus froide grandit de façon plus importante tout d'un coup, c'est-à-dire au moment où elle englobe un élément de plus comme le montre la figure 3.56. Ceci fait en sorte de perturber rapidement la température pour une zone donnée, c'est à dire sous le lingot où l'effet de Boussinesq se fait le plus sentir (figure 3.52). Les positions loin du lingot ressentent aussi cette variation, mais de façon beaucoup moins marquée (exemple : figure 3.36 à 6000 secondes). Il semble quand même possible de suivre les courbes car la variation négative est généralement récupérée quelque temps plus tard par une variation positive. Un maillage plus fin dans la zone sous le lingot diminuerait peut-être l'amplitude des sauts, mais il y aurait toujours cette limite des éléments. De plus, un compromis doit exister entre la finesse du maillage et le temps de calcul associé qui est déjà relativement long.

Le graphique 3.57 montre différentes courbes expérimentales pour différents points dans le bain pour les expériences où l'isolant d'air créé par les bulles est

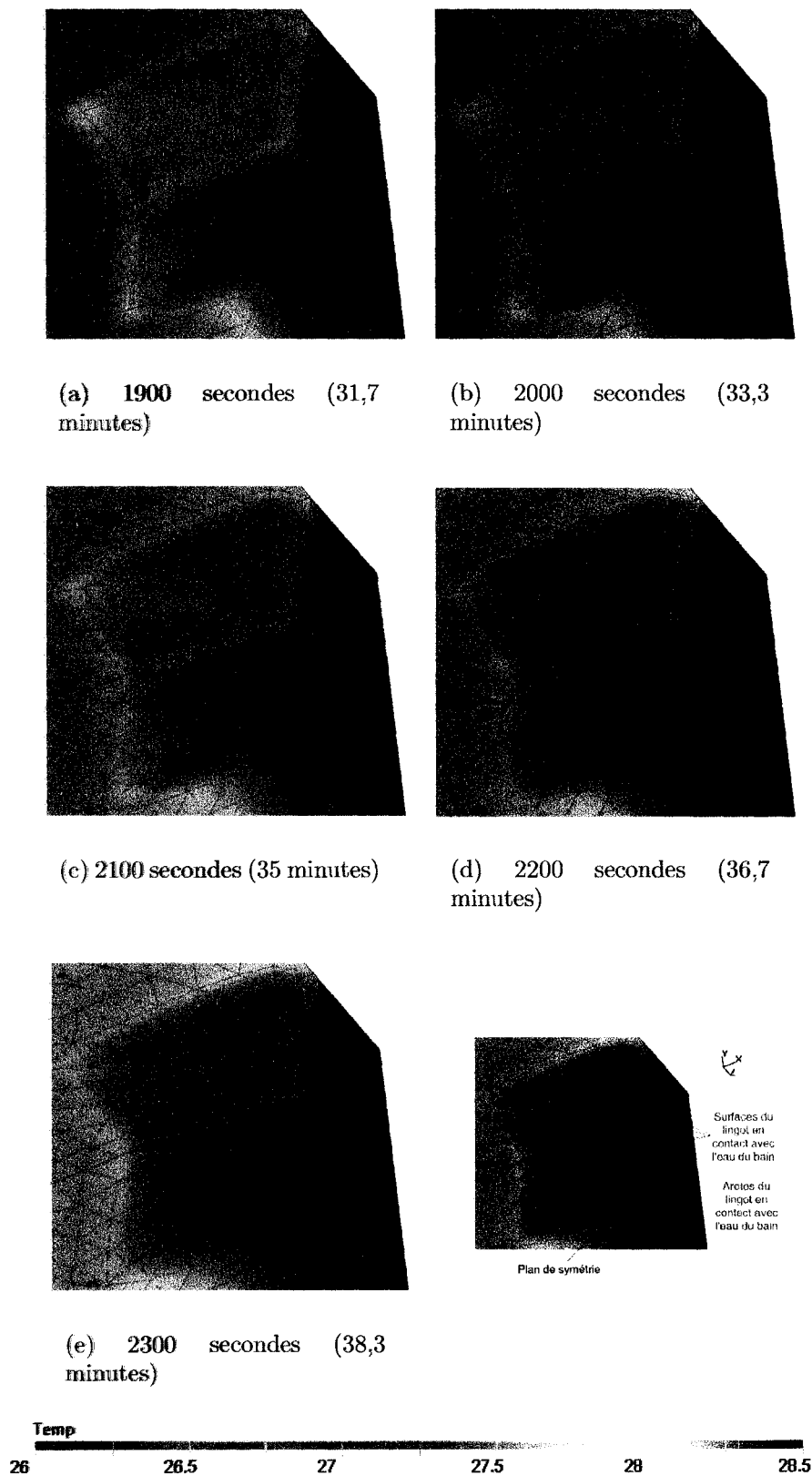


Figure 3.56 Distribution de température près du lingot pour le moment où une variation rapide de température est observable (pour le calcul 1 à 1

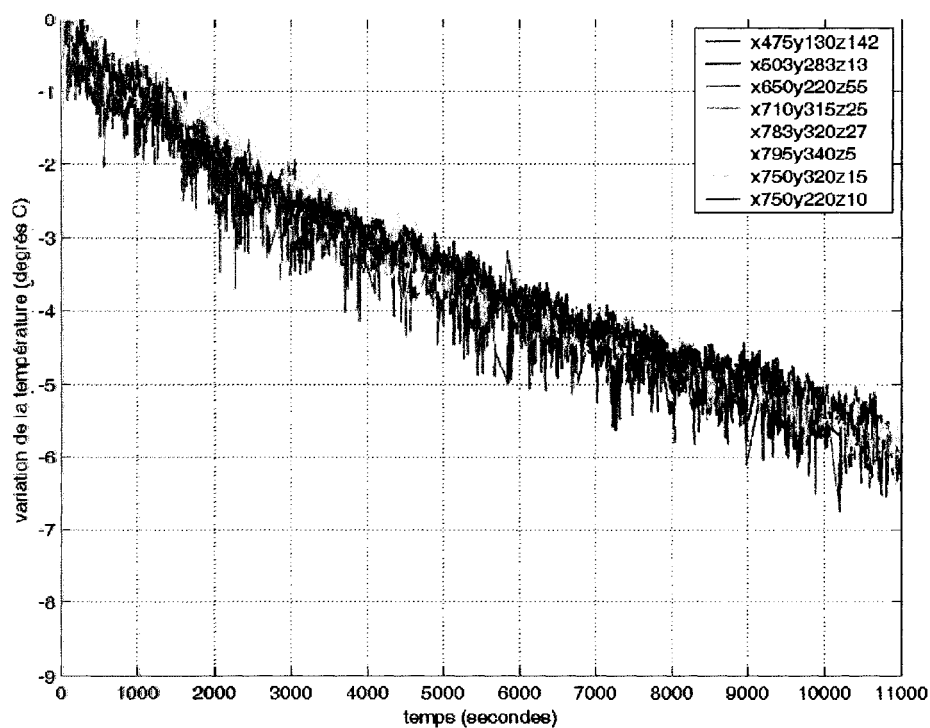


Figure 3.57 Comparaison des variations de températures mesurées à différentes positions dans le modèle à eau

absent de la surface du lingot. On peut remarquer que toutes les courbes montrent à peu près la même pente et donc que l'échange thermique dans le bain est assez uniforme. À 11 000 secondes (3h03), seulement 1 degré sépare la position comparée la plus chaude de celle la plus froide, ce qui n'est pas très significatif puisque l'erreur attribuable au thermocouple est justement de 1 degré. Pour un temps donné, les courbes expérimentales montrent que la température est approximativement la même partout dans le bain.

À titre de comparaison, le graphique 3.58 illustre la variation de température des positions étudiées telle qu'elle a été calculée par le modèle numérique. Ainsi, comme les expériences sur le modèle à eau l'ont montré, le transfert thermique est très similaire d'une position à l'autre, ce qui suggère que le mélange se fait très bien considérant la présence du lingot dans un coin du bain. Par contre, le modèle montre un écart de température assez marqué entre les positions très près du lingot et les positions plus éloignées. Cette différence se crée dans les premières secondes de simulation, ce qui n'est pas rapporté par les expériences sur le modèle à eau, comme il a déjà été expliqué. La figure 3.59 montre la distribution de température sur différents plans à 10 610 secondes telle qu'elle a été calculée par le modèle numérique selon les conditions du calcul 1. On voit en effet que la température est sensiblement la même partout dans le bain, excepté pour la région autour du lingot où elle montre un écart allant jusqu'à 2,5 degrés du reste du bain. De plus, pour les plans coupant le lingot, on remarque que la température dans le V formé par la feuille est légèrement supérieure à celle à l'extérieur de la feuille. Cette différence d'à peine 0,2 ° C ne peut évidemment pas être détectée au moyen de thermocouples. La valeur de la simulation numérique se trouve donc, entre autre, dans la sensibilité et les précisions qu'elle peut apporter. Les perturbations expérimentales sont ici éliminées et les simulations numériques rapportent les phénomènes présents dans le bain.

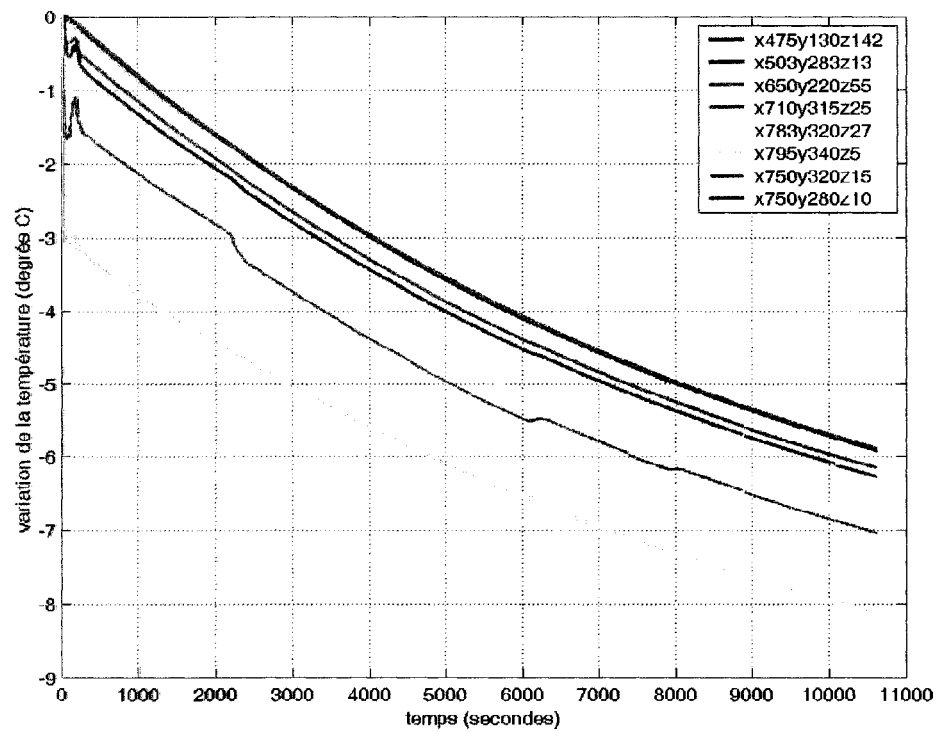


Figure 3.58 Comparaison des variations de températures calculées par le modèle numérique à différentes positions dans le bain

(a) plan $z=0$ mm(b) plan $z=-50$ mm(c) plan $z=-100$ mm

Figure 3.59 Distribution de la température dans le bain de galvanisation telle que calculée par la simulation numérique à 10 610 secondes (2h57) sur divers plans

Les figures 3.60 à 3.62 illustrent l'aspect transitoire des températures sur différentes sections du bain. On remarque que la zone plus froide créée par le lingot se forme directement sous ce dernier dû à l'effet de la convection naturelle, tout le reste du bain étant approximativement à la même température. L'effet du lingot se fait principalement ressentir dans le plan xy , le refroidissement ne s'effectuant pas vraiment dans la direction z . Il y a d'abord un refroidissement très localisé à l'arrière et sous le lingot. Ensuite, la zone à plus basse température s'agrandit vers le bas et le refroidissement s'effectue partout dans le bain.

Dans son ensemble, on considère que le modèle numérique représente très bien le transfert thermique rapporté par les expériences. Il semble alors que le calcul de la distribution de température utilise de bons modèles. L'écoulement (u,v,w) , la turbulence (k,ϵ) et la loi de paroi, qui servent au calcul de la distribution thermique, semblent bien modélisés. Le mélange obtenu par le modèle numérique est très représentatif de ce qui se passe réellement dans le modèle à eau. Les principales différences observées entre les résultats numériques et les résultats expérimentaux peuvent être reliées à la présence du lingot et à sa simulation.

Dans un bain de galvanisation industriel, cette difficulté est en partie écartée car le lingot représente un bloc dont la température de la surface est connue, soit la température de fusion du lingot (Zn-Al). La présence de bulles de gaz est par contre

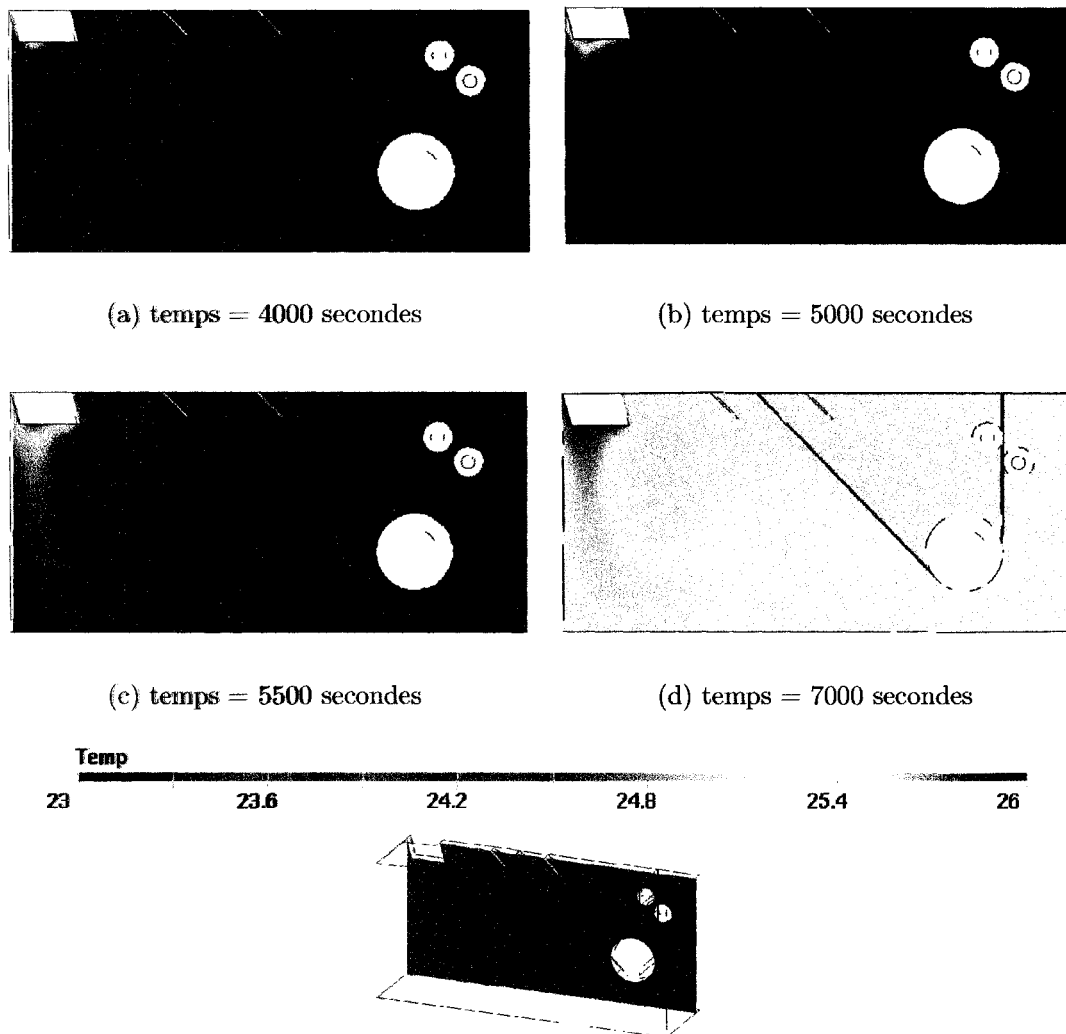
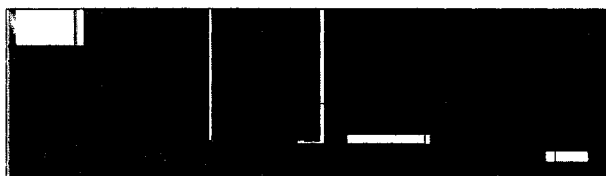


Figure 3.60 Distribution de la température dans le bain en fonction du temps telle que calculée par la simulation numérique sur la section $z = -30$ mm



(a) temps = 4000 secondes



(b) temps = 5000 secondes



(c) temps = 5500 secondes



(d) temps = 7000 secondes

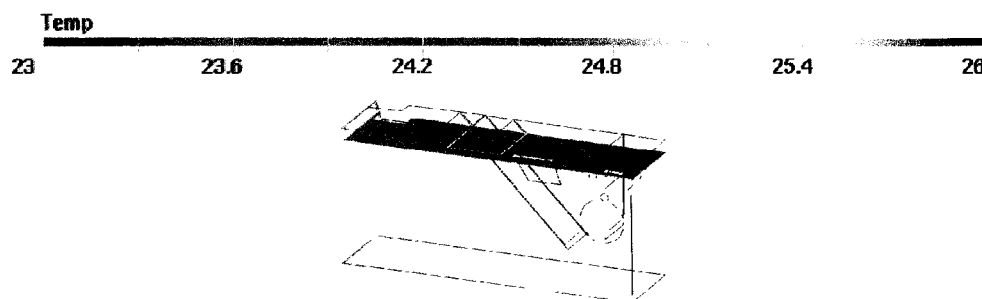


Figure 3.61 Distribution de la température dans le bain en fonction du temps telle que calculée par la simulation numérique sur la section $y = 340$ mm

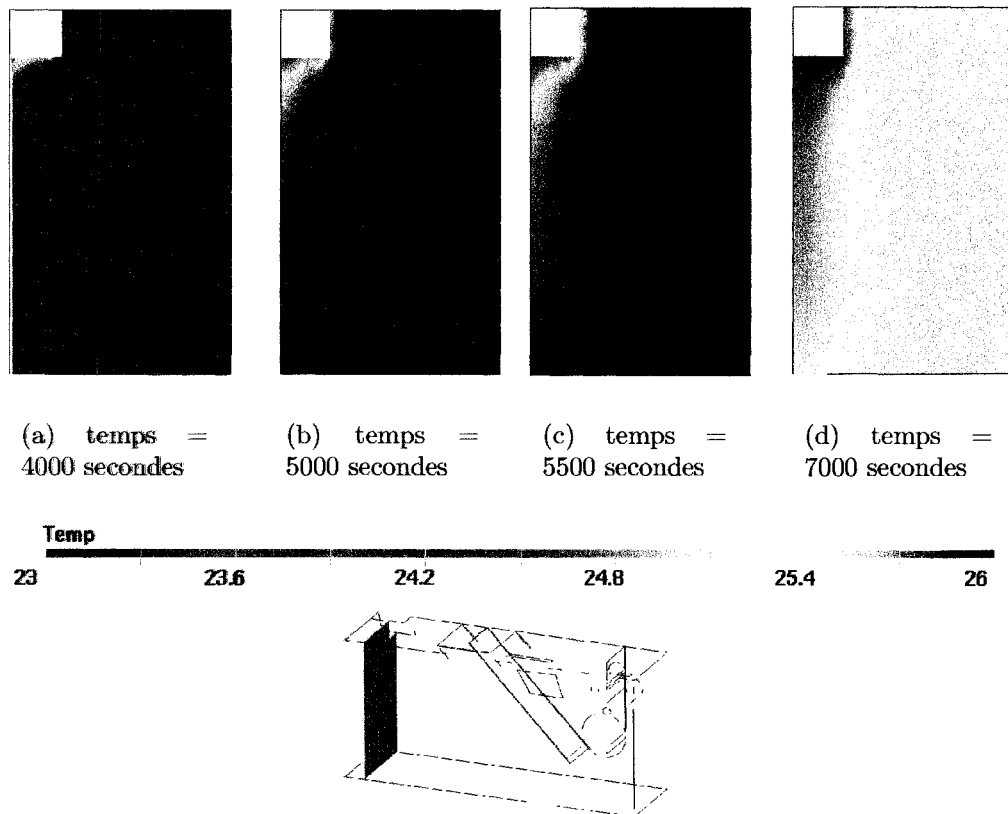


Figure 3.62 Distribution de la température dans le bain en fonction du temps telle que calculée par la simulation numérique sur la section $x = 750$ mm

un facteur qui pourrait aussi être présent et qui peut influencer l'interprétation des conditions thermiques du lingot comme cela a été le cas ici. Notons par contre que les similitudes thermiques adimensionnelles (nombre de Grashof, Rayleigh, Stanton) ne peuvent être respectées, pour le cas présent, entre le modèle à eau et le bain industriel. Ceci est dû aux grandes différences de température présentes dans le procédé industriel et qui sont difficilement transposables dans un modèle à eau. Ainsi, l'écart observé dû à la présence de bulles d'air ne se traduirait pas nécessairement de la même façon dans un bain industriel que ce que l'on a observé dans les présentes expériences. Même avec ces incertitudes, on a vu que le modèle numérique permettait une bonne simulation du cas physique. Et comme l'on veut généralement connaître le transfert thermique globalement, le type de maillage utilisé serait adéquat. Un maillage plus fin permettrait de connaître les détails de la distribution thermique dans les zones plus critiques tel que le contour du lingot. Un temps de calcul plus long serait par contre exigé.

3.3 Recommandations

Suite à ces diverses observations, la mesure de l'écoulement par d'autres méthodes que celle de la vélocimétrie par laser Doppler pourrait permettre de préciser la validation de l'écoulement. Comme certains résultats préliminaires (section 3.1.2) ont montré que l'utilisation du PIV permettait une bonne comparaison entre les valeurs numériques et expérimentales, cette méthode semble notamment être plus

sensible et plus efficace pour la mesure de la turbulence et l'obtention de plus de mesures de vitesse présenterait un bon complément au présent exercice.

Comme c'est déjà le cas pour le modèle numérique utilisé dans le présent projet, l'ajout du calcul de la concentration des différentes espèces chimiques au modèle numérique permet de simuler la formation de particules. Ainsi, les zones où la concentration de particules est plus forte peuvent être ciblées. De plus, le transport de ces dernières peut être simulé afin de vérifier si elles peuvent causer des défauts en adhérant à la feuille. Pour ce faire, l'utilisation d'un modèle représentatif de l'écoulement et de la distribution thermique est primordiale, cet objectif étant vérifié par le présent ouvrage. De plus, la connaissance des limites de solubilité du fer et de l'aluminium dans le zinc est un autre facteur important afin d'avoir un modèle représentatif de la réalité.

CONCLUSION

Par le biais de la validation, le présent travail a permis de réaliser à la fois le potentiel de l'utilisation de modèle à eau, et la puissance des modèles numériques. Comme c'est le cas ici, la prise de mesures expérimentales s'avère souvent ardue dans les systèmes industriels. La température, les substances impliquées, l'environnement sont souvent des obstacles majeurs. L'entrée en jeu des modèles à eau voit toute son utilité. Lorsqu'une similitude dynamique modèle à eau - bain industriel est respecté, les modèles à eau permettent d'observer l'écoulement directement. Pour les cas où les similitudes dynamiques ne sont pas possibles, ils peuvent servir à la validation de modèles numériques qui eux ensuite servent pour simuler de façon efficace des situations industrielles afin de comprendre et résoudre des problèmes. L'emploi d'un modèle représentatif et fiable est primordial, ce qui explique l'objectif de ce projet, soit de valider le modèle numérique simulant l'écoulement et le transfert thermique présent dans un bain de galvanisation en continu développé par l'IMI-CNRC.

Pour le présent travail, l'écoulement et le transfert thermique étaient donc les deux aspects physiques à valider. La mesure de l'écoulement a été faite dans un précédent travail de doctorat [Binet, 2000] sur un modèle à eau représentant le cinquième des dimensions d'un bain de galvanisation industriel. Pour les mesures de température dans le temps, ce même modèle à eau a été ajusté afin d'avoir

des résultats fiables et répétitifs. Aussi, un lingot a été simulé afin d'apporter les conditions non-isothermes.

En ce qui concerne les calculs numériques, les conditions de température et de vitesse ont été imposées afin d'être fidèle aux expériences. Le calcul numérique utilise le modèle $k-\epsilon$ et des lois de parois pour représenter adéquatement l'écoulement turbulent dans tout le volume du bain.

La comparaison des résultats expérimentaux et numériques a permis de démontrer que le modèle était valable, qu'il représentait bien les observations faites dans le modèle à eau, autant pour l'écoulement que pour le transfert thermique. La comparaison de la turbulence n'a par contre pas été efficace puisque trop d'incertitudes étaient associées aux valeurs expérimentales, venant probablement du manque de sensibilité de la méthode de vélocimétrie laser Doppler. Des mesures supplémentaires sur l'écoulement avec un système tel qu'un PIV permettrait de confirmer les conclusions tirées dans le présent travail.

Les différentes simulations numériques ont permis de réaliser aussi la possibilité de voir toutes les variations, si minimes soient-elles, de l'écoulement et de la température dans certaines zones et dans le temps. Les données quantitatives jumelées au logiciel de visualisation permettent une interprétation et une analyse des résultats efficaces.

La conclusion finale est que le modèle numérique tel que conçu par le IMI-CNRC répond bien aux phénomènes d'échange réels observés dans un bain de galvanisation. L'emploi de ce modèle s'avère donc un outil puissant pour les industries désirant optimiser le procédé de galvanisation en continu.

RÉFÉRENCES

AJERSCH, F. , ILINCA, F. ET HÉTU, J.F. (2002a). Numerical analysis of the effect of temperature variation on flow in a continuous galvanizing bath. International Symposium on Zinc - Coated steels, Orlando, Floride, Iron & and steel society, pages 862–873.

AJERSCH, F. , ILINCA, F. , PERRAULT, M. ET MALO, A. (2001a). Computer aided galvanizing bath flow modeling facility. Technical report, Projet ILZRO ZCO-8-6, rapport final.

AJERSCH, F. , ILINCA, F. , PERRAULT, M. ET MALO, A. (2002b). Computer aids for galvanizing bath management-aluminium distribution in bath. Technical report, Projet ILZRO ZCO-8-7, rapport final.

AJERSCH, F. , ILINCA, F. , PERRAULT, M. , MALO, A. ET HÉTU, J.F. (2001b). Numerical simulation of the effect of operating parameters on flow in a continuous galvanizing bath. Galvatech 2001, Bruxelles, Belgique, Iron & and steel society, pages 511–518.

BARIL, E. , DUBOIS, M. ET GAGNÉ, M. (2001). Investigation of fluid flow in the snout of a continuous galvanising bath using numerical modelling. Galvatech 2001, Bruxelles, Belgique, Iron & and steel society, pages 435–442.

BINET, CHANTAL (2000). Modélisation numérique, modélisation physique et validation de l'écoulement de cuves de galvanisation. Thèse de Doctorat, Université du Québec à Chicoutimi, Canada.

BIRD, R.B. , STEWART, W.E. ET LIGHTFOOT, E.N. (1960). *Transport phenomena.* John Wiley & Sons Ltd, New-York, États-Unis.

BORZILLO, A.R. ET HAHN JR, W.C. (1969). Growth of the inhibition aluminium-rich alloy layer on mild steel during galvanizing in zinc that contains aluminium. Transactions of the ASM, vol. 62, 729-739.

CACERES, P.G. , HOTHAM, C.A. , SPITTLE, J.A. ET JONES, R.D. (1986). Mechanisms of formation and growth of intermetallic layer during hot dipping of iron in zn-3al and zn-6al baths. Materials Science and Technology, vol. 2, no.8, 871-877.

CAMERON, D.I. ET ORMAY, M.K. (1962). a chercher. Proceeding 6th International hot dip galvanizing conference, London, Zinc Development Association, pages 276–311.

CHEN, Z.W. , SHARP, R.M ET GREGORY, J.T. (decembre 1990). Fe-al-zn ternary phase diagram at 450 ° c. Materials Science and Technology, vol. 6, 1173-1176.

DIONNE, S. , CHAREST, M. , BOTTON, G. ET GOODWIN, F. (2002). Influence of substrate characteristic on the inhibition layer breakdown and galvannealing kinetics. International Symposium on Zinc - Coated steels, Orlando, Floride, Iron & and steel society, pages 405–415.

DURBIN, P.A. ET PETTERSSON REIF, B.A. (2000). *Statistical theory and modeling for turbulent flows*. John Wilew & Sons ltd, West Sussex, Angleterre.

GAGNÉ, M. ET AJERSCH, F. (1995). Galvanizing bath water model tests by monitoring ph changes from localized acid additions. Galvatech 1995, Chicago, États-Unis, Iron & and steel society, pages 687–694.

GAGNÉ, M. ET GAUG, M. (1998). Numerical modeling of fluid flow patterns in a continuous galvanizing bath. Galvatech 1998, Chiba, Japon, Iron & and steel society, pages 90–95.

GAGNÉ, M. , PARÉ, A. ET AJERSCH, F. (1992). Water modeling of a continuous galvanizing bath. 84th Galvanizers association meeting, Pittsburgh, PA, Iron & and steel society, pages 147–163.

GAUTHIER, MAXIME (1996). Croissance de la couche inhibitrice FeAlZn lors de la galvanisation en continu. Mémoire de Maîtrise, École Polytechnique de Montréal, Montréal.

GUTTMANN, M. , LEPRÊTRE, Y. , AUBRY, A. , ROCH, M.-J. , MOREAU, T. , DRILLET, P. , MATAIGNE, J.M. ET BAUDIN, H. (1995). Mechanisms of the galvanizing reaction influence of ti and p contents in steel and of its surface microstructure after annealing. Galvatech '95, Chicago, États-Unis, Iron and steel society, pages 295–307.

ILINCA, F. , HÉTU, J.-F. ET AJERSCH, F. (2003). Three-dimensional numerical simulation of turbulent flow and heat transfer in a continuous galvanizing bath. Numerical Heat Transfer, Part A, vol. 44, 463-482.

INCROPERA, F.P. ET DEWITT, D.P. (1990). *Fundamentals of heat and mass transfer*. John Wiley & Sons ltd, New-York, États-Unis.

ISOBE, M. (1992). Initial alloying behavior in the galvannealing process. Journal of Iron Steel Inst., vol. 5, no.5, 1629-1632.

KATO, C. , KOUMURA, H. , MOCHIZUKI, K. ET MORITO, N. (1995). Dross formation and flow phenomena in molten zinc bath. Galvatech '95, Chicago, États-Unis, Iron & and steel society, pages 801–806.

LAUNDER, B.E. ET SPALDING, D.B. (1974). The numerical computation of turbulent flows. Computer methods in applied mechanics ad engineering, vol. 3, no.7, 269-289.

MALLENS, R.M.M. , TREADGOLD, C.J. , VLOT, M.J. ET MEIJERS, S.M. (2001). Prevention of dross contamination in the corus ijmuiden hot dip galvanizing line. Galvatech 2001, Belgique, Iron & and steel society, pages 255–261.

MARDER, A.R. (2000). The metallurgy of zinc-coated steel. Progress in Materials Science, vol. 45, 191-271.

MCDERMID, J.R. ET THOMPSON, W.T (2002). Fe solubility in the zn-rich corner of the zn-al-fe system for use in continuous galvanizing. International Symposium on Zinc - Coated steels, Orlando, Floride, Iron & and steel society, pages 805–813.

PARÉ, A. , BINET, C. ET AJERSCH, F. (1995). Numerical simulation of 3-dimensional flow in a continuous strip galvanizing bath. Galvatech 1995, Chicago, États-Unis, Iron & and steel society, pages 695–706.

SANG JOON, L. , SEOK, K. , MIN SEOK, K. ET JAE HO, C. (2002). Flow field analysis inside a molten zn pot of the continuous hot-dip galvanizing process. ISIJ International, vol. 42, no.4, 407-413.

TANG, N.Y. (1995a). Modeling al enrichment in galvanized coatings. Metallurgical and materials transactions A, vol. 26A, no.7, 1699-1704.

TANG, N.Y. ET ADAMS, G.R. (1993). Studies on the inhibition of alloys formation in hot-dip galvanized coating. Warrendale, PA, TMS, pages 41–54.

TANG, N.Y. , ADAMS, G.R. ET KOLISNYK, P.S. (1995). On determining effective aluminum in continuous galvanizing baths. Galvatech 1995, Chicago, États-Unis, Iron & steel society, pages 777–781.

TANG, N.-Y. (septembre 1995b). Refined 450 °c isotherm of zn-fe-al diagram. Materials Science and Technology, vol. 11, 870-873.

TARQUINI, ISABELLE (2002). Caractérisation de revêtements galvanisés, d'aciers haute résistance. Mémoire de Maîtrise, École Polytechnique de Montréal, Montréal.

TOUSSAINT, PATRICK (1997). Contribution à l'étude de la formation de la couche d'inhibition de l'acier galvanisé en continu. Thèse de Doctorat, Université Libre de Bruxelles, Bruxelles.

TOUSSAINT, P. , SEGERS, L. , WINAND ET DUBOIS, M. (1998). Short time investigation of hot dip galvanizing of steel under controlled hydrodynamics. Galvatech '98, Chiba, Japon, Iron & Steel Society, pages 141–146.

UREDNICEK, M. ET KIRKALDY, J.S. (1973). Mechanism of iron attack inhibition arising from additions of aluminium to liquid zn(fe) during galvanizing

at 450 °c. Zeitschrift fur Metallkunde, vol. 64, no.12, 899-909.

YAMAGUCHI, H. ET HISAMATSU, Y. (1979). Reaction mechanism of the sheet galvanizing. Transactions ISIJ, vol. 19, no.11, 649-658.