

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À CHICOUTIMI

**THÈSE PRÉSENTÉE À
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À CHICOUTIMI
COMME EXIGENCE PARTIELLE
DU DOCTORAT EN INGÉNIERIE**

par

Chantal Binet

**MODÉLISATION NUMÉRIQUE, MODÉLISATION PHYSIQUE
ET VALIDATION DE L'ÉCOULEMENT DE CUVES
DE GALVANISATION**

12 Décembre 2000



Mise en garde/Advice

Afin de rendre accessible au plus grand nombre le résultat des travaux de recherche menés par ses étudiants gradués et dans l'esprit des règles qui régissent le dépôt et la diffusion des mémoires et thèses produits dans cette Institution, **l'Université du Québec à Chicoutimi (UQAC)** est fière de rendre accessible une version complète et gratuite de cette œuvre.

Motivated by a desire to make the results of its graduate students' research accessible to all, and in accordance with the rules governing the acceptance and diffusion of dissertations and theses in this Institution, the **Université du Québec à Chicoutimi (UQAC)** is proud to make a complete version of this work available at no cost to the reader.

L'auteur conserve néanmoins la propriété du droit d'auteur qui protège ce mémoire ou cette thèse. Ni le mémoire ou la thèse ni des extraits substantiels de ceux-ci ne peuvent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

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

Aux témoins de mes nuits blanches.

RÉSUMÉ

La galvanisation des tôles d'acier est un procédé où l'écoulement ainsi que le transport de l'aluminium dans le bain de zinc liquide peuvent affecter la formation de la couche inhibitrice. Une revue de la littérature sur les travaux effectués pour comprendre l'écoulement et le transport de l'aluminium dans le bain a été effectuée. La complexité de l'écoulement dans le bain a été démontré par des travaux antérieurs qui ont été fait en utilisant majoritairement la visualisation de l'écoulement à l'aide de modèles à eau et la modélisation numérique par éléments finis. Le présent projet consiste à compléter la compréhension de l'écoulement dans la cuve de galvanisation en utilisant trois outils spécifiques soit, la modélisation numérique, la modélisation physique et des tests industriels. Chacun des essais et calculs effectués à l'aide de ces trois méthodes a permis de valider le modèle numérique, de mieux détailler l'effet de certains paramètres sur l'écoulement et aussi de voir l'effet d'additions et de changements de température dans un bain industriel.

L'étude de l'écoulement du bain de galvanisation a été effectuée à l'aide d'un modèle à eau et d'un modèle numérique. Le modèle à eau a servi à visualiser l'écoulement dans la cuve à l'aide d'un faisceau et de fluorescéine comme traceur. De nombreux plans ont été enregistrés sur cassette vidéo. L'observation de l'écoulement montre que la présence ou l'absence des rouleaux affecte l'écoulement, particulièrement pour les temps de mélange de la cuve. De la même façon, la présence d'un plaque déflectrice modifie les temps de mélange et agit comme une section de prémélange. L'angle d'inclinaison de la courroie modifie aussi l'écoulement en agrandissant la zone morte de l'arrière. Les observations ont aussi montré que l'écoulement est parfois asymétrique.

La visualisation de l'effet de la présence des couteaux à air sur l'écoulement dans le bain a permis de conclure que ceux-ci ne contribuaient pas de manière significative au mélange. Il est donc inutile d'ajouter leur présence au modèle numérique.

Les mesures de vitesse dans le bain à eau montrent un profil d'écoulement semblable à celui calculé dans le modèle numérique. La principale différence réside dans l'amortissement que subit la grandeur de la vitesse lorsqu'on s'éloigne des zones de grandes perturbations, soit près des rouleaux et de la feuille. Un maillage plus raffiné ainsi qu'un modèle de turbulence qui épouse mieux l'écoulement sont à suggérer pour les modifications ultérieures. Les calculs de turbulence ont montré que

l'écoulement est beaucoup plus turbulent près de la feuille et des rouleaux que dans le reste du bain. De plus, au centre du bain l'écoulement est plus turbulent qu'au bas du bain.

La modélisation numérique de l'ajout d'inducteurs montre que ceux-ci peuvent affecter seulement de façon très légère l'écoulement à l'arrière du bain. Il est suggéré d'inclure l'effet thermique au modèle pour vérifier si cet effet reste négligeable.

Les tests industriels ont permis de confirmer que la température affecte la teneur en aluminium du bain et la formation des intermétalliques. Les mesures de l'aluminium effectif ont permis de voir que la région arrière du bain est très peu agitée et que celle de l'avant l'est plus.

Finalement, l'ensemble de cette étude permet de conclure que la modélisation numérique de l'écoulement dans une cuve de galvanisation, à l'aide de la méthode des éléments finis, peut être utilisée et qu'elle est représentative de l'écoulement rencontré en pratique.

REMERCIEMENTS

Je désire remercier, avant tout, M. Frank Ajersch, professeur du département de génie physique et de génie des matériaux (École Polytechnique de Montréal), qui m'a toujours offert son support scientifique, moral et monétaire tout au long de ce projet. Je connais maintenant M. Ajersch depuis plus de sept ans et au cours de ces sept années, il est devenu pour moi une personne d'importance au niveau professionnel et aussi un collègue. Sans M. Ajersch, ce travail, qui a nécessité beaucoup d'énergie de la part de tous, n'aurait pu être accompli.

Je désire aussi remercier les gens de l'UQAC, qui m'ont soutenu pendant la réalisation de ce projet. Tout d'abord, je remercie M. Bui pour son support et son aide pour organiser mon cheminement à l'UQAC, ce qui, je sais, n'était pas toujours facile. Un très grand merci à l'équipe technique de l'UQAC, tout particulièrement Patrice Paquette, technicien du GRIPS qui n'a pas de pareil quand il s'agit de créer ou de modifier un montage expérimental. Merci aussi à Robert Forcier (Bob) pour avoir enduré la montréalaise pendant près de quatre ans.

Les tests industriels n'auraient sans doute pas pu être réalisés sans le support de l'ILZRO qui a contribué à ce projet. De plus, je désire remercier le personnel de Bethlehem Steel avec qui il a été très agréable de travailler. De même, pour le personnel de Cominco qui a fourni le matériel de mesure en industrie.

Ce projet a été réalisé avec l'aide de bourses d'études offertes par le CRSNG. Je désire remercier cet organisme pour son support financier.

Enfin, je désire remercier mes parents, qui sont merveilleux, et qui m'ont toujours donné tout ce qu'ils pouvaient m'offrir, de même que tous mes amis(es) des quatre coins du Québec qui m'ont offert support moral et matériel durant mes longues années d'études.

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES TABLEAUX	x
LISTE DES FIGURES	xi
CHAPITRE 1	
INTRODUCTION ET OBJECTIF DU PROJET	1
1.1 Le procédé de galvanisation	1
1.2 Objectif du projet	6
CHAPITRE 2	
REVUE DE LA LITTÉRATURE	9
2.1 Le bain de galvanisation	9
2.1.1 Composition du zinc liquide et procédures d'addition	10
2.1.2 La couche inhibitrice	12
2.1.3 Les intermétalliques	15
2.1.4 Diagramme d'équilibre Fe-Zn-Al	18
2.2 La modélisation	24
2.2.1 Le modèle à eau	24

2.2.2 Modèle numérique	42
2.3 Les couteaux à air	64
2.3.1 Épaisseur de fluide sans les jets	66
2.3.2 Épaisseur de revêtement avec jets	72
2.3.3 Éclaboussement et autres phénomènes	81
2.4 Inducteurs	82
2.4.1 Écoulement dans les inducteurs	88

CHAPITRE 3

 CONSIDÉRATIONS EXPÉRIMENTALES ET NUMÉRIQUES	90
3.1 Modèle à eau	91
3.1.1 Visualisation de l'écoulement	94
3.1.1.1 Visualisation du retour de fluide au niveau des couteaux à air	96
3.1.2 Mesures de vitesse	99
3.1.2.1 Vélocimétrie laser	100
3.1.2.2 Expérimentation	106
3.1.3 Calculs de turbulence	109
3.1.3.1 La nature de la turbulence	110
3.1.3.2 Expérimentation	112
3.2 Modèle numérique	113

3.3 Tests industriels	116
-----------------------------	-----

CHAPITRE 4

RÉSULTATS ET DISCUSSION

.....	123
4.1 Modèle à eau	123
4.1.1 Visualisation de l'écoulement	124
4.1.1.1 Écoulement avec deux rouleaux, angle de 45° sans plaque	124
4.1.1.1.1 Détails de l'écoulement dans la cloche ..	165
4.1.1.2 Écoulement avec un rouleau, angle de 45° sans plaque	168
4.1.1.3 Écoulement sans rouleau, angle de 45° sans plaque	173
4.1.1.4 Écoulement sans rouleau, angle de 32° sans plaque	177
4.1.1.5 Écoulement sans rouleau, angle de 45° avec plaque	191
4.1.1.6 Écoulement sans rouleau, angle de 32° avec plaque	201
4.1.1.7 Visualisation du retour de fluide au niveau des couteaux à air	205
4.1.2 Temps de mélange de la cuve de galvanisation	217
4.1.3 Mesures de vitesse	221
4.1.4 Calculs de turbulence	225

4.2 Modèle numérique	253
4.3 Tests industriels	267
4.3.1 Première série de test: Effet du chauffage par induction seulement	267
4.3.1.1 Effet des additions de lingots jumbo	269
4.3.1.2 Effet des changements de la température	269
4.3.2 Deuxième série: Effet des additions avec chauffage	273
4.3.2.1 Résultats des mesures des sondes Yamari	273
4.3.2.2 Résultats des analyses	279
4.3.3 Troisième série: Effet de la position des additions, sans chauffage	286
4.3.3.1 Résultats des mesures des sondes Yamari	286
4.3.3.2 Résultats des analyses	292
4.3.4 Quatrième test: Transition de galvanisé allié à galvanisé	298
4.3.4.1 Résultats des mesures des sondes Yamari	298
4.3.4.2 Résultats des analyses	301
4.3.5 Discussion sur les tests industriels	308
4.3.5.1 Effet de la température	308
4.3.5.2 Mixage du bain	310
4.3.5.2.1 Croisement des capteurs	311
4.3.5.3 Temps de mélange	312

4.3.5.4 Endroit des additions	313
4.4 Discussion générale sur la validation de l'écoulement	314
4.4.1 Comparaison de l'écoulement visualisé à l'aide du modèle à eau avec les modèles à eau de la littérature	315
4.4.2 Comparaison de l'écoulement visualisé à l'aide du modèle à eau avec les modèles numériques	317
4.4.3 Discussion sur les mesures de vitesse et les calculs de turbulence effectués à l'aide du modèle à eau	318
4.4.4 Comparaison des temps de mélange et des temps d'apparition de traceur dans les différentes zones	321
CHAPITRE 5	
CONCLUSION	323
BIBLIOGRAPHIE	329
ANNEXE A: Programme FORTRAN pour le calcul de turbulence	339
ANNEXE B: Calculs de vitesse le long de droites	342
ANNEXE C: Mesures d'aluminium effectif et de température	380

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 4.1 Temps de mélange en fonction des différentes configurations du modèle à eau	218
Tableau 4.2 Événements survenus lors des tests industriels effet de la capacité des inducteurs	271
Tableau 4.3 Événements survenus lors des tests industriels effet de la capacité des inducteurs et de l'ajout de traceurs	276
Tableau 4.4 Analyses des échantillons prélevés et mesures des sondes, effet de la capacité des inducteurs et de l'ajout de traceurs	282
Tableau 4.5 Événements survenus lors des tests industriels effet des additions de traceur	290
Tableau 4.6 Analyses des échantillons prélevés et mesures des sondes, effet des additions de traceur	294
Tableau 4.7 Événements survenus lors des tests industriels, effet de la transition de galvanisé allié à galvanisé	300
Tableau 4.8 Analyses des échantillons prélevés et mesures des sondes, effet de la transition de galvanisé allié à galvanisé	303
Tableau 4.9 Résumé des temps de mélange et d'apparition évalués à l'aide des différents modèles	322

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 Schéma d'une ligne de galvanisation	3
Figure 2.1 Schéma d'un bain de galvanisation	12
Figure 2.2 Solubilité du fer en fonction de la teneur en aluminium et de la température (Bélisle et al, 1991)	20
Figure 2.3 Solubilité du fer dans le zinc liquide en fonction de la teneur en aluminium et de la température: a) Surface de solubilité (Tang 1995) b) Coin riche en zinc (Tang, Adams et Kolisnky, 1995)	23
Figure 2.4 Schéma du modèle à eau (Ajersch, Gagne et Paré, 1993)	25
Figure 2.5 Écoulement observé dans un plan horizontal (Ajersch, Gagné et Paré, 1993)	26
Figure 2.6 Écoulement observé dans un plan près des parois (Ajersch, Gagné et Paré, 1993)	28
Figure 2.7 Écoulement observé dans un plan vertical (Ajersch, Gagné et Paré, 1993)	28
Figure 2.8 Schéma de la position des additions et des prises de mesures	29
Figure 2.9 Courbes de concentration de HCl en fonction du temps pour des additions sous forme d'impulsion à l'arrière du bain (Ajersch et Gagné, 1995)	31
Figure 2.10 Courbes de concentration de HCl en fonction du temps pour des additions sous forme d'impulsion à l'avant du bain (Ajersch et Gagné, 1995)	31

Figure 2.11 Courbes de concentration de HCl en fonction du temps pour des additions sous forme d'impulsion au milieu du bain (Ajersch et Gagné, 1995)	32
Figure 2.12 Courbes de concentration de HCl en fonction du temps pour des additions en continu à l'arrière du bain (Ajersch et Gagné, 1995)	32
Figure 2.13 Courbes de concentration de HCl en fonction du temps pour des additions en continu à l'avant du bain (Ajersch et Gagné, 1995)	33
Figure 2.14 Modèle à eau de Kato et al (1995)	35
Figure 2.15 Écoulement observé dans un plan au centre du bain du modèle 1/5 d'un bain réel ($v=1,5$ m/s) (Iguchi et al, 1996)	36
Figure 2.16 Écoulement observé près de la surface du bain du modèle 1/5 d'un bain réel ($v=1,5$ m/s) (Iguchi et al, 1996)	36
Figure 2.17 Vecteurs de vitesse mesurés par vélocimétrie laser au centre du bain ($v=1,5$ m/s) (Iguchi et al, 1996)	39
Figure 2.18 Composante x de la vitesse mesurée par vélocimétrie laser près de la surface du bain ($v=1,5$ m/s) (Iguchi et al, 1996)	39
Figure 2.19 Lignes de contour de la racine carrée de la moyenne des composantes turbulentes (V') dans un plan au centre du bain ($v=1,5$ m/s) (Iguchi et al, 1996)	40
Figure 2.20 Distribution de la valeur de la composante u' de turbulence près de la surface du bain ($v=1,5$ m/s) (Iguchi et al, 1996)	40
Figure 2.21 Lignes de contour de la composante turbulente de l'écoulement (u', v') dans un plan au centre du bain ($v=1,5$ m/s) (Iguchi et al, 1996)	41
Figure 2.22 Schéma de la géométrie et des conditions frontières appliquées au modèle numérique	46
Figure 2.23 Écoulement calculé à l'aide du modèle numérique, vue d'un plan au centre (Ajersch, Binet et Paré, 1995)	47

Figure 2.24 Écoulement calculé à l'aide du modèle numérique, vue d'un plan près des parois (Ajersch, Binet et Paré, 1995)	48
Figure 2.25 Écoulement calculé à l'aide du modèle numérique, vue d'un plan près de la surface (Ajersch, Binet et Paré, 1995)	49
Figure 2.26 Répartition de l'aluminium dans le modèle numérique en fonction du temps pour un ajout à l'arrière après 5, 20 et 45 secondes.	50
Figure 2.27 Écoulement calculé à l'aide d'un modèle numérique, vue d'un plan au centre pour un bain à deux rouleaux stabilisateurs (Gagné et Gaug, 1998)	52
Figure 2.28 Écoulement calculé à l'aide d'un modèle numérique, vue d'un plan au centre pour un bain avec un seul rouleau stabilisateur (Gagné et Gaug, 1998)	52
Figure 2.29 Écoulement calculé à l'aide d'un modèle numérique, vue d'un plan au centre pour un bain avec les inducteurs en fonctionnement (Gagné et Gaug, 1998)	53
Figure 2.30 Écoulement calculé à l'aide d'un modèle numérique, vue d'un plan au centre pour un bain de plus petite grandeur (Gagné et Gaug, 1998)	53
Figure 2.31 Maillage du bain de galvanisation et de la gorge des inducteurs, vue de l'arrière (Ajersch et Binet, 1999)	55
Figure 2.32 Effet de la présence de la plaque déflectrice sur l'écoulement dans le bain, plan au centre (Hétu et Perrault, 1998)	58
Figure 2.33 Effet de la présence de la plaque déflectrice sur l'écoulement dans le bain plan qui traverse les bras des rouleaux (Hétu et Perrault, 1998)	59
Figure 2.34 Effet de la vitesse de la feuille sur l'écoulement a)0,5 m/s, b)1,0 m/s c)2,0 m/s (Hétu et Perrault, 1998)	60
Figure 2.35 Effet de la vitesse de la feuille sur l'écoulement à l'intérieur de la coche a)0,5 m/s, b)1,0 m/s c)2,0 m/s (Hétu et Perrault, 1998)	61
Figure 2.36 Effet de la largeur de la feuille sur l'écoulement à l'intérieur de la cloche a) 1,73 m, b) 1,5 m c) 1,27 m (Hétu et Perrault, 1998)	62

Figure 2.37 Effet de la présence des inducteurs sur l'écoulement à l'arrière du bain (vue de la gorge), capacité des inducteurs: a) 100% b) 10% (Hétu et Perrault, 1998)	63
Figure 2.38 Représentation en six régions du procédé d'essuyage de la feuille à l'aide des couteaux à air (Thornton et Graff, 1976)	65
Figure 2.39 Masse de revêtement en fonction de la vitesse de la feuille selon divers modèles théoriques et expérimentaux (Ellen et Tu, 1976) ..	67
Figure 2.40 Schéma d'un jet d'air libre sous la vitesse du son, bidimensionnel et turbulent utilisé dans la description analytique de Thornton et Graff (1976)	76
Figure 2.41 Représentation schématique d'une méthode pour déduire le profil de pression stagnante d'un jet de gaz selon Thornton et Graff (1976)	77
Figure 2.42 Valeurs adimensionnelles de la pression, du cisaillement, de l'épaisseur de revêtement et de la vitesse en fonction de la position des couteaux selon Ellen et Tu (1976)	80
Figure 2.43 Photographie de la feuille qui sort du bain et de la formation des vagues	83
Figure 2.44 Géométrie des inducteurs tels qu'utilisés pour le procédé de galvanisation (Ajax Magnethermic)	85
Figure 2.45 Position des inducteurs sur un bain de galvanisation (Ajax Magnethermic)	86
Figure 2.46 Schéma de l'écoulement dans la gorge et dans le bain dû à la présence d'inducteurs	87
Figure 3.1 Schéma du modèle à eau 1)moteur à vitesse variable, 2) couteau à air, 3) cuve de plexiglass, 4) rouleaux stabilisateurs 5) rouleau principal 6) courroie 7) cloche.	92
Figure 3.2 Schéma des plans choisis pour la visualisation de l'écoulement ...	95
Figure 3.3 Régions d'observation de l'écoulement sous le couteau à air A) retour de fluide B) dans la cuve	98

Figure 3.4 Schéma de la sonde optique et de franges (Instruction Manual Model 9230 Colourlink™ Multicolor Receiver)	101
Figure 3.5 Schéma du système de vélocimétrie laser	102
Figure 3.6 Vue graphique qui indique de quelle façon le décalage de fréquences élimine les ambiguïtés de sens d'écoulement (Instruction Manual, Model 9230 Colorlink™ Multicolor Receiver)	105
Figure 3.7 Position des lectures prises dans le modèle à eau	108
Figure 3.8 Exemple de lecture de vitesse	109
Figure 3.9 Vue de dessus du bain montrant le positionnement des quatre senseurs (S1, S2, S3 et S4) et la position des additions (A)	120
Figure 3.10 Sonde Yamari installée dans le bain de galvanisation de Burns Harbor	121
Figure 3.11 Schéma d'une sonde Yamari (Yamaguchi et al, 1995)	122
Figure 4.1 a)Visualisation au centre du bain (plan A) avec 2 rouleaux, sans plaque et un angle de courroie de 45° pour des temps de 1, 2 et 4 secondes après l'injection	131
Figure 4.1 b)Visualisation au centre du bain (plan A) avec 2 rouleaux, sans plaque et un angle de courroie de 45° pour des temps de 7, 24 et 29 secondes après l'injection	132
Figure 4.2 a)Visualisation entre la courroie et les bras (plan E) avec 2 rouleaux, sans plaque et un angle de 45° pour des temps de 3, 5 et 7 secondes après l'injection	134
Figure 4.2 b)Visualisation entre la courroie et les bras (plan E) avec 2 rouleaux, sans plaque et un angle de 45° pour des temps de 11, 15 et 21 secondes après l'injection	135
Figure 4.3 a)Visualisation près des parois, à l'arrière (plan G) avec 2 rouleaux, sans plaque et un angle de 45° pour des temps de 5, 11 et 14 secondes après l'injection	137
Figure 4.3 b)Visualisation près des parois, à l'arrière (plan G) avec 2 rouleaux, sans plaque et un angle de 45° pour des temps de 17, 20 et 24 secondes après l'injection	138

Figure 4.4 Visualisation entre la courroie et les bras, à l'avant (plan E) avec 2 rouleaux, sans plaque et un angle de 45° pour des temps de 3, 4 et 7 secondes après l'injection	140
Figure 4.5 a)Visualisation d'un plan horizontal (plan I) avec 2 rouleaux, sans plaque et un angle de 45° pour des temps de 4, 6 et 12 secondes après l'injection	142
Figure 4.5 b)Visualisation d'un plan horizontal (plan I) avec 2 rouleaux, sans plaque et un angle de 45° pour des temps de 16, 24 et 30 secondes après l'injection	143
Figure 4.6 a)Visualisation d'un plan vu de l'arrière (plan 1) avec 2 rouleaux, sans plaque et un angle de 45° pour des temps de 24, 26 et 28 secondes après l'injection	145
Figure 4.6 b)Visualisation d'un plan vu de l'arrière (plan 1) avec 2 rouleaux, sans plaque et un angle de 45° pour des temps de 30, 32 et 38 secondes après l'injection	146
Figure 4.7 a)Visualisation d'un plan vu de l'arrière (plan 2) avec 2 rouleaux, sans plaque et un angle de 45° pour des temps de 15, 19 et 21 secondes après l'injection	148
Figure 4.7 b)Visualisation d'un plan vu de l'arrière (plan 2) avec 2 rouleaux, sans plaque et un angle de 45° pour des temps de 23, 25 et 27 secondes après l'injection	148
Figure 4.8 a)Visualisation d'un plan vu de l'arrière (plan 3) avec 2 rouleaux, sans plaque et un angle de 45° pour des temps de 13, 15 et 17 secondes après l'injection	151
Figure 4.8 b)Visualisation d'un plan vu de l'arrière (plan 3) avec 2 rouleaux, sans plaque et un angle de 45° pour des temps de 19, 21 et 27 secondes après l'injection	152
Figure 4.9 a)Visualisation d'un plan sur le côté de la cloche (plan 4) avec 2 rouleaux, sans plaque et un angle de 45° pour des temps de 12, 13 et 15 secondes après l'injection	154
Figure 4.9 b)Visualisation d'un plan sur le côté de la cloche (plan 4) avec 2 rouleaux, sans plaque et un angle de 45° pour des temps de 16, 17 et 23 secondes après l'injection	155

Figure 4.10 a)Visualisation au milieu du bain (plan A) avec 2 rouleaux, sans plaque et un angle de 45° pour des temps de 3, 3.5 et 4.5 secondes après l'injection	157
Figure 4.10 b)Visualisation au milieu du bain (plan A) avec 2 rouleaux, sans plaque et un angle de 45° pour des temps de 6.5, 10 et 12 secondes après l'injection	158
Figure 4.11 a)Visualisation au milieu du bain près du rouleau, avec 2 rouleaux, sans plaque et un angle de 45° pour des temps de 0.5, 0.77 et 1.13 secondes après l'injection	160
Figure 4.11 b)Visualisation au milieu du bain près du rouleau, avec 2 rouleaux, sans plaque et un angle de 45° pour des temps de 1.97, 4 et 6 secondes après l'injection	161
Figure 4.12 a)Visualisation près des parois (plan G), avec 2 rouleaux, sans plaque et un angle de 45° pour des temps de 4, 7 et 10 secondes après l'injection	163
Figure 4.12 b)Visualisation près des parois (plan G), avec 2 rouleaux, sans plaque et un angle de 45° pour des temps de 13, 16 et 19 secondes après l'injection	164
Figure 4.13 Visualisation du côté arrière de la cloche (plan A), avec 2 rouleaux, sans plaque et un angle de 45°	166
Figure 4.14 Visualisation du côté arrière de la cloche (plan A) avec 2 rouleaux, sans plaque et un angle de 45°	167
Figure 4.15 a)Visualisation entre la courroie et les bras (plan E) avec 1 rouleau, sans plaque et un angle de 45° pour des temps de 3, 5 et 7 secondes après l'injection	171
Figure 4.15 b)Visualisation entre la courroie et les bras (plan E) avec 1 rouleau, sans plaque et un angle de 45° pour des temps de 11, 15 et 22 secondes après l'injection	172
Figure 4.16 a)Visualisation entre la courroie et les bras (plan E) sans rouleau, sans plaque et un angle de 45° pour des temps de 3, 5 et 7 secondes après l'injection	175

Figure 4.16 b) Visualisation entre la courroie et les bras (plan E) sans rouleau, sans plaque et un angle de 45° pour des temps de 11, 15 et 21 secondes après l'injection	176
Figure 4.17 a) Visualisation au centre du bain (plan A) sans rouleau, sans plaque et un angle de courroie de 32° pour des temps de 2, 3 et 4 secondes après l'injection	181
Figure 4.17 b) Visualisation au centre du bain (plan A) sans rouleau, sans plaque et un angle de courroie de 32° pour des temps de 6, 14 et 26 secondes après l'injection	181
Figure 4.18 a) Visualisation entre la courroie et les bras (plan E) sans rouleau, sans plaque et un angle de 32° pour des temps de 5, 7 et 10 secondes après l'injection	184
Figure 4.18 b) Visualisation entre la courroie et les bras (plan E) sans rouleau, sans plaque et un angle de 32° pour des temps de 14, 20 et 31 secondes après l'injection	184
Figure 4.19 a) Visualisation près des parois (plan G), sans rouleau, sans plaque et un angle de 32° pour des temps de 6, 9 et 12 secondes après l'injection	186
Figure 4.19 b) Visualisation près des parois (plan G), sans rouleau, sans plaque et un angle de 32° pour des temps de 15, 18 et 21 secondes après l'injection	187
Figure 4.20 a) Visualisation au milieu du bain, sans rouleau, sans plaque et un angle de 32° pour des temps de 2, 3 et 4 secondes après l'injection	189
Figure 4.20 b) Visualisation au milieu du bain, sans rouleau, sans plaque et un angle de 32° pour des temps de 5, 6 et 7 secondes après l'injection	190
Figure 4.21 a) Visualisation au centre du bain (plan A) sans rouleau, avec plaque et un angle de courroie de 45° pour des temps de 2, 3 et 5 secondes après l'injection	193
Figure 4.21 b) Visualisation au centre du bain (plan A) sans rouleau, avec plaque et un angle de courroie de 45° pour des temps de 8, 16 et 26 secondes après l'injection	194

Figure 4.22 a)Visualisation entre la courroie et les bras (plan E) sans rouleau, avec plaque et un angle de 45° pour des temps de 3, 5 et 7 secondes après l'injection	196
Figure 4.22 b)Visualisation entre la courroie et les bras (plan E) sans rouleau, avec plaque et un angle de 45° pour des temps de 10, 17 et 23 secondes après l'injection	197
Figure 4.23 a)Visualisation près des parois (plan G), sans rouleau, avec plaque et un angle de 32° pour des temps de 4, 8 et 10 secondes après l'injection	199
Figure 4.23 b)Visualisation près des parois (plan G), sans rouleau, avec plaque et un angle de 32° pour des temps de 13, 16 et 47 secondes après l'injection	200
Figure 4.24 a)Visualisation entre la courroie et les bras (plan E) sans rouleau, avec plaque et un angle de 32° pour des temps de 3, 5 et 7 secondes après l'injection	203
Figure 4.24 b)Visualisation entre la courroie et les bras (plan E) sans rouleau, avec plaque et un angle de 32° pour des temps de 10, 17 et 30 secondes après l'injection	204
Figure 4.25 Effet de la vitesse de la feuille sur la formation du ménisque à la surface du bain, vitesses: 0.54, 0.95, 1.42 m/s	209
Figure 4.26 Effet de la hauteur du couteau par rapport à la surface (vitesse de la feuille: 1.42 m/s, distance: 1.8 cm), hautes: 17.8, 13.5, 8.5 cm	210
Figure 4.27 Effet de la distance du couteau par rapport à la feuille (vitesse de la feuille: 0.95 m/s, hauteur: 17.8 cm), distances: 0.75, 1.8, 2.6 cm	211
Figure 4.28 Effet de la vitesse de la feuille (hauteur: 8.5 cm, distance: 1.8 cm), vitesses de la feuille: 0.54, 0.95, 1.42 cm	212
Figure 4.29 a)Visualisation de l'écoulement dans la zone de sortie de la feuille sans couteau (vitesse de la feuille: 1.42 m/s).	213
Figure 4.29 b)Visualisation de l'écoulement dans la zone de sortie de la feuille sans couteau (vitesse de la feuille: 1.42 m/s).	214

Figure 4.30 a) Visualisation de l'écoulement dans la zone de sortie de la feuille avec couteau (vitesse de la feuille: 1.42 m/s, hauteur: 18.5 cm, distance: 1.8 cm)	215
Figure 4.30 b) Visualisation de l'écoulement dans la zone de sortie de la feuille avec couteau (vitesse de la feuille: 1.42 m/s, hauteur: 18.5 cm, distance: 1.8 cm)	216
Figure 4.31 Comparaison des composantes x et y des vitesses adimensionnelles mesurées et calculées le long d'une droite passant à $y=0.06m$, $z=0.225m$ ($V_{feuille}=1,5m/s$, $Re=10^5$)	228
Figure 4.32 Comparaison des composantes x et y des vitesses adimensionnelles mesurées et calculées le long d'une droite passant à $y=0.125m$, $z=0.225m$ ($V_{feuille}=1,5m/s$, $Re=10^5$)	229
Figure 4.33 Comparaison des composantes x et y des vitesses adimensionnelles mesurées et calculées le long d'une droite passant à $y=0.18m$, $z=0.225m$ ($V_{feuille}=1,5m/s$, $Re=10^5$)	230
Figure 4.34 Comparaison des composantes x et y des vitesses adimensionnelles mesurées et calculées le long d'une droite passant à $y=0.225m$, $z=0.225m$ ($V_{feuille}=1,5m/s$, $Re=10^5$)	231
Figure 4.35 Comparaison des composantes x et y des vitesses adimensionnelles mesurées et calculées le long d'une droite passant à $y=0.30$, $z=0.225m$ ($V_{feuille}=1,5m/s$, $Re=10^5$)	232
Figure 4.36 Comparaison des composantes x et y des vitesses adimensionnelles mesurées et calculées le long d'une droite passant à $y=0.345m$, $z=0.225m$ ($V_{feuille}=1,5m/s$, $Re=10^5$)	233
Figure 4.37 Comparaison des composantes x et y des vitesses adimensionnelles mesurées et calculées le long d'une droite passant à $y=0.06m$, $z=0.125m$ ($V_{feuille}=1,5m/s$, $Re=10^5$)	234
Figure 4.38 Comparaison des composantes x et y des vitesses adimensionnelles mesurées et calculées le long d'une droite passant à $y=0.125m$, $z=0.125m$ ($V_{feuille}=1,5m/s$, $Re=10^5$)	235
Figure 4.39 Comparaison des composantes x et y des vitesses adimensionnelles mesurées et calculées le long d'une droite passant à $y=0.18m$, $z=0.125m$ ($V_{feuille}=1,5m/s$, $Re=10^5$)	236

- Figure 4.40 Comparaison des composantes x et y des vitesses adimensionnelles mesurées et calculées le long d'une droite passant à $y=0.225\text{m}$, $z=0.125\text{m}$ ($V_{\text{feuille}}=1,5\text{m/s}$, $Re=10^5$) 237
- Figure 4.41 Comparaison des composantes x et y des vitesses adimensionnelles mesurées et calculées le long d'une droite passant à $y=0.30\text{m}$, $z=0.125\text{m}$ ($V_{\text{feuille}}=1,5\text{m/s}$, $Re=10^5$) 238
- Figure 4.42 Comparaison des composantes x et y des vitesses adimensionnelles mesurées et calculées le long d'une droite passant à $y=0.345\text{m}$, $z=0.125\text{m}$ ($V_{\text{feuille}}=1,5\text{m/s}$, $Re=10^5$) 239
- Figure 4.43 Comparaison des composantes x et y des vitesses adimensionnelles mesurées et calculées le long d'une droite passant à $y=0.06\text{m}$, $z=0.03\text{m}$ ($V_{\text{feuille}}=1,5\text{m/s}$, $Re=10^5$) 240
- Figure 4.44 Comparaison des composantes x et y des vitesses adimensionnelles mesurées et calculées le long d'une droite passant à $y=0.125\text{m}$, $z=0.03\text{m}$ ($V_{\text{feuille}}=1,5\text{m/s}$, $Re=10^5$) 241
- Figure 4.45 Comparaison des composantes x et y des vitesses adimensionnelles mesurées et calculées le long d'une droite passant à $y=0.18\text{m}$, $z=0.03\text{m}$ ($V_{\text{feuille}}=1,5\text{m/s}$, $Re=10^5$) 242
- Figure 4.46 Comparaison des composantes x et y des vitesses adimensionnelles mesurées et calculées le long d'une droite passant à $y=0.225\text{m}$, $z=0.03\text{m}$ ($V_{\text{feuille}}=1,5\text{m/s}$, $Re=10^5$) 243
- Figure 4.47 Comparaison des composantes x et y des vitesses adimensionnelles mesurées et calculées le long d'une droite passant à $y=0.30\text{m}$, $z=0.03\text{m}$ ($V_{\text{feuille}}=1,5\text{m/s}$, $Re=10^5$) 244
- Figure 4.48 Comparaison des composantes x et y des vitesses adimensionnelles mesurées et calculées le long d'une droite passant à $y=0.345\text{m}$, $z=0.03\text{m}$ ($V_{\text{feuille}}=1,5\text{m/s}$, $Re=10^5$) 245
- Figure 4.49 Comparaison de la composante z des vitesses adimensionnelles mesurées et calculées le long d'une droite passant à $y=0.06\text{m}$, $z=0.03\text{m}$ ($V_{\text{feuille}}=1,5\text{m/s}$, $Re=10^5$) 246
- Figure 4.50 Comparaison de la composante z des vitesses adimensionnelles mesurées et calculées le long d'une droite passant à $y=0.125\text{m}$, $z=0.03\text{m}$ ($V_{\text{feuille}}=1,5\text{m/s}$, $Re=10^5$) 247

Figure 4.51 Comparaison de la composante z des vitesses adimensionnelles mesurées et calculées le long d'une droite passant à $y=0.225\text{m}$, $z=0.03\text{m}$ ($V_{\text{feuille}}=1,5\text{m/s}$, $\text{Re}=10^5$)	248
Figure 4.52 Calculs des facteurs de turbulence le long d'une droite passant à $y=0.06\text{m}$, $z=0.125\text{m}$	249
Figure 4.53 Calculs des facteurs de turbulence le long d'une droite passant à $y=0.06\text{m}$, $z=0.225\text{m}$	250
Figure 4.54 Calculs des facteurs de turbulence le long d'une droite passant à $y=0.125\text{m}$, $z=0.225\text{m}$	251
Figure 4.55 Calculs des facteurs de turbulence le long d'une droite passant à $y=0.225\text{m}$, $z=0.225\text{m}$	252
Figure 4.56 Écoulement calculé dans un plan xy au centre du bain	257
Figure 4.57 Écoulement calculé dans un plan xy situé au quart du rouleau ..	258
Figure 4.58 Écoulement calculé dans un plan zy entre la feuille et les bras des rouleaux	259
Figure 4.59 Écoulement calculé dans un plan xy situé entre la paroi du bain et les bras des rouleaux	260
Figure 4.60 Écoulement calculé dans un plan yz à l'avant du bain	261
Figure 4.61 Écoulement calculé dans un plan xz au centre du bain vue	262
Figure 4.62 Écoulement calculé dans un plan xz près de la surface	263
Figure 4.63 Écoulement calculé à l'intérieur de la cloche	264
Figure 4.64 Effet de la présence des inducteurs et de la gorge sur l'écoulement dans un plan yz	265
Figure 4.65 Effet de la présence des inducteurs et de la gorge sur l'écoulement dans un plan parallèle à la gorge	266
Figure 4.66 Mesures de l'aluminium et de la température, effet de la capacité des inducteurs	272

Figure 4.67 Mesures de l'aluminium et de la température effet de la capacité des inducteurs et de l'ajout de traceurs	277
Figure 4.68 Comparaison entre l'Al effectif mesuré et les valeurs d'aluminium total et effectif calculées, effet de la capacité des inducteurs et de l'ajout de traceurs	284
Figure 4.69 Comparaison entre les valeurs d'aluminium effectif calculées et mesurées, effet de la capacité des inducteurs et de l'ajout de traceurs	285
Figure 4.70 Mesures de l'aluminium et de la température effet des additions de traceurs	291
Figure 4.71 Comparaison entre l'Al effectif mesuré et les valeurs d'aluminium total et effectif calculées, effet des additions de traceurs	296
Figure 4.72 Comparaison entre les valeurs d'aluminium effectif calculées et mesurées, effet des additions de traceurs	297
Figure 4.73 Mesures de l'aluminium et de la température effet de la transition de galvanisé allié à galvanisé	302
Figure 4.74 Comparaison entre l'Al effectif mesuré et les valeurs d'aluminium total et effectif calculées, effet de la transition de galvanisé allié à galvanisé	306
Figure 4.75 Comparaison entre les valeurs d'aluminium effectif calculées et mesurées, effet de la transition de galvanisé allié à galvanisé	307

CHAPITRE 1

INTRODUCTION ET OBJECTIF DU PROJET

1.1 Le procédé de galvanisation

La galvanisation de l'acier est un moyen très couru et efficace pour protéger l'acier contre la corrosion. L'acier revêtu de sa couche galvanisée protectrice est utilisé pour de nombreuses applications telles que la construction de bâtiments, l'électroménager et l'automobile. La quantité d'acier galvanisé produit est en croissance chaque année et a atteint en 1996 jusqu'à 57.8 millions de tonnes métriques selon le "Pocket Guide to World Zinc" (1998).

Le procédé de galvanisation consiste à enduire d'une couche mince de zinc des matériaux d'acier. Cette couche de zinc étant anodique par rapport à l'acier, elle joue un rôle d'anode sacrificielle et protège l'acier de la corrosion. Il existe plusieurs méthodes pour enduire l'acier de zinc, par exemple, on peut mentionner la galvanisation à chaud par immersion et la déposition électrolytique de zinc. Dans ce projet, la galvanisation par trempage des tôles d'acier dans un bain de zinc liquide est considérée.

La galvanisation par trempage est très utilisée dans l'industrie afin de protéger contre la corrosion les tôles d'acier (figure 1.1). Dans ce procédé, la tôle d'acier, initialement sous forme de rouleaux, est entraînée dans diverses sections où elle subit des traitements adéquats. Dans un premier temps, la feuille d'acier est habituellement chauffée dans une atmosphère gazeuse de H_2/N_2 afin de réduire les oxydes en surface et pour recristalliser la structure des grains. Ensuite, la tôle est conduite dans un bain de zinc liquide à une vitesse allant de 0,5 à 3m/s. La feuille est amenée dans le réservoir via un conduit appelé la cloche (en anglais "snout"). Celle-ci est partiellement immergée dans le zinc liquide et sert à maintenir la tôle sous atmosphère contrôlée avant son entrée dans le bain. La feuille d'acier est entraînée dans le bain par le rouleau principal rotatif et est ensuite amenée vers la sortie du bain en étant préalablement maintenue par un ou deux rouleaux stabilisateurs. À sa sortie du bain, l'excédent de zinc est essuyé par des "couteaux" qui projettent un gaz à haute vitesse sur la tôle. La feuille est ensuite acheminée vers une zone de refroidissement lorsqu'on veut produire un revêtement galvanisé ou bien elle est conduite à un recuit avant d'être refroidie pour fabriquer un revêtement galvanisé allié. Finalement, la feuille peut subir certains traitements secondaires de surface pour améliorer sa formabilité, sa facilité d'entreposage, améliorer son aspect extérieur, etc.

Lors du procédé de galvanisation des feuilles d'acier par trempage dans le zinc liquide, on ajoute dans le bain de zinc une petite quantité d'aluminium (de 0.1 à 0.3% en poids d'Al). L'aluminium en présence dans le bain a la particularité d'inhiber, pour

une certaine période de temps d'immersion dans le fluide, les réactions entre le zinc liquide et le fer des tôles d'acier. Ceci permet d'obtenir un revêtement plus ductile qui ne s'écaille pas lors de la mise en forme.

Le fonctionnement d'une ligne de galvanisation est un procédé semi-continu où le bain de galvanisation peut être considéré comme un réacteur mélangé par le mouvement de la feuille et des rouleaux. Comme la feuille d'acier qui sort du bain consomme une certaine quantité d'aluminium et de fer en présence dans le bain, une alimentation discontinue d'alliage Zn-Al est apportée au bain sous forme de lingots

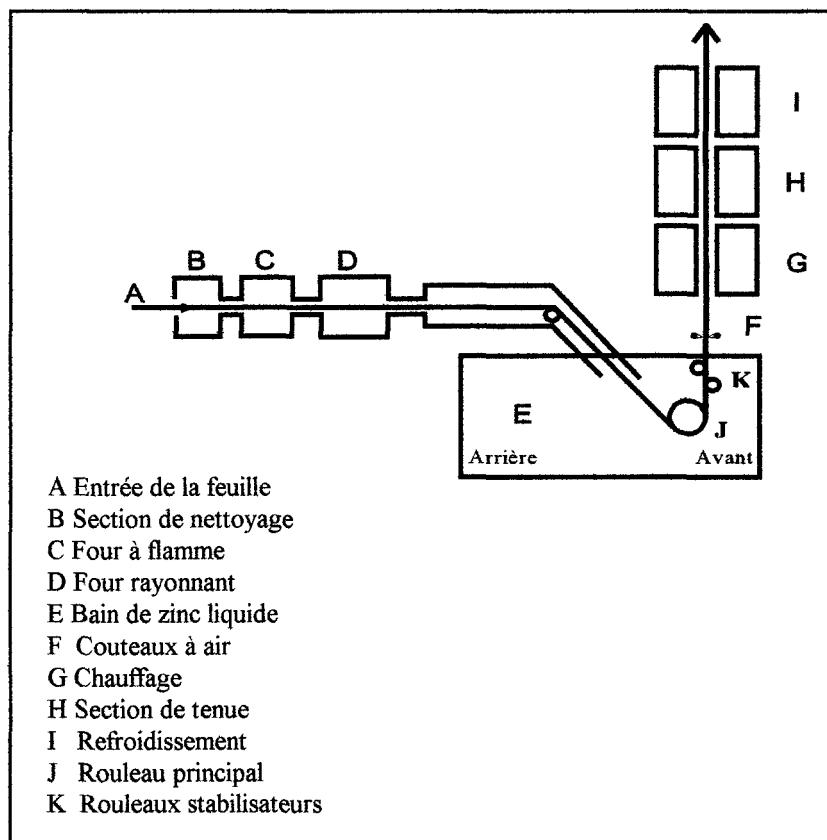


Figure 1.1 Schéma d'une ligne de galvanisation

solides ou sous forme liquide, pour maintenir le niveau d'aluminium requis. Actuellement, les procédures d'addition sont différentes suivant les industries (Belisle, Gagné et Gutman, 1991). Un survol des diverses opérations montre que près de 50% de l'aluminium ajouté au bain est consommé par le revêtement et par la formation d'intermétalliques Fe-Zn-Al dans la masse du fluide (Boston, Brummit et Gutman, 1992 ainsi que Gagné et Gutman, 1992). Ces intermétalliques se retrouvent dans le bain, à sa surface ou au fond, en fonction de leur composition chimique.

Le transport de l'aluminium dans le bain consiste en un transport convectif de l'aluminium dissout jusqu'à la surface de revêtement et à l'entraînement des particules intermétalliques. Ce transport est influencé par l'écoulement et par les gradients de concentration de l'aluminium qui sont établis comme le résultat du mouvement du liquide en contact avec les différentes composantes mobiles de l'équipement immergé tout comme le mouvement linéaire de la feuille d'acier. De plus, les forces convectives peuvent aussi être créées dans le bain par la fonte des lingots, par les différences de températures entre la feuille et le zinc liquide et par la présence de chauffage par induction ou par résistance électrique.

Le transport de l'aluminium durant le contact initial de la feuille avec le bain liquide est d'une importance critique. La formation de la couche inhibitrice étant très

rapide, d'un ordre inférieur à la seconde, il est alors nécessaire d'avoir un apport d'aluminium constant aussitôt que la feuille entre dans le métal liquide. D'ailleurs, Dubois et Feron (1993) ont observé une petite différence de composition entre le revêtement d'un côté de la feuille et de l'autre, ce qui suggère qu'il existe probablement une variation du niveau d'aluminium dans les différentes sections du bain. De plus, Dubois et al (1998) ont confirmé que l'hydrodynamique du métal liquide affecte l'épaisseur de la couche inhibitrice. Il est à ce moment important de connaître le champs de vitesse ainsi que le transport d'aluminium dans la région d'entrée de la feuille, soit, la région de la cloche et dans la région arrière du bain où s'effectuent généralement les additions.

De récents travaux dans le domaine de la galvanisation ont permis de mieux connaître cet écoulement. Pour ce faire, un premier modèle à eau a d'abord été construit et étudié pour évaluer les champs de vitesse aux divers endroits du bain (Ajersch, Gagné et Paré, 1993). Ensuite, un modèle numérique, calculé à l'aide d'éléments finis, a été conçu pour encore mieux visualiser et quantifier le mouvement du zinc liquide dans le bain (Ajersch, Binet et Paré, 1995). Ces deux modélisations de l'écoulement dans le bain ont permis de mieux visualiser les diverses zones de mélange qu'on retrouve dans la cuve, causées par le mouvement de la feuille d'acier et des rouleaux qui l'entraînent et la maintiennent. Suite à ces travaux, diverses équipes de recherche ont contribué à la visualisation de l'écoulement dans le bain au moyens des modèles à eau possédant des géométries variables (Kato et al, 1995 et

Iguchi, 1995).

1.2 Objectif du projet

Cependant, ces modélisations ne sont pas complètes. Par exemple, les modèles précédents considèrent un écoulement laminaire, isotherme, sans entrée ni sortie de fluide alors qu'on sait qu'il existe des zones de turbulence près des régions de grands mouvements, que le chauffage du bain et l'ajout régulier de lingots solides peuvent affecter l'écoulement et que le dépôt formé sur la feuille enlève une partie du métal liquide du bain à la sortie de la feuille. Le présent projet vise alors à modifier et à compléter le modèle numérique en évaluant le degré de turbulence et l'effet de différentes configurations géométriques du bain.

Dans un premier temps, le modèle numérique nécessite une validation des résultats. La comparaison du modèle numérique avec les divers modèles à eau présente certaines contradictions, comme par exemple, un écoulement dans des sens inverses au centre du bain, entre la feuille et les rouleaux. De plus, l'écoulement rapporté par l'observation de divers modèles à eau montre des différences importantes.

Pour valider le modèle numérique, un modèle à eau sera construit et l'écoulement sera observé à l'aide de traceur adéquat et de faisceau laser qui permet

de visualiser l'écoulement dans le bain. Ensuite des mesures de vitesses locales seront effectuées sur le modèle à eau à l'aide de la technique du laser Doppler. À l'aide de ces observations et quantifications, il sera possible d'évaluer le degré de turbulence dans le réacteur ainsi que près de la feuille. La validation de l'écoulement calculé par le modèle numérique sera également complétée par des tests industriels qui consistent à mesurer l'aluminium en solution dans le bain ainsi que la température pendant les opérations normales d'utilisation du bain en ajoutant des lingots riches en aluminium qui agiront comme traceur.

Par la suite, différents paramètres seront introduits dans le modèle numérique. Tout d'abord, l'effet du retrait de zinc liquide et du retour de zinc dû à la présence des couteaux sera évalué afin de vérifier son effet sur l'écoulement dans le bain. Ensuite, de nouvelles conditions frontières tenant compte de la présence des inducteurs seront introduites dans le modèle numérique. Ceux-ci sont des appareils chauffants qui forment un circuit de circulation de fluide situé à l'extérieur et de chaque côté du bain. En fait, une quantité de fluide provenant du bain est entraînée à l'intérieur de l'inducteur où elle est chauffée, et est ensuite retournée dans la cuve.

Ces inducteurs forment un circuit séparé du bain qui modifie l'écoulement dans la cuve. L'intensité de l'écoulement dans les inducteurs est fonction de la demande thermique du bain. Pour connaître l'effet de la présence d'inducteurs sur l'écoulement dans le bain, il est d'abord nécessaire de connaître la géométrie spécifique du

système à évaluer. À cette fin, des grandeurs et formes d'inducteurs seront fournies par les industries. Une fois la géométrie des inducteurs connue, des conditions frontières seront ajoutées au modèle numérique déjà existant et le nouveau champ de la vitesse sera calculé.

L'étude de la turbulence de l'écoulement dans le bain, de l'effet des inducteurs, de la présence des couteaux à air et de la géométrie du bain permettra de mieux évaluer de quelle manière se mélange le bain en fonction de ces paramètres. La manière dont il se mélange est importante lors des additions d'aluminium ainsi que pour la répartition des intermétalliques en présence. Plus le bain se mélange rapidement et uniformément, plus l'aluminium est disponible pour la réaction d'inhibition sur la surface de la feuille d'acier. Les intermétalliques qui se retrouvent dans le bain doivent être enlevés régulièrement de la surface du bain. L'écoulement contribue à leur déplacement et la compréhension de celui-ci permettra de mieux envisager l'implication de celui-ci dans la répartition des intermétalliques.

CHAPITRE 2

REVUE DE LA LITTÉRATURE

Le procédé de galvanisation a été étudié, amélioré et modifié par un grand nombre de recherches depuis son invention, il y a près d'un demi siècle. Par contre, le bain de galvanisation n'a été sujet de recherche que depuis les dix dernières années. En 1991, Gagné et al ont produit un rapport décrivant les différentes pratiques utilisées pour gérer le bain de galvanisation et ont conclu que celui-ci était certainement l'élément le plus mal connu du procédé. Suite à ce rapport, de nombreuses recherches ont été entreprises afin de mieux connaître et de mieux gérer la cuve de galvanisation. Ce chapitre servira à décrire le bain de galvanisation et à résumer les principales contributions apportées par les auteurs à la gestion de ce bain

2.1 Le bain de galvanisation

Le bain de galvanisation est un réservoir dont les parois sont soit d'acier ou de céramique réfractaire, qui contient le zinc liquide dans lequel la feuille est immergée (figure 2.1). La capacité de ces cuves peut varier de 60 à 265 tonnes de zinc (Guttmann et al. 1991). Le bain est maintenu à une température variant, en général, de 450 à 480°C. Cette température est maintenue constante soit à l'aide

d'inducteurs, soit à l'aide d'un chauffage par résistance électrique. La température de la feuille qui entre dans le bain est habituellement plus élevée que celle à l'intérieur du bain, contribuant ainsi au chauffage du métal liquide.

2.1.1 Composition du zinc liquide et procédures d'addition

Dans le métal liquide contenu dans la cuve on retrouve, outre le zinc, de l'aluminium et du fer en solution. L'aluminium est un additif ajouté volontairement car il est un inhibiteur qui permet d'empêcher la formation de phases Fe-Zn non désirables entre le zinc et le fer des feuilles d'acier. La formation de cette couche inhibitrice rend le revêtement plus ductile et plus apte à la mise en forme. Une partie de l'aluminium ajouté entre en solution dans le zinc liquide et réagit avec la feuille d'acier qui passe dans le bain ou quitte le réacteur avec le zinc liquide qui est entraîné par la feuille. L'aluminium restant réagit pour former des intermétalliques. La teneur en aluminium dans le bain est maintenue entre 0.1 et 0.30% poids. Les teneurs plus faibles sont utilisées pour la production de revêtements galvanisés alliés alors que les pourcentages plus élevés sont utilisés pour la production d'acier galvanisé.

Comme le zinc et l'aluminium se consomment dans le bain, on doit rajouter ces éléments essentiels à la galvanisation. La procédure d'addition dans le bain est effectuée selon des méthodes qui varient d'une ligne de galvanisation à l'autre. Les additions dans le bain doivent être effectuées de façon à ce que la composition de la

cuve reste constante le plus possible. En industrie, on ajoute, des lingots d'une teneur en aluminium 1,5 à 5 fois plus grande que celle voulue dans le bain (Gagné et Guttman, 1992).

Il existe généralement deux types de lingots solides ajoutés au bain. Les premiers sont des blocs de zinc (~1 tonne métrique), soit pur, soit contenant une faible quantité d'aluminium, qu'on appelle communément "jumbo". Les seconds sont des lingots (20 à 25 kg) d'alliage zinc aluminium contenant jusqu'à 10% poids Al. Ces deux types de blocs solides sont ajoutés au bain en les immergeant dans une section accessible du bain, habituellement l'arrière ou le côté du bain. Le taux horaire des additions totales varie entre 295 et 2400 kg/h (Gagné et Guttman 1992).

Le fer en présence dans le bain provient de plusieurs sources, notamment des particules de fer qui se trouvent à la surface de la tôle lorsque celle-ci est immergée dans le bain, de la dissolution de l'équipement d'acier inoxydable (rouleaux et bras) qui est submergé dans le zinc liquide (Bélisle et al 1991), de la formation et de la dissolution des composés intermétalliques $FeZn_7$ et $Fe_2Al_5Zn_x$ présents aux interfaces acier-zinc liquide et du changement de la solubilité du fer dans le zinc dû à une variation de la teneur en aluminium ou de la variation de la température du zinc liquide.

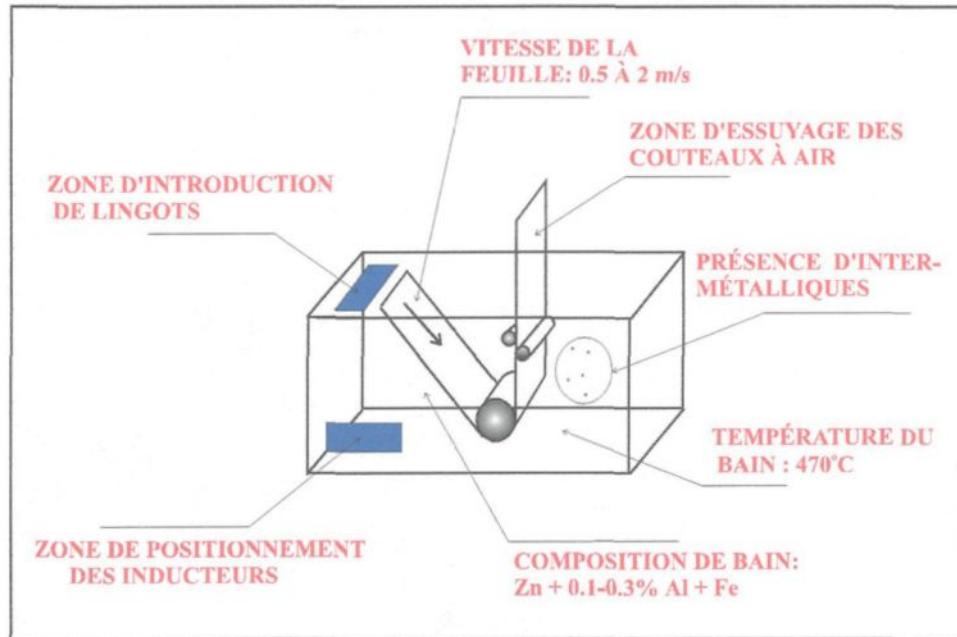


Figure 2.1 Schéma d'un bain de galvanisation

2.1.2 La couche inhibitrice

L'aluminium ajouté au bain affecte la relation entre la feuille d'acier et la chimie du bain. En effet, l'aluminium possède la capacité d'inhiber, pour une certaine période de temps d'immersion, les réactions entre le zinc liquide et le fer des feuilles d'acier à galvaniser (Bélisle, Gagné et Guttman, 1991). Cette caractéristique importante de l'aluminium sera décrite sommairement dans cette section afin de mieux voir le rôle du bain et de sa composition dans la présence et la formation de la couche inhibitrice.

Après de nombreuses recherches, le mécanisme qui produit l'inhibition des réactions entre le zinc et le fer de la feuille s'est avéré être la formation d'une mince couche intermétallique à l'interface. On croit que cette couche inhibitrice est constituée soit de Fe_2Al_5 et d'un composé ternaire Fe-Al-Zn, soit de Fe_2Al_5 contenant du Zn en solution, soit de Fe_2Al_5 et de FeAl_3 contenant du zinc (Bélisle, Gagné et Guttman, 1991).

Beaucoup de facteurs peuvent influencer la formation de la couche inhibitrice: la composition chimique de la feuille et son état de surface, la composition du bain et l'écoulement qu'on rencontre dans celui-ci, la température (bain et feuille), le temps d'immersion de la feuille dans le bain, etc.

Selon Bélisle, Gagné et Guttman (1991), le pourcentage en poids d'aluminium dans le bain nécessaire à la formation d'une couche intermétallique utile doit se trouver entre 0,15 et 0,2%. Avec une teneur inférieure à 0,15%, la couche n'est pas uniforme et lorsque le pourcentage d'aluminium est trop élevé dans le bain (>0,2%), l'intermétallique Fe_2Al_5 (Fe-Al-Zn) semble se transformer en d'autres phases Al-Fe (FeAl_3) qui sont peu désirables.

Tang et Adams(1993) ont étudié la nature de la couche inhibitrice dans des bains de zinc contenant de 0.14 à 0.20% poids Al et des temps d'immersion allant de 3 à 4 secondes. Ils ont observé que le pourcentage de Zn dans la couche de Fe_2Al_5

augmentait avec les temps d'immersion selon une loi de puissance parabolique.

La composition de l'acier à galvaniser affecte la formation de la couche inhibitrice. Par exemple, la présence de silicium tend à augmenter l'effet inhibiteur alors que la présence du titane dans l'acier de la tôle tend à diminuer cet effet.

Les mécanismes de la formation de la couche inhibitrice sont encore méconnus. Haughton (1952), a parlé de réaction directe entre l'aluminium et le fer de l'acier alors que d'autres (Engberg et al, 1989) ont émis l'hypothèse qu'il y a d'abord une formation rapide d'intermétalliques Fe-Zn (<3 secondes) sur la tôle qui réagissent ensuite avec l'aluminium en présence pour former Fe_2Al_5 . Une autre proposition de mécanisme (Bélisle, Gagné et Guttman, 1991) considère une dissolution de l'acier de la feuille, suivie d'une sursaturation de zinc près de la tôle, suivie d'une précipitation et d'une déposition sur la surface de l'acier, aux joints de grains et ailleurs de façon aléatoire. La possibilité d'une affinité entre le fer et l'aluminium dans le bain jouerait aussi un rôle lors de la formation de la couche .

De façon certaine, la formation de la couche est très rapide, de l'ordre d'une fraction de seconde (Toussaint, 1997). Il semble aussi que la couche inhibitrice se défait lorsque l'acier de la feuille est en contact trop longtemps avec le zinc liquide contenant de l'aluminium en proportion suffisante. Malgré cette considération, lorsque la teneur en aluminium dans le bain est suffisamment élevée, la cassure de

la couche ne survient habituellement pas dans un bain normal en service.

2.1.3 Les intermétalliques

Dans la masse de liquide contenue dans le bain de galvanisation, on constate la présence d'un grand nombre de particules intermétalliques solides. Ces particules sont nuisibles car elles peuvent engendrer des défauts sur le revêtement. De plus, la quantité d'intermétalliques présente dans un bain est un indicateur du degré de contrôle sur le procédé (Bélisle, Gagné et Guttman, 1991; Gagné et Guttman, 1992).

Dans un bain de galvanisation qui ne contient pas d'aluminium, on retrouve des particules intermétalliques composées de fer et de zinc ($FeZn_7$). Celles-ci sont probablement formées par la réaction entre le zinc liquide et le fer dissout dans le bain. Ces particules sont souvent assez grosses. Leur diamètre moyen varie entre 100 et 200 μm . Ces intermétalliques ont tendance à se déposer dans le fond du bain, leur densité étant généralement plus élevée que celle du zinc liquide (Bélisle, Gagné et Guttman, 1991).

Lorsqu'il y a présence d'aluminium dans le bain, la composition et la formation des intermétalliques sont différentes. À ce moment, on retrouve dans la cuve des particules intermétalliques de $Fe\text{-}Zn\text{-}Al$ et/ou de Fe_2Al_5 . Leur grosseur est beaucoup moindre que celle des intermétalliques de $Fe\text{-}Zn$. Dans la littérature, on mentionne

que les intermétalliques de surface ont un diamètre allant de 20 μm à plus de 100 μm (Bélisle, Gagné et Guttman, 1991). Leur densité a été évaluée comme étant de 3680, 4210 et 4500 kg/m^3 selon divers auteurs (Borzillo et al, 1969; Harvey et al, 1973). Grâce à cette densité moindre que celle du zinc liquide (environ 6600 kg/m^3) et au mouvement du liquide dans le bain, ces particules intermétalliques ont la particularité de flotter en surface, ce qui permet de les retirer plus facilement et plus régulièrement du bain. La production de ces intermétalliques de surface varie énormément en industrie. On parle de 1 à 10 kilogramme d'intermétalliques par tonne d'acier traité (Gagné et Guttman, 1992).

Une étude récente (Ajersch et Trépanier, 1999) a été faite sur 69 échantillons d'intermétalliques de surface provenant de 7 industries. Les auteurs ont caractérisé les intermétalliques par leur diamètre équivalent et par leur composition chimique. Ils ont mesuré un diamètre équivalent de 14,98 μm à 64,01 μm pour des particules de $\text{Fe}_2\text{Al}_{5-x}\text{Zn}_x$ (η) pour des bains produisant du galvanisé et de 22,46 μm pour les mêmes particules provenant de bains qui produisaient du galvanisé allié. De plus, les bains qui produisent de l'acier galvanisé allié contiennent une plus petite quantité d'aluminium en solution et on retrouve dans leurs intermétalliques de surface des particules de FeZn_7 (δ) d'un diamètre équivalent allant de 39,73 μm à 74,59 μm . Les analyses chimiques de ces intermétalliques montrent que les particules de $\text{Fe}_2\text{Al}_{5-x}\text{Zn}_x$ contiennent 37,71% Al, 37,01% Fe et 25,80% Zn en moyenne pour celles provenant de bain produisant du galvanisé et de 46,20% Al, 31,10% Fe et 22,71% Zn pour

celles provenant de galvanisé allié. La composition des particules δ est de 2,54% Al, 5,05% Fe et 92,42% Zn en moyenne. De plus, il a été observé que le nombre de particules augmente avec une diminution de la température et avec l'augmentation de l'aluminium du bain.

Le mécanisme qui produit les intermétalliques de surface dans un bain contenant de l'aluminium est encore peu compris. Certains croient que ceux-ci peuvent provenir de la cassure de la couche inhibitrice (Bélisle, Gagné et Guttman, 1991). D'autres pensent que l'intermétallique Fe-Zn qui se forme initialement sur la feuille se détache de la tôle et réagit avec l'aluminium présent dans le bain (Engberg et al, 1989). Une autre hypothèse, émise par Belisle, Gagné et Lezon (1989), considère que des changements apportés au procédé, qu'ils soient localisés ou généralisés, peuvent altérer la solubilité du fer dans le bain assez pour que le fer soit rejeté et forme des intermétalliques avec l'aluminium. Ajersch et Gauthier (1996) pour leur part, ont étudié les transformations des intermétalliques de surface en intermétalliques de fond ($Fe_2Al_{5-x}Zn_x$ à δ) et la transformation inverse (δ à $Fe_2Al_{5-x}Zn_x$) à l'aide d'un simulateur réduit de trempage de feuille d'acier dans du zinc liquide. Ils ont trouvé que la transformation de δ à $Fe_2Al_{5-x}Zn_x$ est due à un mécanisme de dissolution et de croissance. Pour la transformation de $Fe_2Al_{5-x}Zn_x$ à δ , le mécanisme est différent. Il semble que ce soit une transformation interfaciale de croissance en surface de δ sur $Fe_2Al_{5-x}Zn_x$. Les taux de transformation pour les deux mécanismes sont très élevés.

Il a été observé par Cameron et Ormay (1961) et par Hisamatsu et Yamaguchi (1973) que le pourcentage d'aluminium dans le bain affecte la composition des intermétalliques. Pour un bain qui contient entre 0,12 et 0,3% poids Al, les intermétalliques de surface seraient de composition ternaire (Fe-Al-Zn) alors qu'avec plus d'aluminium en présence ($>0,3\% \text{ Al}$), les intermétalliques seraient Fe_2Al_5 , FeAl_3 et des intermétalliques de composition ternaire avec une plus forte teneur en aluminium selon les premiers de ces auteurs. Pour leur part, Hisamatsu et Yamaguchi (1973) ont observé que des intermétalliques de fond δ (FeZn_7) et de surface (Fe_2Al_5) coexistent dans le bain pour un pourcentage d'aluminium allant de 0,09 à 0,14%. Avec une teneur en aluminium plus grande que 0,5%, ces auteurs n'ont pas observé d'intermétalliques de fond (FeZn_7).

La procédure d'addition dans le bain influence aussi la formation des intermétalliques. Plus les additions sont riches en aluminium, plus la formation d'intermétalliques est favorisée. Ainsi, l'endroit où l'addition est effectuée risque d'influencer la répartition des particules dans le bain et leur composition aux divers endroits.

2.1.4 Diagramme d'équilibre Fe-Zn-Al

L'aluminium ajouté au bain est consommé par la réaction avec le fer de la feuille d'acier qui passe dans le bain et par la formation des intermétalliques qu'on

retrouve dans le bain. De plus, une certaine quantité d'aluminium est entraîné par la feuille à sa sortie du bain, dans le revêtement de zinc solidifié au dessus de l'intermétallique inhibiteur. Lors de la galvanisation il est donc nécessaire de connaître en tout temps l'aluminium effectif disponible pour la formation de la couche inhibitrice. Le contrôle de la teneur en aluminium dans le bain est certainement la clef d'un bon produit galvanisé et cette teneur dépend, entre autres, de la température et de la concentration en fer dans le bain. Alors, pour bien comprendre les phénomènes impliqués à l'intérieur de la cuve de galvanisation, il est nécessaire d'étudier le diagramme de phases Fe-Zn-Al. La connaissance de ce diagramme de phases, dans le coin riche en zinc, permet d'établir les phases en présence pour les conditions du procédé de galvanisation ainsi que les limites de solubilité du fer et de l'aluminium dans le zinc liquide et dans les composés binaire et ternaire.

La détermination exacte du diagramme d'équilibre Fe-Al-Zn dans le coin riche en zinc a été entrepris par un grand nombre de chercheurs. Ici, la revue de la littérature sur ce sujet ne sera pas exhaustive et se limitera aux principales contributions apportées. Il est suggéré de se référer à Gauthier (1996), Lepretre (1996), Toussaint (1997) et Tang (1995) pour une révision quasi complète de l'historique de l'étude des diagrammes d'équilibre.

Les premiers diagrammes ternaires du système Fe-Zn-Al tracés avaient la particularité de ne pas définir clairement la limite de solubilité du fer dans le zinc

liquide ou d'omettre la présence des composés maintenant observés en galvanisation. Le groupe de recherche de Noranda (Bélisle et al, 1991) a déterminé que la solubilité du fer dans le zinc liquide était fonction de la teneur en aluminium et de la température (figure 2.2). Ils ont alors suggéré que si l'aluminium total et le fer présent dans un échantillon du bain excédait les valeurs d'équilibre définies par la courbe de solubilité du fer pour les températures de galvanisation, l'excédent Al-Fe mesuré devait être attribué à la formation de particules intermétalliques prises dans l'échantillon.

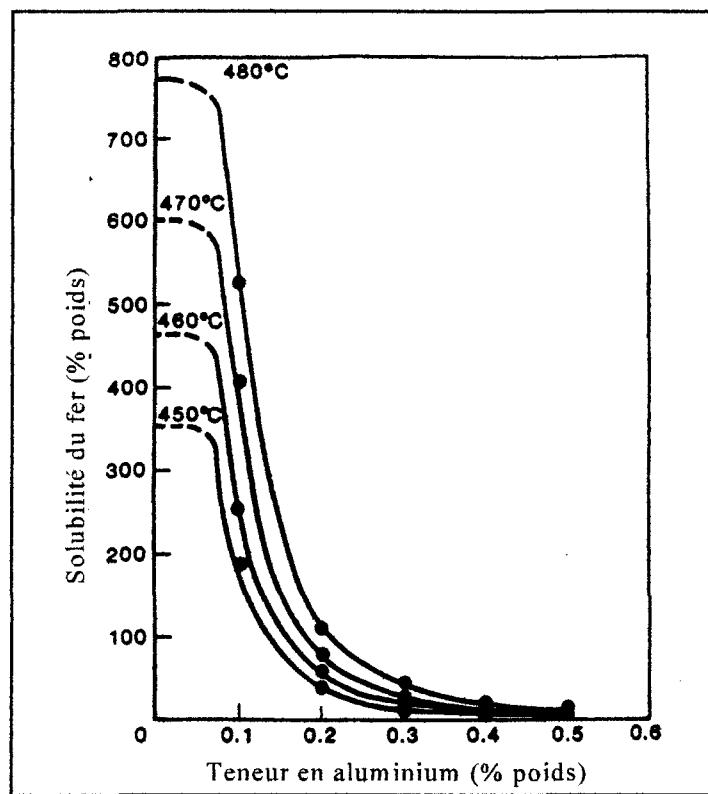


Figure 2.2 Solubilité du fer en fonction de la teneur en aluminium et de la température (Bélisle et al, 1991)

Le principal problème avec des courbes de solubilité de Belisle et al (1991) est qu'elles ne tenaient pas compte de la présence d'une région biphasée δ -liquide qui est cruciale pour la production de galvanisé allié. D'autres chercheurs de la compagnie Cominco ont alors effectué des études fondamentales du diagramme ternaire Fe-Zn-Al (Tang, 1995), en incluant les études de solubilité du fer en fonction de la teneur en aluminium pour la gamme de température utilisée lors de la galvanisation. Ils ont trouvé que dans les régions dominées par les phases ζ et δ , la solubilité du fer diminue lentement avec l'augmentation de l'aluminium à cause de la formation de solution solide d'aluminium avec les composés intermétalliques. La solubilité du fer en fonction de l'aluminium contenu dans le bain et de la température a alors été formulée et le diagramme d'équilibre ternaire dans le coin riche en zinc a été établi de façon précise (figure 2.3). D'après ce diagramme, lorsque la teneur en aluminium augmente, les phases en équilibre avec le zinc liquide sont successivement ζ , δ et η (Fe_2Al_{5-x} - Zn_x). Ce diagramme d'équilibre est certainement le plus accepté et le plus utilisé en milieu industriel. D'ailleurs, la compagnie Cominco a commercialisé un logiciel (DEAL, Determining Effective Aluminum, Tang, Adams et Kolisnyk, 1995) basé sur leurs données thermodynamiques, qui est utilisé comme outil de gestion du bain dans la plupart des usines de galvanisation.

Notons que Tang (1995) a défini la limite de solubilité qui entraîne la précipitation du composé Fe_2Al_5 par:

$$\ln [\text{Fe}]^2 [\text{Al}]^5 = 32,3 - 36133/T \quad (1)$$

où les concentrations en fer et en aluminium sont exprimées en pourcentages massiques et T, la température, en kelvins.

Ce même auteur a aussi indiqué le point de composition où la transition de δ à η arrive, qui est de 0.134% poids Al à 450°C. La définition de ce point est d'une grande utilité pour contrôler la teneur en aluminium dans le bain lors de la production de galvanisé et de galvanisé allié.

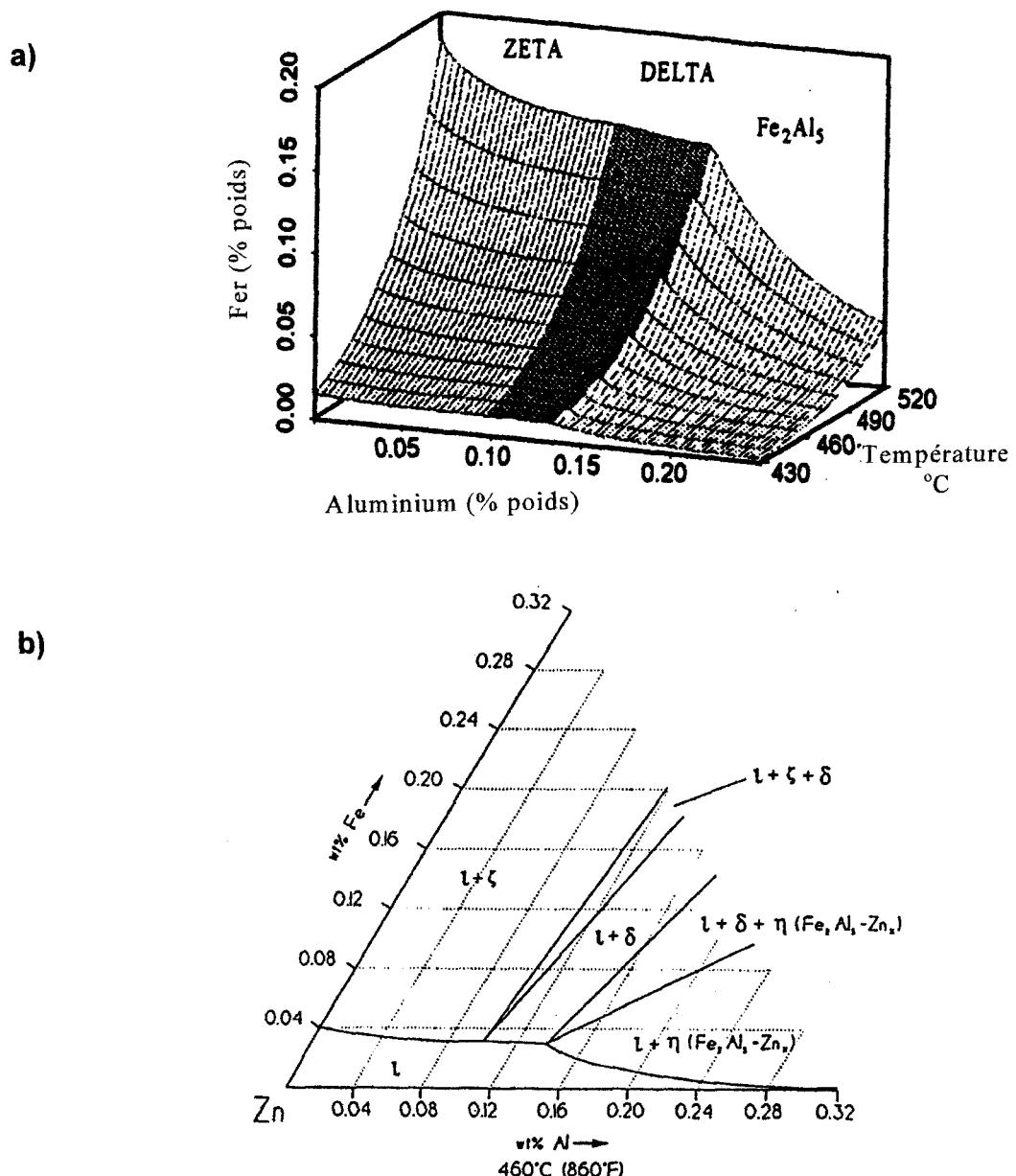


Figure 2.3 Solubilité du fer dans le zinc liquide en fonction de la teneur en aluminium et de la température: a) Surface de solubilité (Tang 1995) b) Coin riche en zinc (Tang, Adams et Kolisnky, 1995)

2.2 La modélisation

Les bains de galvanisation sont des réacteurs complexes dû à leur géométrie particulière. Lorsqu'on ajoute de l'aluminium dans ceux-ci, il est difficile de prévoir sa dispersion de même que le déplacement des particules intermétalliques qui s'y forment. De plus, l'hydrodynamique du bain semble affecter l'épaisseur de la couche inhibitrice (Toussaint, 1997) et probablement la formation des intermétalliques. L'étude de l'écoulement dans la cuve de galvanisation est alors nécessaire. Dans cette section, les différentes recherches effectuées sur l'écoulement et le mélange dans le bain de galvanisation seront résumées.

2.2.1 Le modèle à eau

La toute première étude à avoir été effectuée sur l'écoulement dans le bain de galvanisation est entreprise avec le bain à eau. Ajersch, Gagné et Paré (1993) ont construit un modèle physique de la moitié de la grandeur réelle d'une véritable cuve de galvanisation (figure 2.4). Ils ont utilisé de l'eau comme fluide et une feuille de polymère pour simuler la tôle d'acier qui passe dans le bain. La vitesse de la feuille de polymère a été ajustée afin de conserver le nombre de Reynolds constant à la valeur du bain de galvanisation. Cette vitesse est 3,77 fois plus élevée que pour le procédé réel.

Dans ce modèle physique, le nombre de Froude (V^2/gL) qui exprime le rapport des forces d'inertie sur les forces gravitationnelles n'est cependant pas conservé. Ce nombre adimensionnel précise la nature des surfaces libres dues aux différences de pression. L'inégalité du nombre de Froude implique que l'écoulement en surface du modèle à eau (formation de vagues) ne représente pas celui du bain de zinc. Cependant, vu l'égalité du nombre de Reynolds, l'écoulement général dans le modèle est représentatif de celui qu'on retrouve dans la cuve de galvanisation.

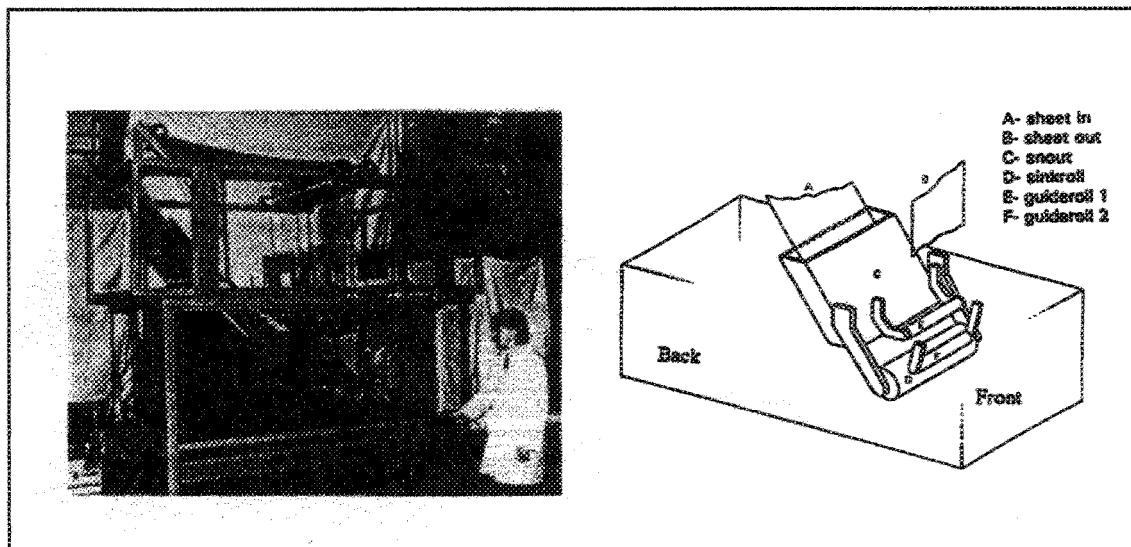


Figure 2.4 Schéma du modèle à eau (Ajersch, Gagne et Paré, 1993)

Pour étudier l'écoulement à l'aide de ce modèle, un grand nombre de billes en polymère colorées de densités plus élevées et plus basses que celle de l'eau ont été injectées dans le bain. Les trajectoires de celles-ci ont été observées et filmées par

caméra vidéo. Les auteurs ont ensuite schématisé le sens de l'écoulement observé à plusieurs endroits du bain.

L'écoulement observé à l'aide de ce modèle à eau, pour des vitesses du bain réel équivalant à 0,76 m/s, montre un mouvement du fluide causé par l'entraînement de la feuille, qui part de l'arrière du bain, passe sous le rouleau principal et va jusqu'à l'avant. Au centre, un écoulement dans le sens des aiguilles d'une montre est observé (figure 2.5). L'écoulement dans cette région semble plus influencé par les mouvements du rouleau principal et du rouleau stabilisateur que par le mouvement de la tôle. À l'arrière du bain l'écoulement est très lent. La vitesse des billes dans le bain à eau y est approximativement de 0,25 m/s.

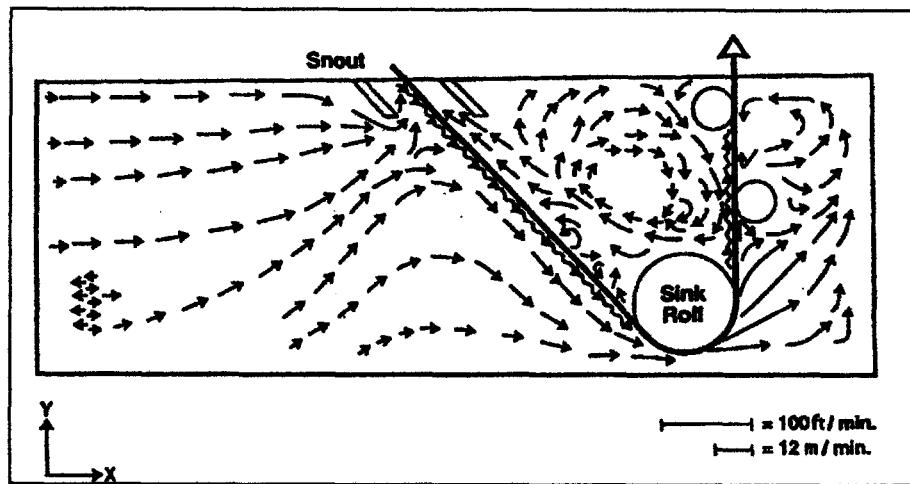


Figure 2.5 Écoulement observé dans un plan horizontal (Ajersch, Gagné et Paré, 1993)

Pour une section du bain près des parois externes, les auteurs observent que le mouvement du fluide se dirige, d'une façon évidente, vers l'arrière du bain (figure 2.6). La vitesse moyenne des billes augmente d'une valeur nulle dans le bas du bain à 0,5m/s dans le haut du bain. Les coins inférieurs droit et gauche sont des zones stagnantes. Au dessus du bain, sous la surface, le mouvement du fluide à l'arrière du bain se dirige vers la cloche et s'éloigne de la cloche au centre du bain. Les auteurs ont aussi observé qu'à l'avant du bain, le fluide se déplace dans le sens opposé, c'est-à-dire vers le centre du bain (figure 2.7).

Des essais de traceur acide ont aussi été effectués sur ce modèle afin de simuler l'addition d'aluminium (Ajersch et Gagné, 1995). Du HCl a été injecté dans le bain à eau sous forme d'impulsions et en continu en divers endroits du bain. L'ajout de HCl simule les additions d'aluminium dans un bain de galvanisation. Des sondes pH sensibles à l'acidité ont été placées à quatre endroits différents dans le bain: à l'avant, au centre et de part et d'autre de la feuille, dans la cloche. Les sondes sont positionnées au centre du bain dans la section verticale et sont immergées à peu près de cinq centimètres sous la surface du liquide. La figure 2.8 schématisé le bain et les endroits où les additions et les prises de données ont été effectuées.

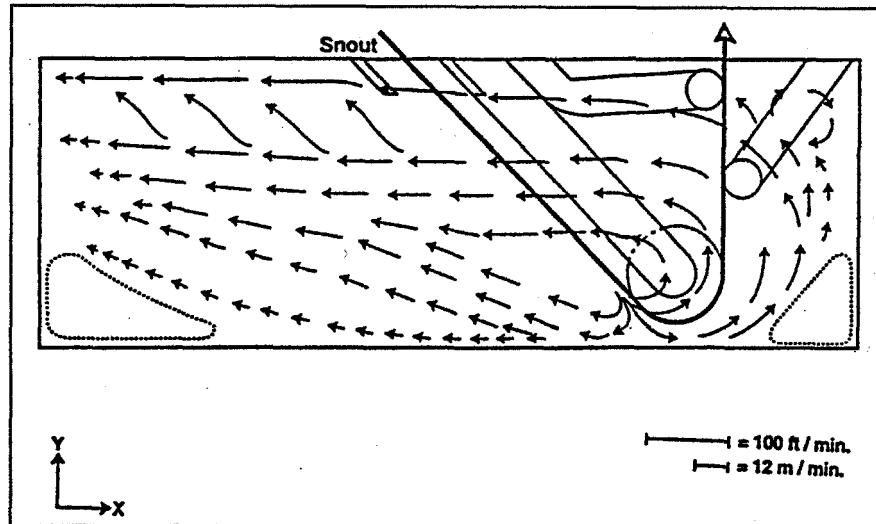


Figure 2.6 Écoulement observé dans un plan près des parois (Ajersch, Gagné et Paré, 1993)

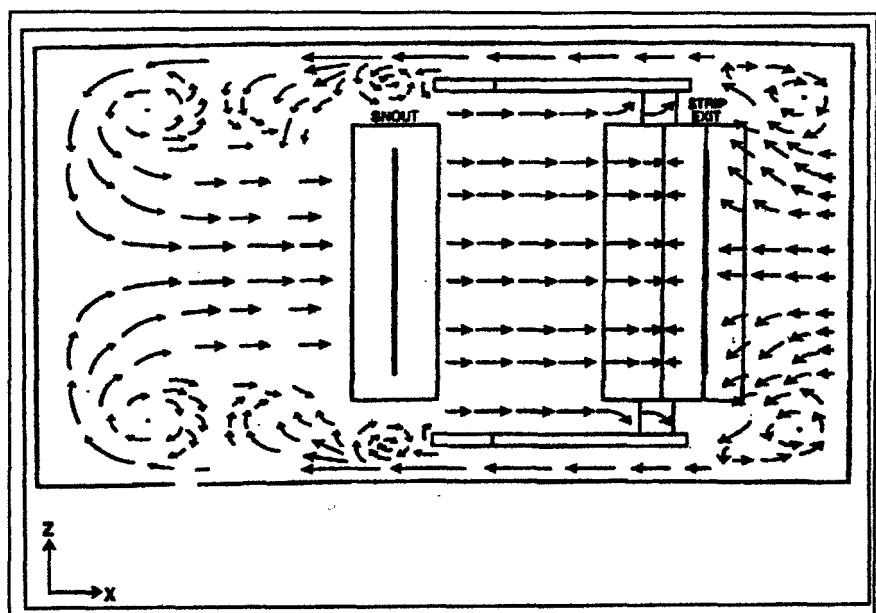


Figure 2.7 Écoulement observé dans un plan vertical (Ajersch, Gagné et Paré, 1993)

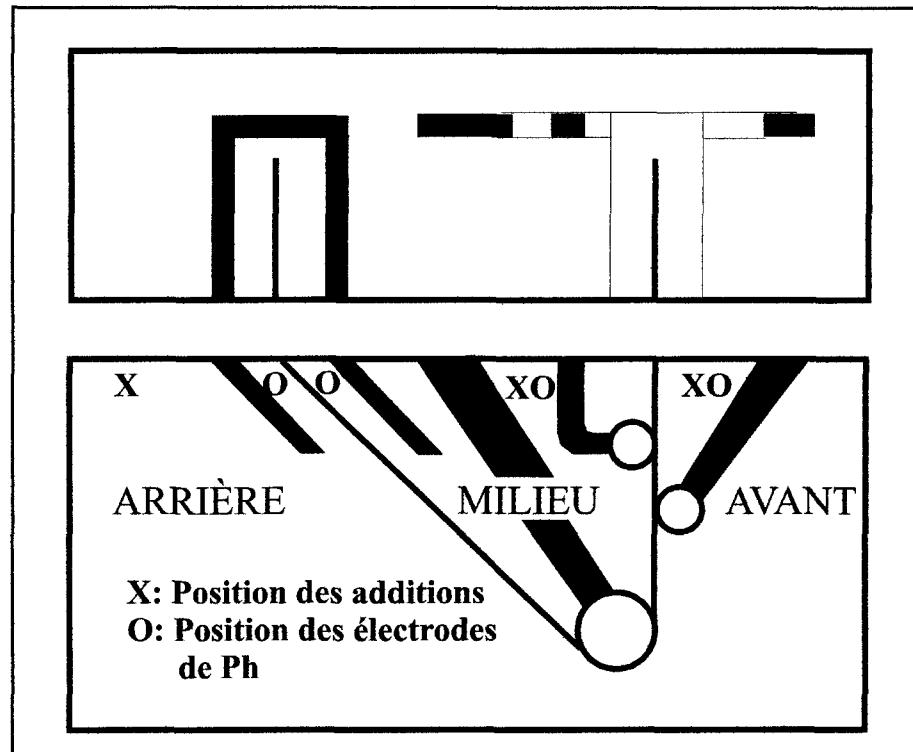


Figure 2.8 Schéma de la position des additions et des prises de mesures

Les mesures de la concentration de HCl en fonction du temps, lors des ajouts sous forme d'impulsion, ont été enregistrées plusieurs fois pour les quatre régions mentionnées plus haut. La concentration de HCl maximum est de 0.001 molaire. Les figures 2.9 à 2.11 présentent la moyenne de ces résultats obtenus pour les trois régions d'addition. À l'aide de ces courbes, on peut évaluer le temps de mélange complet, qui est de 60 secondes.

Ajersch et Gagné (1995) ont aussi présenté les résultats de courbes de concentration en fonction du temps pour des ajouts en continu. Ils ont injecté une solution acide HCl 0,02 mol au taux de 0,6 L/min. Les figures 2.12 et 2.13 montrent les résultats obtenus pour des additions à l'arrière et à l'avant du bain, respectivement. Ces courbes de réponse de concentration en fonction du temps pour des ajouts en continu démontrent que le mélange dans le bain semble bon.

En admettant l'hypothèse que le HCl se disperse dans l'eau de la même manière que l'aluminium, les tests d'addition de traceur dans le modèle à eau indiqueraient que le bain de zinc se mélangerait en 7,6 minutes suite à l'addition d'aluminium, pour une vitesse de feuille de 0,9 m/s . Ces essais ont aussi servi à calculer le nombre de Peclet (Pe) qui permet de calculer le degré de mélange du bain. Les nombres de Pe rapportés par les auteurs indiquent que le mélange dans le bain serait peu adéquat, celui-ci se comportant plutôt comme un réacteur piston (PFR) que comme un réacteur parfaitement mélangé (CSTR). Cependant, une étude supplémentaire (Binet, 1996 et Ajersch et Binet, 1998) à l'aide d'un modèle de mixage représentant mieux le comportement de mélange du bain indique que le bain présente un degré de mixage plus élevé, (nombre de Bondenstein de 25 ou un nombre d'étapes de mélange d'une boucle de circulation de 10) se trouvant plus près de celui d'un CSTR (Completely Stirred Tank Reactor).

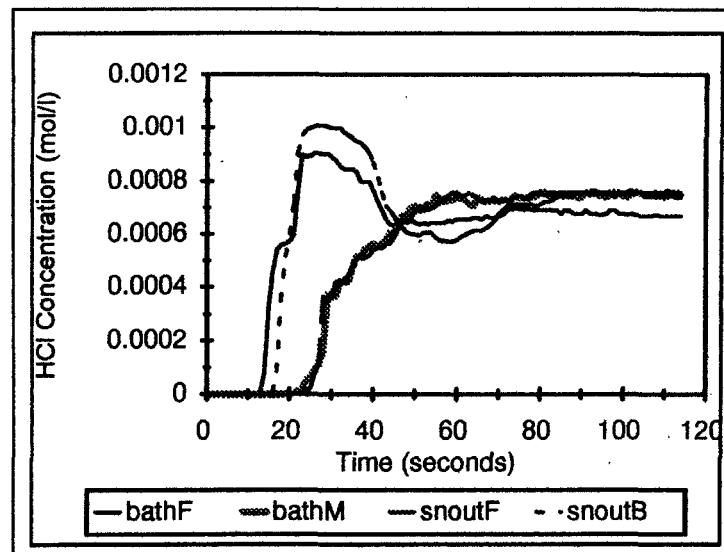


Figure 2.9 Courbes de concentration de HCl en fonction du temps pour des additions sous forme d'impulsion à l'arrière du bain (Ajersch et Gagné, 1995)

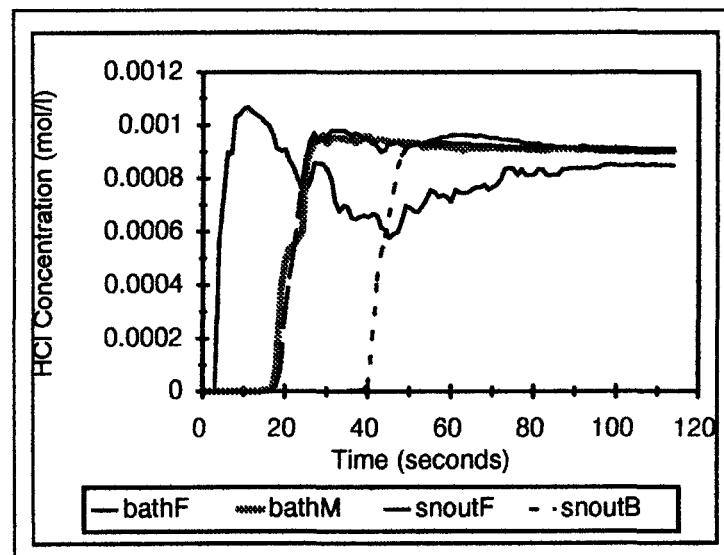


Figure 2.10 Courbes de concentration de HCl en fonction du temps pour des additions sous forme d'impulsion à l'avant du bain (Ajersch et Gagné, 1995)

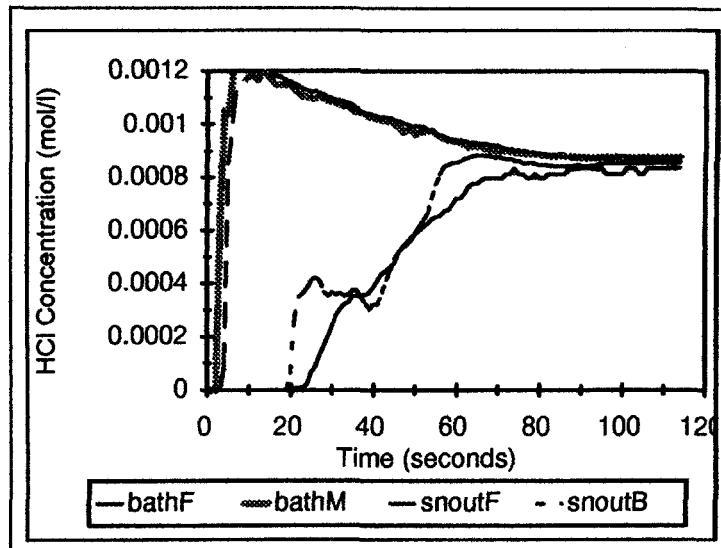


Figure 2.11 Courbes de concentration de HCl en fonction du temps pour des additions sous forme d'impulsion au milieu du bain (Ajersch et Gagné, 1995)

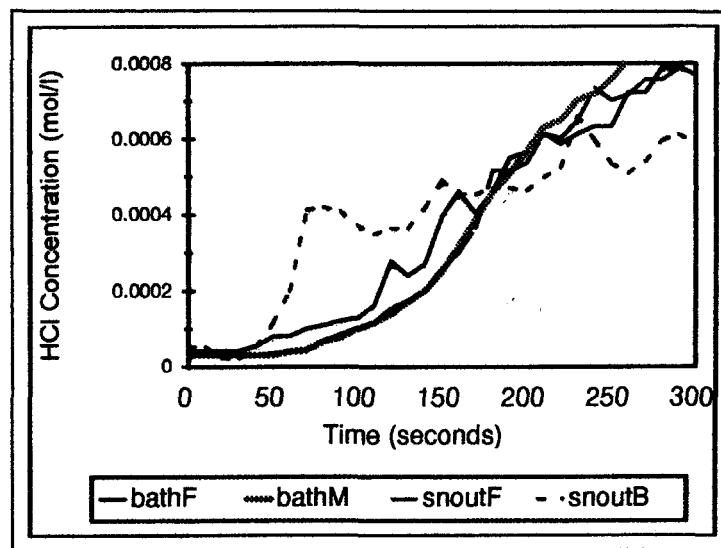


Figure 2.12 Courbes de concentration de HCl en fonction du temps pour des additions en continu à l'arrière du bain (Ajersch et Gagné, 1995)

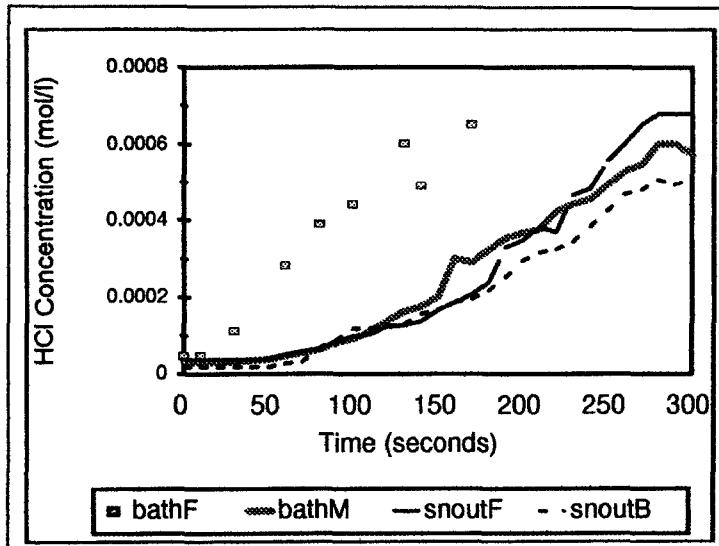


Figure 2.13 Courbes de concentration de HCl en fonction du temps pour des additions en continu à l'avant du bain (Ajersch et Gagné, 1995)

D'autres auteurs ont par la suite créé leur propre modèle à eau. Tout d'abord, Kato et al (1995) ont construit un modèle à eau du sixième de la grandeur d'un bain réel. Ils ont simulé le déplacement des intermétalliques dans le bain en ajustant les nombres de Reynolds et de Froude au bain réel. Des billes de polymères de 0.1 à 2.5 mm ont été introduites dans le bain comme traceur. Le déplacement des billes a été filmé par caméra vidéo. L'écoulement qu'ils ont observé présente des sens d'écoulement semblables au modèle de Ajersch et Gagné à l'extérieur de la feuille (avant et arrière) et au centre, près du rouleau. Par contre, à ce même endroit mais près de la surface, cet écoulement se fait dans le sens inverse (figure 2.14).

Iguchi et al (1996) ont construit deux modèles à eau, l'un du cinquième de la grandeur réelle et l'autre du dixième afin d'étudier le déplacement des intermétalliques dans la cuve. Pour maintenir la similitude dynamique, ils ont utilisé le nombre de Reynolds ($\rho v L / \mu$) en choisissant le diamètre du rouleau principal comme grandeur caractéristique (L) et la vitesse de la feuille comme vitesse caractéristique (v). À partir de la définition de ces paramètres, ils ont calculé que l'ordre de grandeur du nombre Reynolds est de 10^6 . Pour maintenir la similitude dynamique, ils devaient ajuster la vitesse de la feuille à une valeur élevée de 43,5 m/s, ce qui est difficile. Ils ont alors réduit le nombre de Reynolds à 10^5 en considérant que l'écoulement est turbulent, tout autant à $Re=10^6$ qu'à $Re=10^5$, et que le schéma d'écoulement reste le même. Des mesures à différents nombres de Reynolds ont été faites afin d'appuyer cette hypothèse (Iguchi et al, 1996). Ceci a permis d'utiliser des vitesses de feuille de 0,75 à 3,0 m/s.

L'écoulement dans le bain à eau observé par ces auteurs à l'aide de billes d'acrylique de diamètre de 2,0 mm et de faisceau laser est présenté aux figures 2.15 et 2.16. L'écoulement qu'ils observent dans un plan au centre du bain du modèle à 1/5 de la grandeur réelle est semblable aux autres écoulements observés à l'arrière de bain. Par contre, à l'avant, le sens de l'écoulement est à l'inverse de celui rapporté par les deux autres auteurs. Il semble que cette différence d'orientation de l'écoulement soit due à l'absence de rouleaux stabilisateurs et de la cloche. Au centre du bain, les auteurs montrent un écoulement près de la surface avec des

directions à la fois horaire et anti-horaire. À la surface du bain (figure 2.16), les auteurs ont rapporté un écoulement qui se dirige dans le sens contraire à celui visualisé par Ajersch, Gagné et Paré (1992).

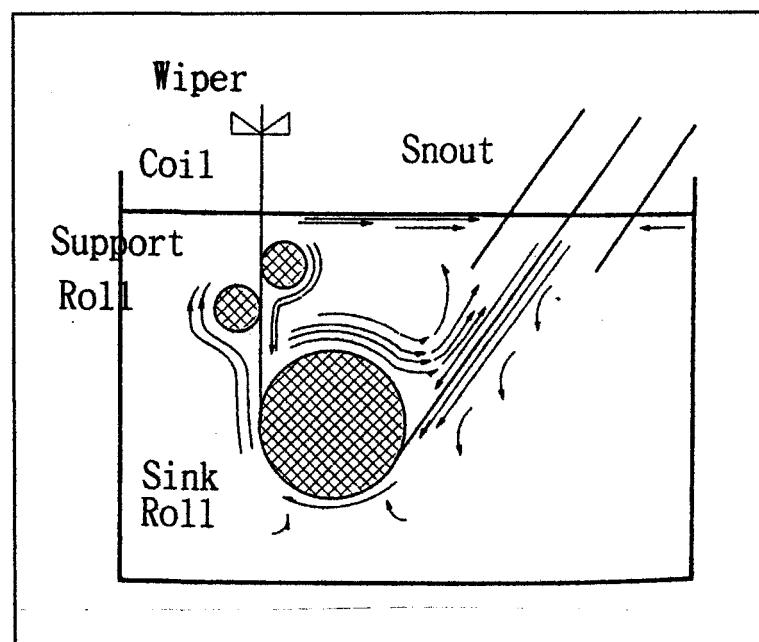


Figure 2.14 Modèle à eau de Kato et al (1995)

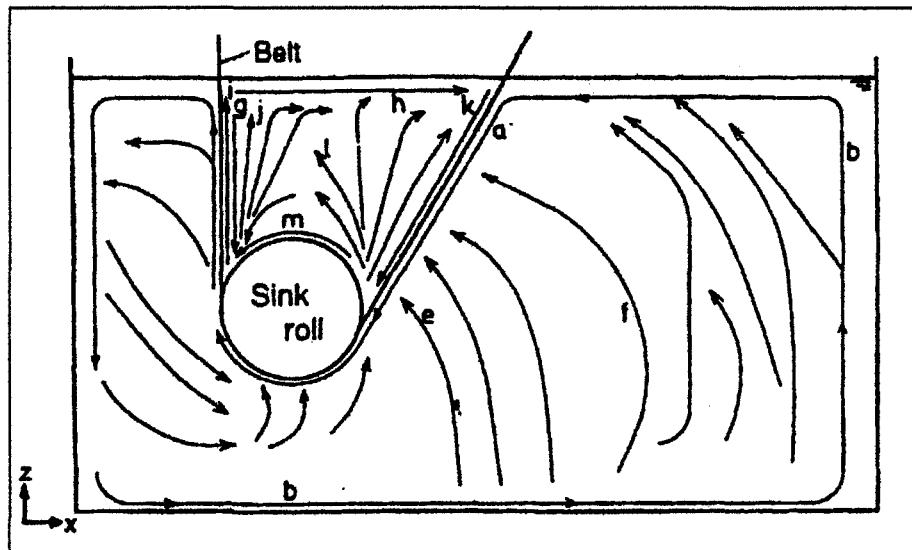


Figure 2.15 Écoulement observé dans un plan au centre du bain du modèle 1/5 d'un bain réel ($v=1,5$ m/s) (Iguchi et al, 1996)

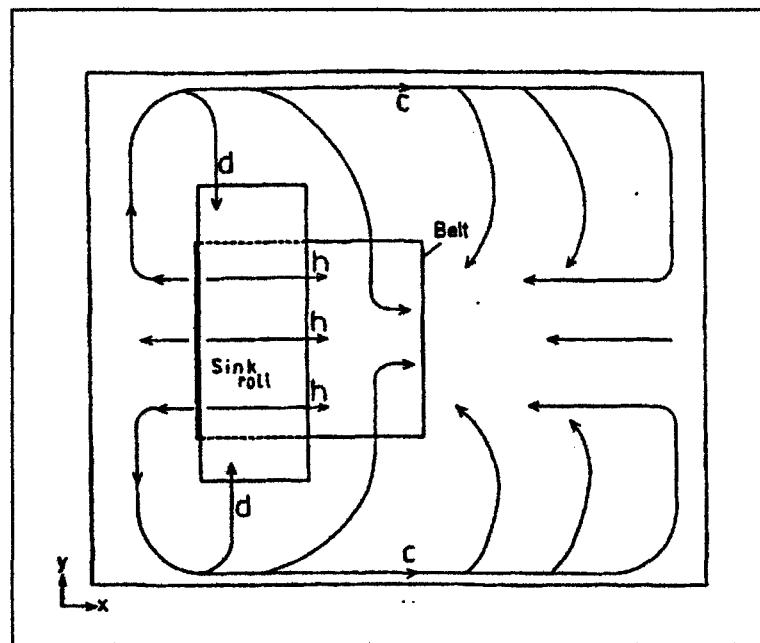


Figure 2.16 Écoulement observé près de la surface du bain du modèle 1/5 d'un bain réel ($v=1,5$ m/s) (Iguchi et al, 1996)

Ces auteurs ont aussi mesuré des vitesses moyennes locales à l'aide d'un laser Doppler sur leur modèle à un dixième de la grandeur réelle (figures 2.17 et 2.18). Pour des vitesses de feuille du bain à eau de 1,5m/s, les vitesses dans le bain sont élevées près de la feuille mais basses en s'éloignant, particulièrement à l'arrière du bain. Les vitesses mesurées à la surface du bain (figure 2.18) ont seulement été prises dans la direction x à cause de la difficulté des prises de mesures.

À partir des mesures de vitesses locales, des calculs de turbulence ont aussi été effectués. Iguchi et al (1996) ont schématisé les lignes de contour de la racine carrée de la valeur moyenne de la turbulence (V') selon:

$$u_i = \bar{u} + u'_i \quad (2)$$

$$v_i = \bar{v} + v'_i \quad (3)$$

$$V' = \sqrt{u'^2 + v'^2} \quad (4)$$

Ces schémas sont présentés aux figures 2.19 et 2.20. Les valeurs de V' sont élevées près de la feuille et sont basses à l'arrière du bain. Notons que sur la figure 2.20, $V' = u'$ à cause du fait que V' n'a pu être mesuré.

La composante turbulente de l'écoulement ($\overline{u'v'}$) définie par:

$$\overline{u'v'} = \sum_{i=1}^N u_i' v_i' / N \quad (5)$$

où N représente le nombre de signaux de vitesse enregistrés par le laser Doppler et l'indice i représente le i-ième signal, a été tracée par les auteurs sous forme de lignes de contour à la figure 2.21. Ces mesures leur ont permis de dire que l'écoulement du bain est hautement turbulent près de la feuille et du rouleau. Par contre, à l'arrière et dans la région d'entrée de la feuille, la composante de la turbulence est beaucoup plus petite.

D'après ces observations, Igushi et al (1996) ont conclu que:

1. L'écoulement est tridimensionnel,
2. L'écoulement est très complexe au milieu du bain,
3. L'écoulement dans les deux modèles (1/5 et 1/10) est similaire,
4. Les intermétalliques seraient "vigoureusement dérangés et dispersés" près de la feuille lors de sa sortie du bain.

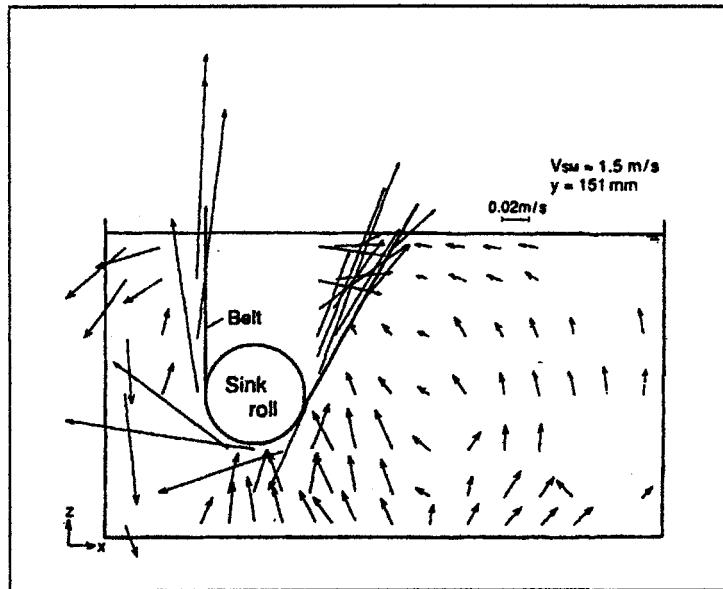


Figure 2.17 Vecteurs de vitesse mesurés par vélocimétrie laser au centre du bain ($v=1,5 \text{ m/s}$) (Iguchi et al, 1996)

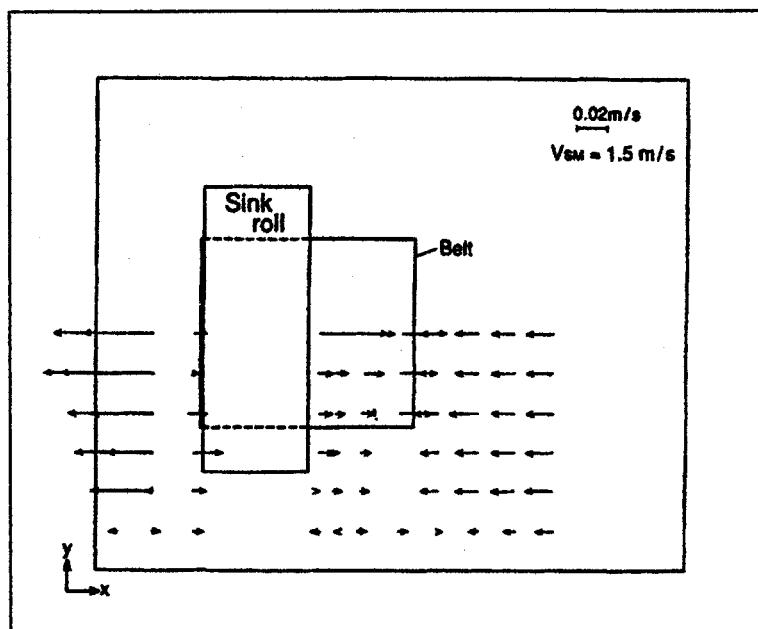


Figure 2.18 Composante x de la vitesse mesurée par vélocimétrie laser près de la surface du bain ($v=1,5 \text{ m/s}$) (Iguchi et al, 1996)

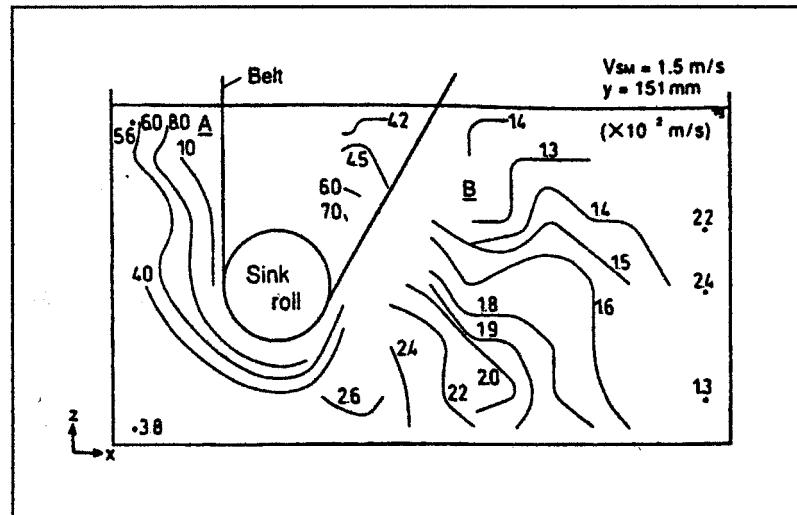


Figure 2.19 Lignes de contour de la racine carrée de la moyenne des composantes turbulentes (V') dans un plan au centre du bain ($v=1,5 \text{ m/s}$) (Iguchi et al, 1996)

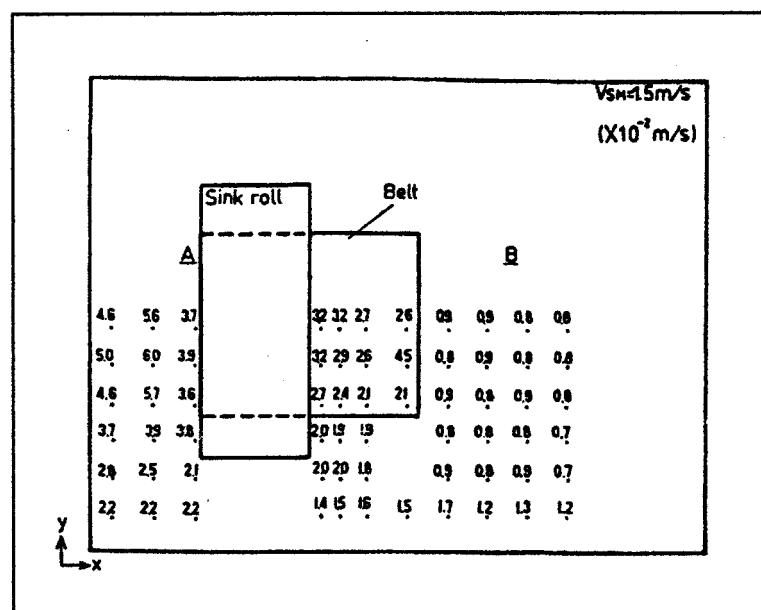


Figure 2.20 Distribution de la valeur de la composante u' de turbulence près de la surface du bain ($v=1,5 \text{ m/s}$) (Iguchi et al, 1996)

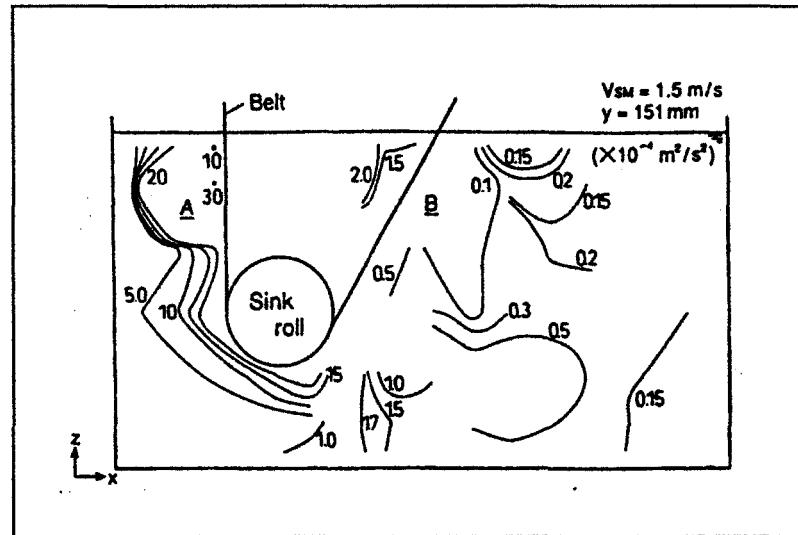


Figure 2.21 Lignes de contour de la composante turbulente de l'écoulement (u' v') dans un plan au centre du bain ($v=1,5\text{m/s}$) (Iguchi et al, 1996)

Cette dernière conclusion est surprenante étant donné qu'il existe un réel problème industriel d'entraînement des intermétalliques par la feuille lors de sa sortie du bain. Si les intermétalliques étaient dispersés à cet endroit, ils s'éloigneraient alors de la feuille; ce qui est contradictoire.

Le travail effectué par Iguchi et al (1996) est similaire à celui qui sera entrepris dans ce projet. Cependant, nous tenterons de démythifier les différences de sens d'écoulement observé par les auteurs précédents. De plus, les différents travaux effectués sur les modèles à eau démontrent parfois des méthodes d'observation de l'écoulement discutables ainsi que l'utilisation de géométrie variable. Pour le modèle

de Ajersch, Gagné et Paré (1995), l'observation par caméra vidéo de l'écoulement entraîne des incertitudes quant à l'écoulement tridimensionnel. Pour les autres auteurs, la géométrie différente de celle du modèle numérique ne permet pas de comparer l'écoulement observé avec celui calculé numériquement.

2.2.2 Modèle numérique

Un modèle numérique en trois dimensions a été conçu par Ajersch, Binet et Paré (1995) à l'aide de la géométrie d'un bain réel et semblable à celle du bain à eau conçu par Ajersch, Gagné et Paré (1992). Pour ce faire, une moitié du bain a été maillée en 3-D et le calcul de l'écoulement a été effectué à l'aide du logiciel FIDAP 7.0, un logiciel d'éléments finis. Pour évaluer l'écoulement dans le bain par la méthode des éléments finis, des hypothèses ont été émises par les auteurs (Ajersch, Binet et Paré, 1995) pour simplifier les calculs. Ces hypothèses sont les suivantes:

- 1- L'écoulement est en régime permanent
- 2- L'écoulement dans le bain est isotherme, avec les températures de la tôle et du bain égales
- 3- L'écoulement est laminaire même si on croit qu'il existe des régions dans le bain où le régime est turbulent
- 4- L'écoulement dans le liquide est causé seulement par les mouvements de la tôle et des rouleaux et il n'y a pas de glissement

- 5- Il n'y a pas d'entrée ou de sortie de fluide
- 6- Les effets de surface sont négligés (pas de formation de vagues)
- 7- La densité du zinc liquide est de 6600 kg/m^3 et sa viscosité est de $3,7 \times 10^{-3} \text{ Pa.s}$ (Laviosa et Milani, 1996)

Les équations qui gouvernent l'écoulement sont alors:

- l'équation de continuité:

$$\nabla \cdot \underline{v} = 0 \quad (6)$$

- et l'équation de mouvement:

$$\rho \underline{v} \cdot \nabla \underline{v} = \mu \nabla^2 \underline{v} - \nabla P + \rho g \quad (7)$$

où \underline{v} est le vecteur vitesse. Dans cette équation laminaire de Navier-Stokes, seulement les effets visqueux (μ), de pression (P) et de gravité (ρg) sont utilisés.

La figure 2.22 montre la géométrie du bain et les conditions frontières qui ont été appliquées. Ainsi, pour toutes les surfaces solides stables, soit, la cloche, les parois extérieures et les bras de rouleaux, une condition frontière de vitesse nulle a été utilisée. Pour la tôle et les rouleaux, une vitesse tangentielle constante de 1,67 m/s a été imposée. Sur le plan de symétrie qui sépare le bain en deux, la composante en z de la vitesse a été imposée comme étant nulle ($v_z=0$). La même

condition frontière a été appliquée sur la surface supérieure du bain.

Les vecteurs de vitesse calculés à l'aide de ce modèle numérique montrent l'écoulement de façon plus détaillée qu'à l'aide des modèles à eau (figures 2.23 à 2.25). On y voit de nombreuses zones de circulation en trois dimensions qui sont le résultat de la combinaison du mouvement des rouleaux et de la feuille. De façon générale, l'écoulement à l'extérieur de la feuille est semblable à celui observé dans le modèle à eau de Ajersch, Gagné et Paré (1993). Cependant, au centre du bain, le sens de l'écoulement est différent de celui donné par ce modèle physique. Il appuie par contre celui rapporté par Kato et al (1995) (figure 2.14).

Le modèle numérique a aussi été utilisé pour simuler des additions d'aluminium en continu et sans transfert de chaleur dans le bain (Binet, 1995). Pour ce faire, le calcul convergent du champ de vitesse laminaire (Ajersch et al, 1995) a été pris comme base de l'écoulement et l'aluminium a été ajouté sur le modèle en imposant une concentration constante et un flux constant sur diverses surfaces du bain. Les hypothèses émises pour le calcul sont:

1. La distribution du champ de vitesse est permanente alors que la concentration de l'espèce ajoutée varie dans le temps,
2. Les effets de la convection thermique sont négligés

3. Pas de réaction chimique ou de consommation d'aluminium dans le bain et sur la feuille
4. Initialement, il n'y a pas d'aluminium dans le bain.

L'équation adimensionnelle de transport d'une espèce chimique ajoutée aux équations de continuité et de mouvement est la suivante:

$$\frac{\partial C^*}{\partial t^*} + \underline{v}^* \cdot \nabla C^* = \frac{1}{Pe_d} \nabla^2 C^* + q^* \quad (8)$$

où C^* est la concentration adimensionnelle (C/C^∞ , C^∞ étant la concentration à $t \rightarrow \infty$), t^* est le temps adimensionnel (tV/L), \underline{v}^* est le vecteur adimensionnel (v/V), Pe_d est le nombre de Peclet diffusif ($Pe_d = VL/\alpha_d$, V et L : vitesse et longueur caractéristiques, α_d : coefficient de diffusivité massique) et q^* est le terme de source adimensionnalisé ($LS/\rho V$).

Ces calculs ont été effectués à plusieurs endroits dans le bain et ils montrent que le meilleur emplacement pour ajouter l'aluminium est l'arrière du bain (figure 2.26). Le degré de mélange du bain dans le modèle numérique a été ajusté de sorte qui soit représentatif des tests de traceur acide dans le modèle à eau.

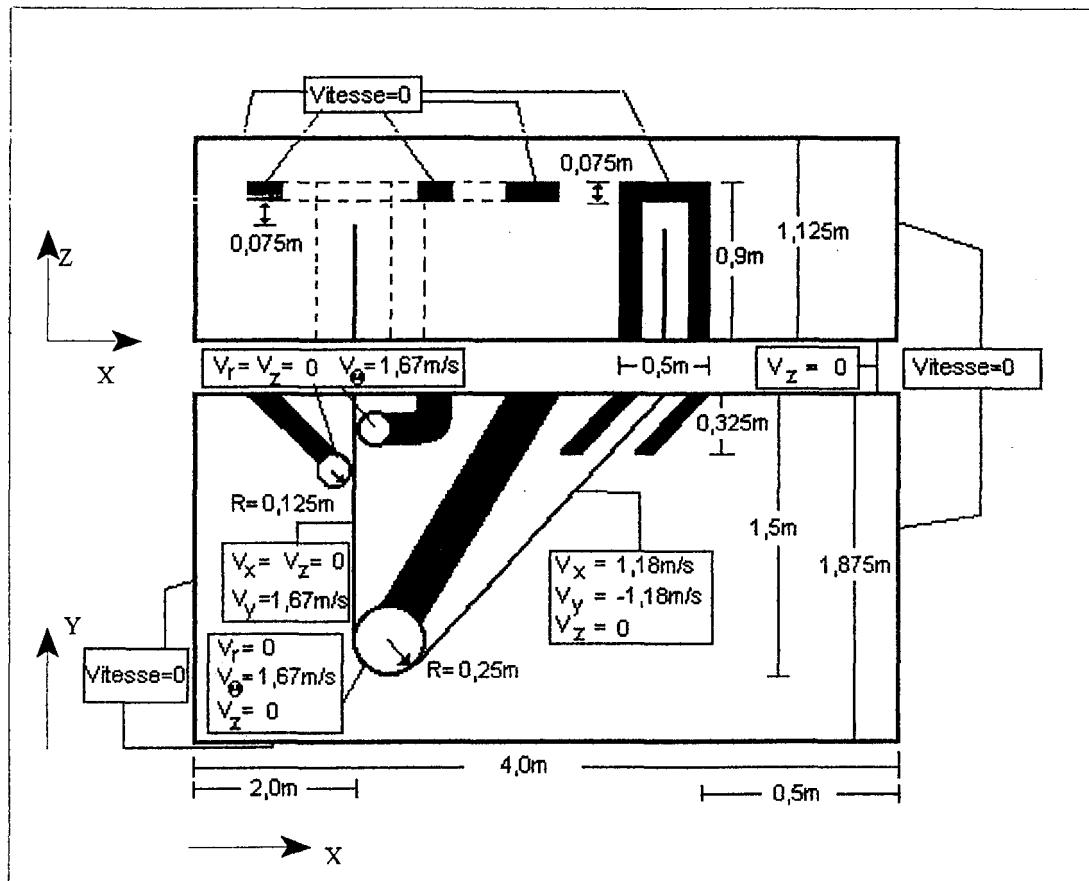


Figure 2.22 Schéma de la géométrie et des conditions frontières appliquées au modèle numérique

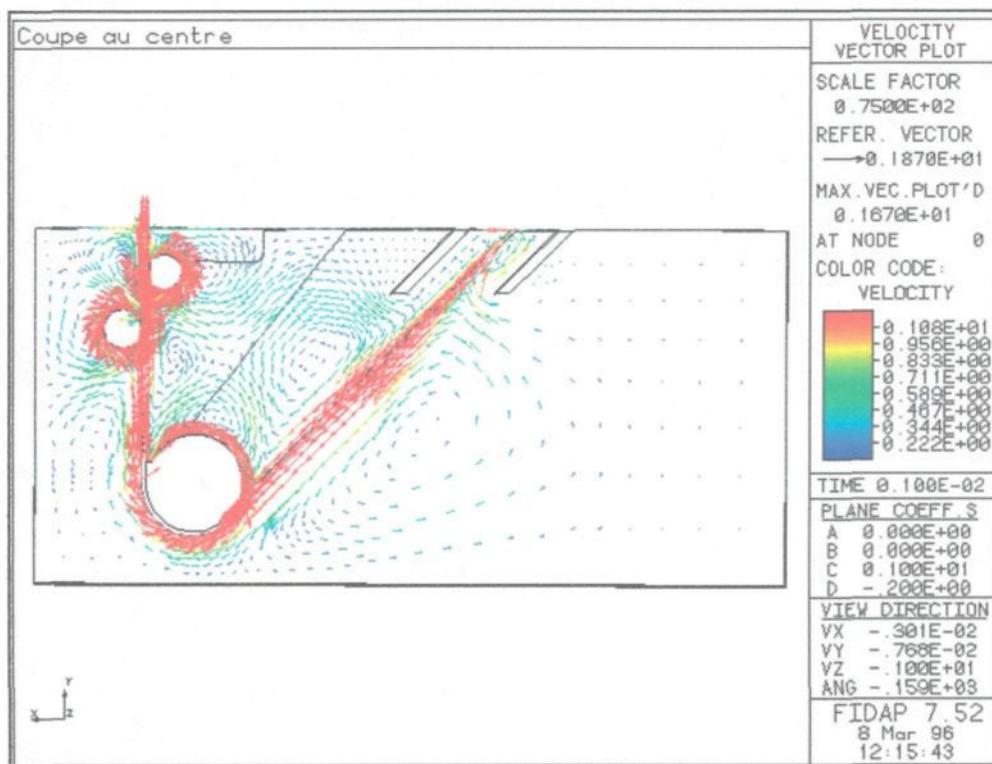


Figure 2.23 Écoulement calculé à l'aide du modèle numérique, vue d'un plan au centre (Ajersch, Binet et Paré, 1995)

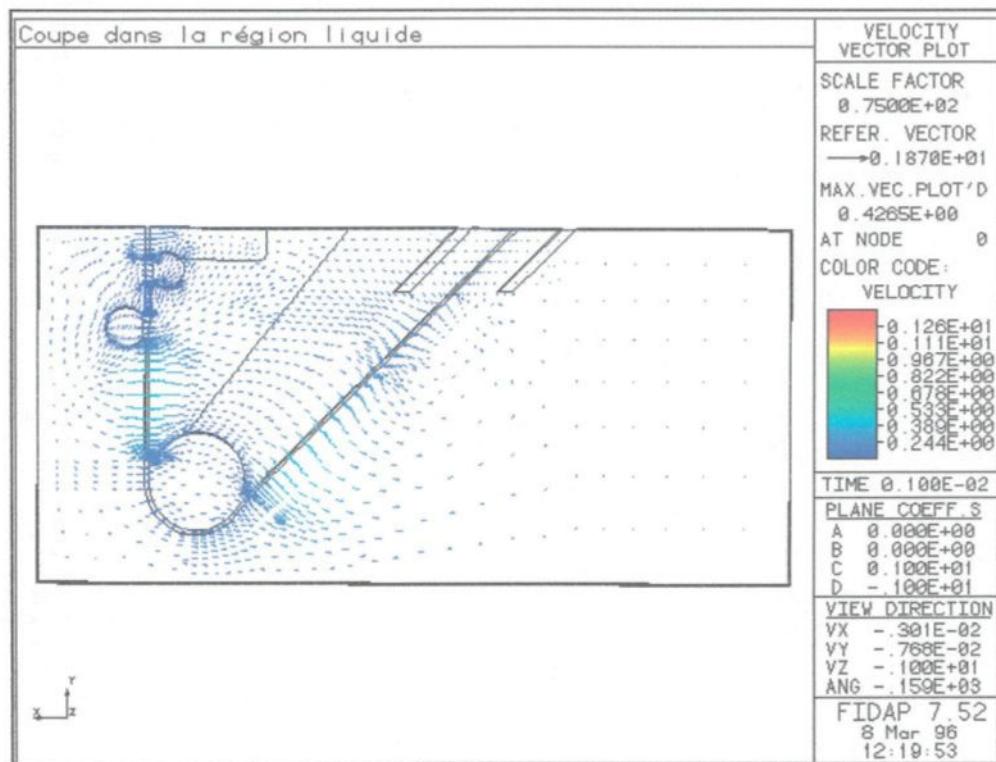


Figure 2.24 Écoulement calculé à l'aide du modèle numérique, vue d'un plan près des parois (Ajersch, Binet et Paré, 1995)

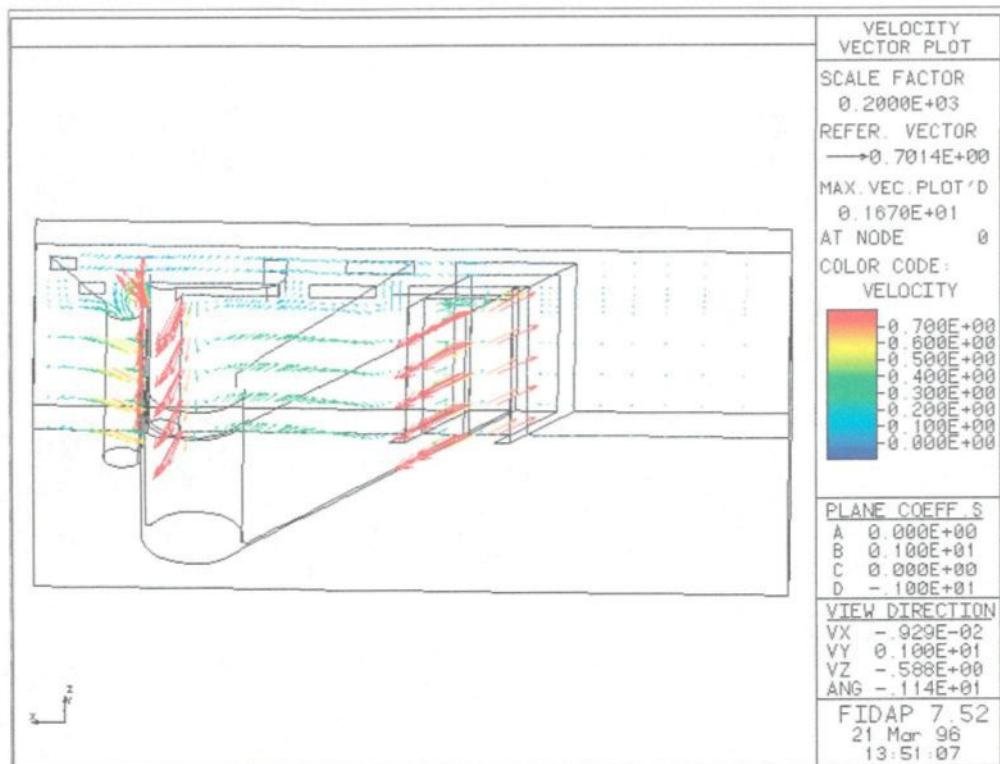


Figure 2.25 Écoulement calculé à l'aide du modèle numérique, vue d'un plan près de la surface (Ajersch, Binet et Paré, 1995)

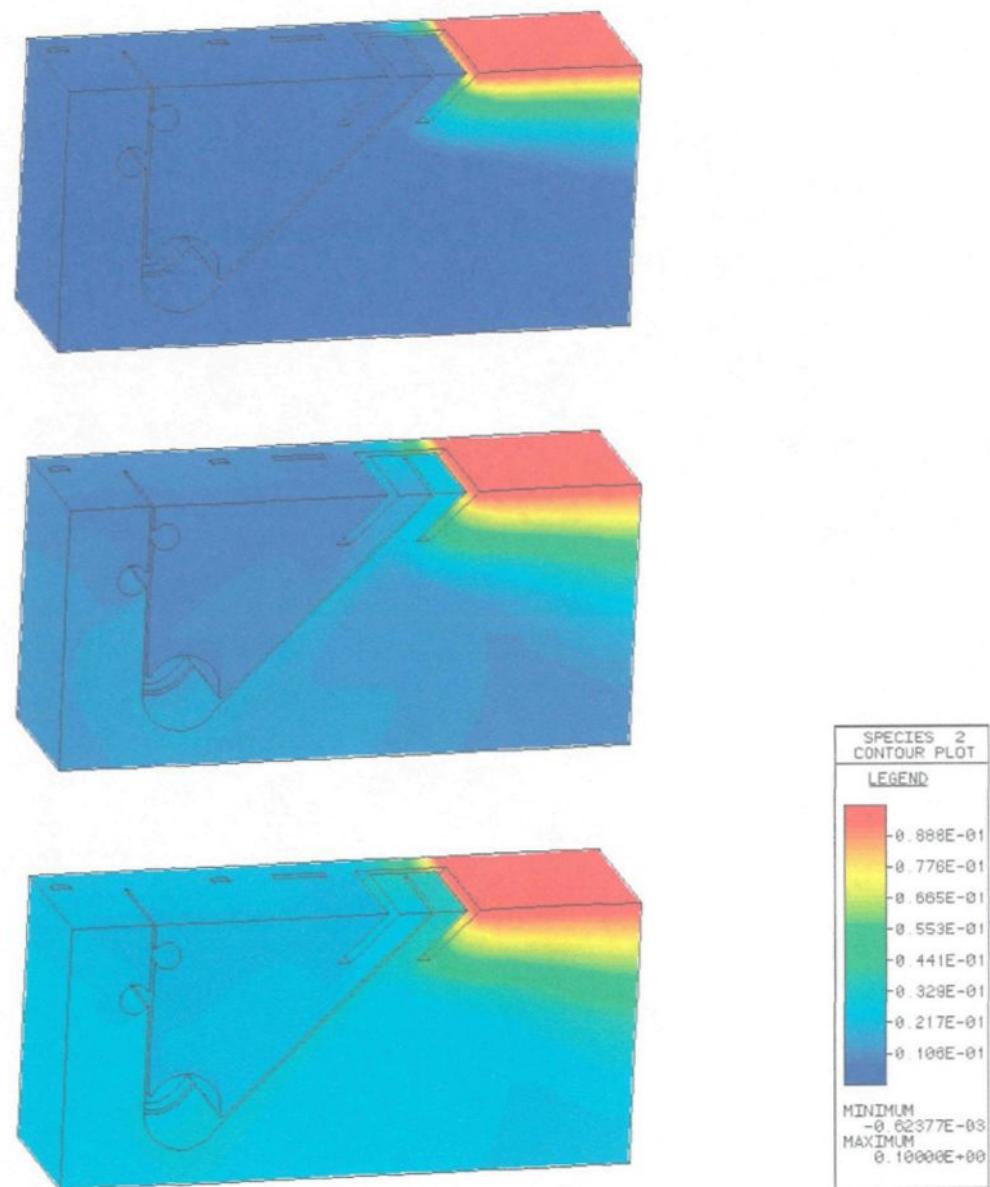


Figure 2.26 Répartition de l'aluminium dans le modèle numérique en fonction du temps pour un ajout à l'arrière après 5, 20 et 45 secondes

Les résultats présentés par Gagné et Gaug (1998) sont rapportés aux figures 2.27 à 2.30. Toutes ces figures sont les résultats des calculs turbulents en utilisant la méthode FTV (Fixed Turbulent Viscosity, basée sur la l'hypothèse de longueur de mélange de Prandtl). La figure 2.27 montre un plan au centre du bain, avec deux rouleaux stabilisateurs et une vitesse de feuille de 2 m/s. Les auteurs mentionnent que la variation de la vitesse de la feuille n'a que peu d'effet sur l'ensemble du patron d'écoulement. La figure 2.28 montre le même bain, mais avec un seul rouleau stabilisateur actif. Ceci a pour principal effet de modifier l'écoulement à l'intérieur de la cuve. La figure 2.29 montre l'effet de la présence des inducteurs sur l'écoulement dans le bain. Sur cette figure on voit que l'écoulement provoqué par les inducteurs semble affecter de façon notable l'écoulement à l'arrière du bain. Finalement, la figure 2.30 montre l'écoulement calculé pour un bain réduit en dimension.

Les auteurs concluent que:

1. Le modèle numérique a de la difficulté à calculer l'écoulement dans le sens horaire de la zone centrale du bain, sens d'écoulement qu'ils observent lors des visualisations du modèle à eau,
2. Le changement de vitesse de feuille de 1 à 2 m/s affecte peu l'écoulement,
3. L'absence de rouleau stabilisateur affecte beaucoup l'écoulement au milieu,
4. Les inducteurs affectent beaucoup l'écoulement à l'arrière du bain.

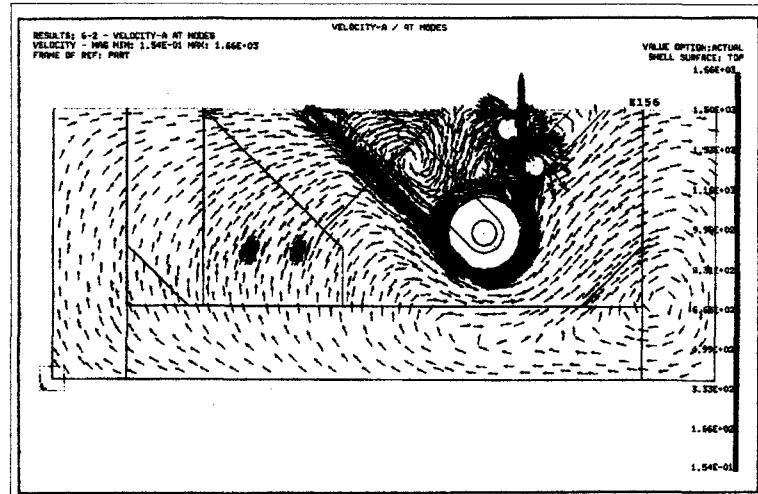


Figure 2.27 Écoulement calculé à l'aide d'un modèle numérique, vue d'un plan au centre pour un bain à deux rouleaux stabilisateurs (Gagné et Gaug, 1998)

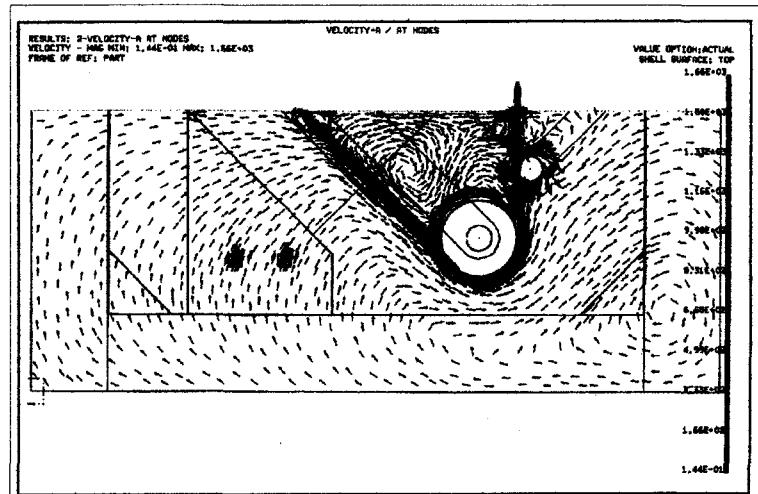


Figure 2.28 Écoulement calculé à l'aide d'un modèle numérique, vue d'un plan au centre pour un bain avec un seul rouleau stabilisateur (Gagné et Gaug, 1998)

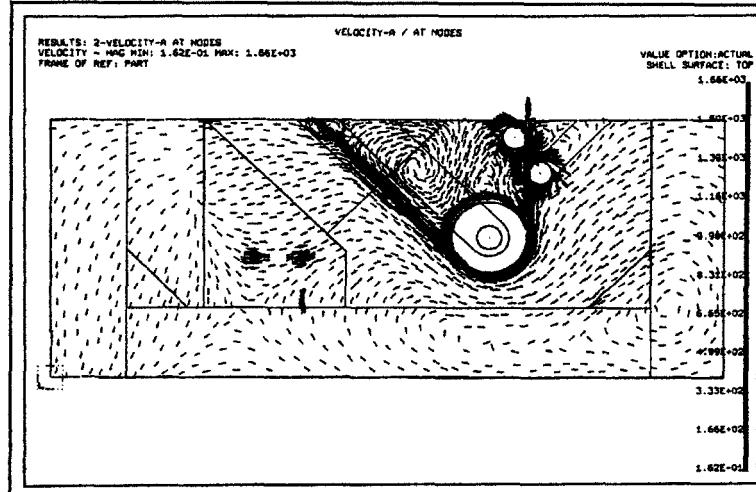


Figure 2.29 Écoulement calculé à l'aide d'un modèle numérique, vue d'un plan au centre pour un bain avec les inducteurs en fonctionnement (Gagné et Gaug, 1998)

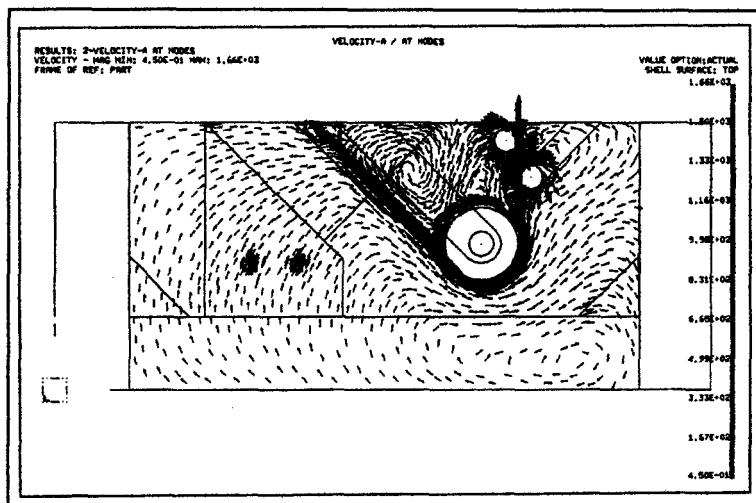


Figure 2.30 Écoulement calculé à l'aide d'un modèle numérique, vue d'un plan au centre pour un bain de plus petite grandeur (Gagné et Gaug, 1998)

La deuxième modélisation effectuée simultanément à ce projet est une des deux parties d'un contrat de validation du modèle numérique (Ajersch et Binet, 1998). Cette modélisation a été effectuée par l'Institut des Matériaux Industriels du Conseil National de Recherche du Canada en utilisant un logiciel d'éléments finis développé par ce centre de recherche. Les résultats de ces travaux ont été publiés dans un rapport interne (Hétu et Perrault, 1998), dans un rapport pour le compte de l'ILZRO (Ajersch et Binet, 1999) et lors de la conférence de Galvatech 1998 (Ajersch et al, 1998).

La moitié d'un bain tridimensionnel modélisé par ces auteurs comporte 386349 éléments tétraèdraux à quatre noeuds, incluant la gorge d'un inducteur (figure 2.31). Les dimensions du bain complet sont: 4110 mm de long, 3810 mm d'épaisseur par 2440 mm de profondeur, avec une capacité de 250 tonnes de zinc liquide. La cloche de ce bain est inclinée à 27° de la verticale et une plaque déflectrice est attachée à l'arrière du bain, près de la cloche. Le bain utilisé pour ce modèle est celui de Bethlehem Steel Burns-Harbor, le même bain qui servira aux essais industriels de validation.

Le code utilisé par les auteurs inclut un écoulement turbulent en incorporant le modèle de longueur de mixage de Prandtl et l'approximation de Boussinesq (eddy-viscosity) lors de la solution des équations de conservation basées sur un Reynolds moyen. Les propriétés du zinc liquide à 460°C utilisés sont de 6520 kg/m³ pour la

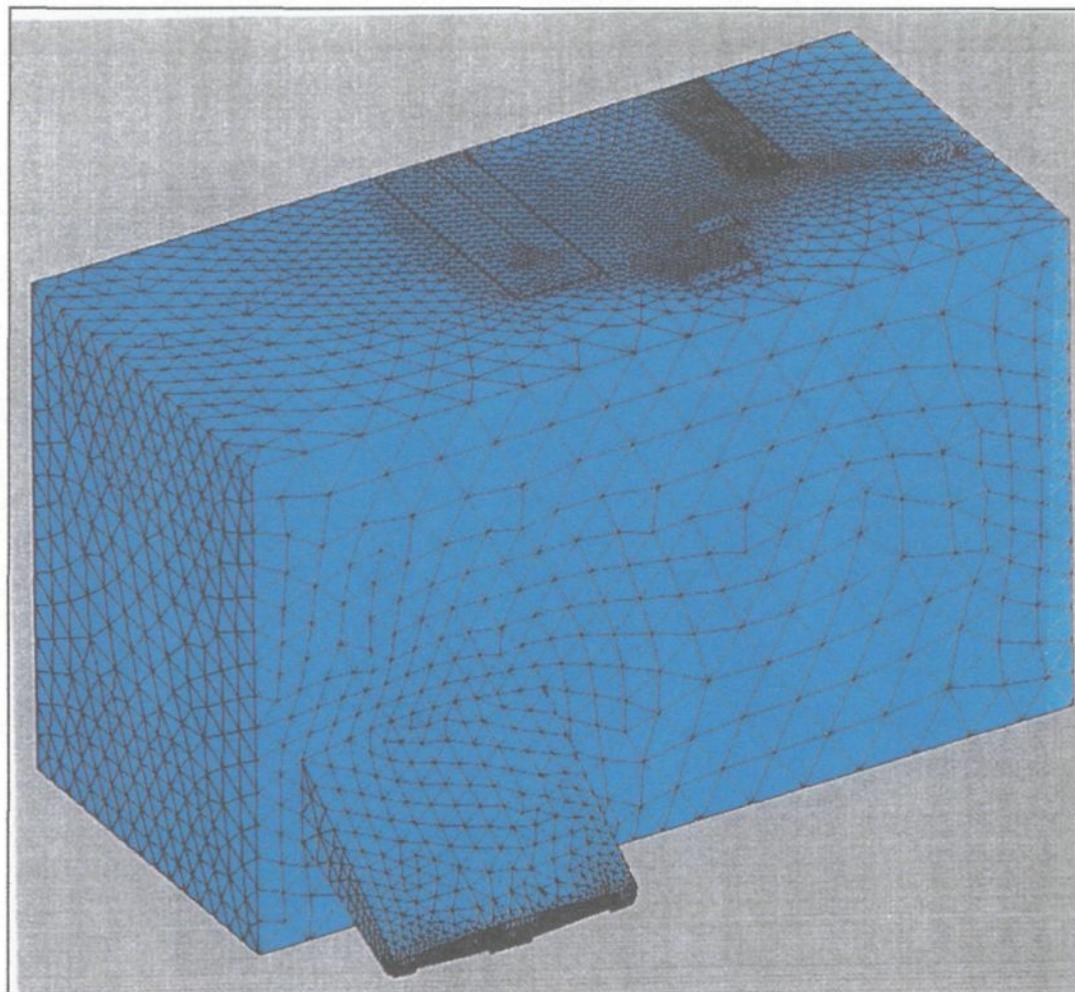


Figure 2.31 Maillage du bain de galvanisation et de la gorge des inducteurs, vue de l'arrière (Ajersch et Binet, 1999)

densité et de 0.0034 Pa.s pour la viscosité. Les calculs ont été effectués en régime permanent et les tensions de surface ont été négligées.

Neuf différentes configurations ont été calculées numériquement avec comme variables:

1. vitesses de feuille de 0,5, 1,0 et 2,0 m/s,
2. largeurs de feuille de 1,27, 1,49 et 1,72 m,
3. l'absence et la présence de plaque déflectrice,
4. la capacité des inducteurs (10% et 100%)

Les résultats de ces calculs montrent que la plaque déflectrice a une influence considérable sur l'écoulement dans la cuve. Cette plaque a pour effet de séparer en deux l'écoulement dans le bain (figure 2.32 et 2.33). La région arrière du bain se retrouve isolée du reste de l'écoulement, ce qui fait de sorte que cette zone présente un écoulement stagnant. La seconde région, près des rouleaux et de la feuille présente plusieurs zones de recirculation. La vitesse de la feuille influence aussi la structure de l'écoulement entre ces deux régions. À plus haute vitesse, la division des deux zones est évidente.

La vitesse de la feuille ne change pas l'allure générale de l'écoulement. Les zones de recirculation d'écoulement sont similaires pour des vitesses de 0,5, 1,0 et 2,0 m/s (figure 2.34). Par contre, l'augmentation de la vitesse de la feuille modifie

significativement l'écoulement à l'intérieur de la cloche (figure 2.35). À haute vitesse, l'entraînement de zinc est si marqué qu'un montant significatif de zinc est traîné à l'intérieur de la cloche. Cette succion a pour effet d'induire dans la cloche un écoulement qui part des extrémités de la cloche pour aller vers le centre du bain.

La largeur de la feuille influence l'écoulement surtout à l'intérieur de la cloche. La figure 2.36 montre une vue par dessus la cloche pour trois largeurs de feuille différentes. Lorsque la largeur de la feuille est réduite, l'écoulement est essentiellement planaire à l'intérieur de la cloche.

Finalement, les simulations aux conditions isothermes indiquent que les inducteurs ne génèrent pas de façon significative un écoulement supplémentaire dans le bain. La figure 2.37 montre le conduit relié à l'inducteur pour des capacités de 100% et 10%. À 10%, l'écoulement est pratiquement absent. À 100%, il existe un écoulement dans la gorge, mais celui-ci ne se propage pas dans le bain; il est court-circuité à l'intérieur même de la gorge. L'effet thermique ici négligé pourrait bien changer cet état de chose.

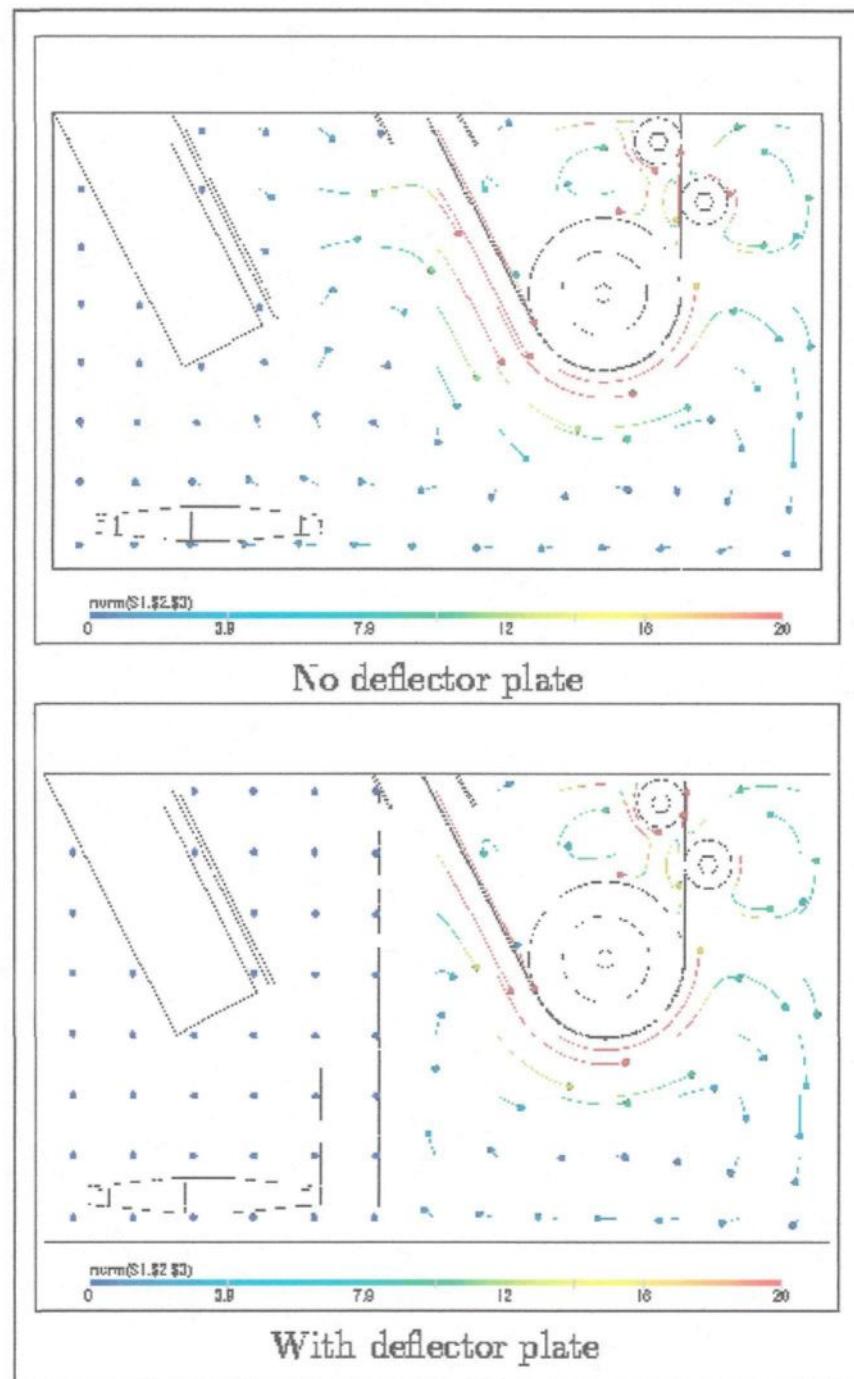


Figure 2.32 Effet de la présence de la plaque déflectrice sur l'écoulement dans le bain, plan au centre (Hétu et Perrault, 1998)

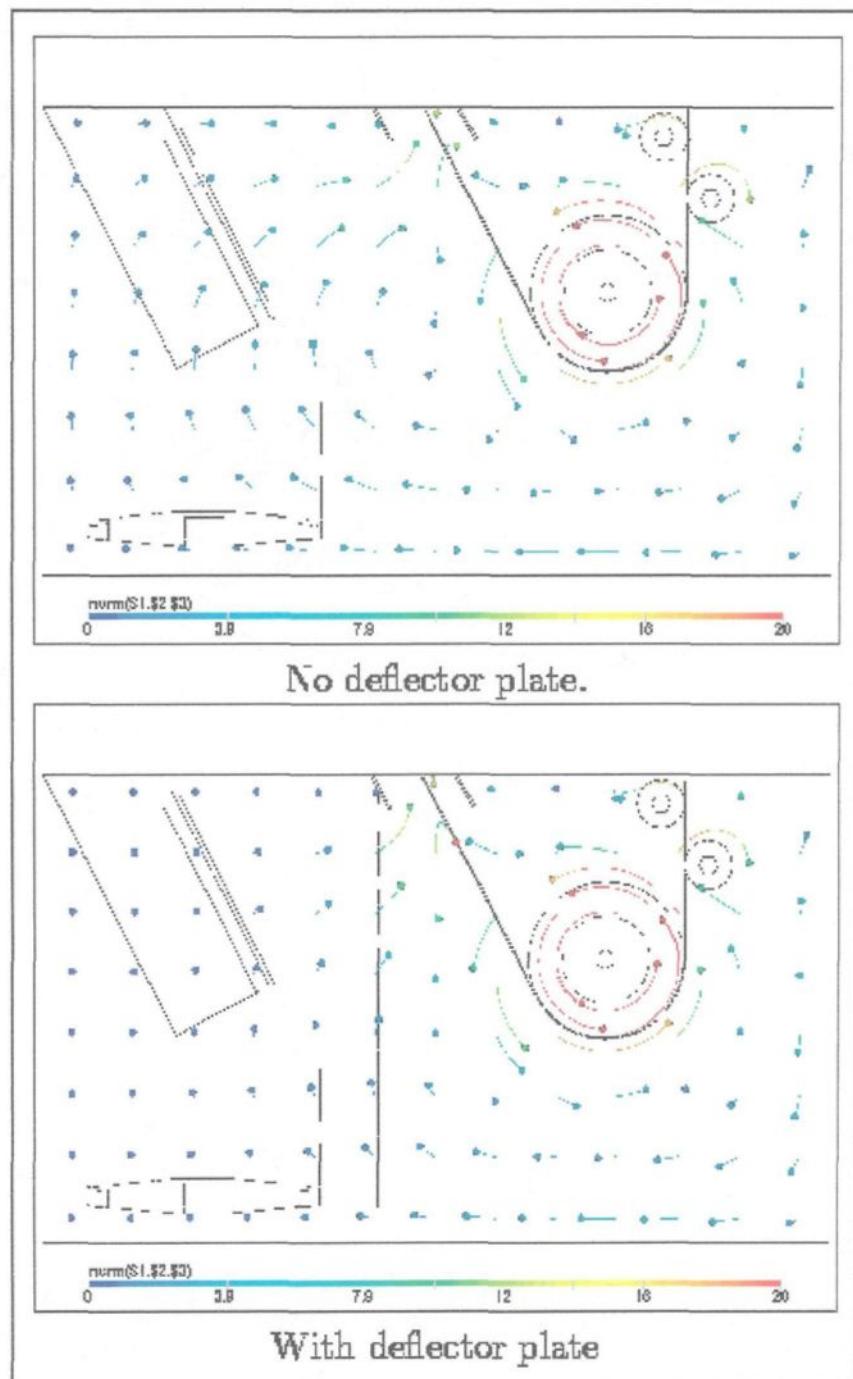


Figure 2.33 Effet de la présence de la plaque déflectrice sur l'écoulement dans le bain plan qui traverse les bras des rouleaux (Hétu et Perrault, 1998)

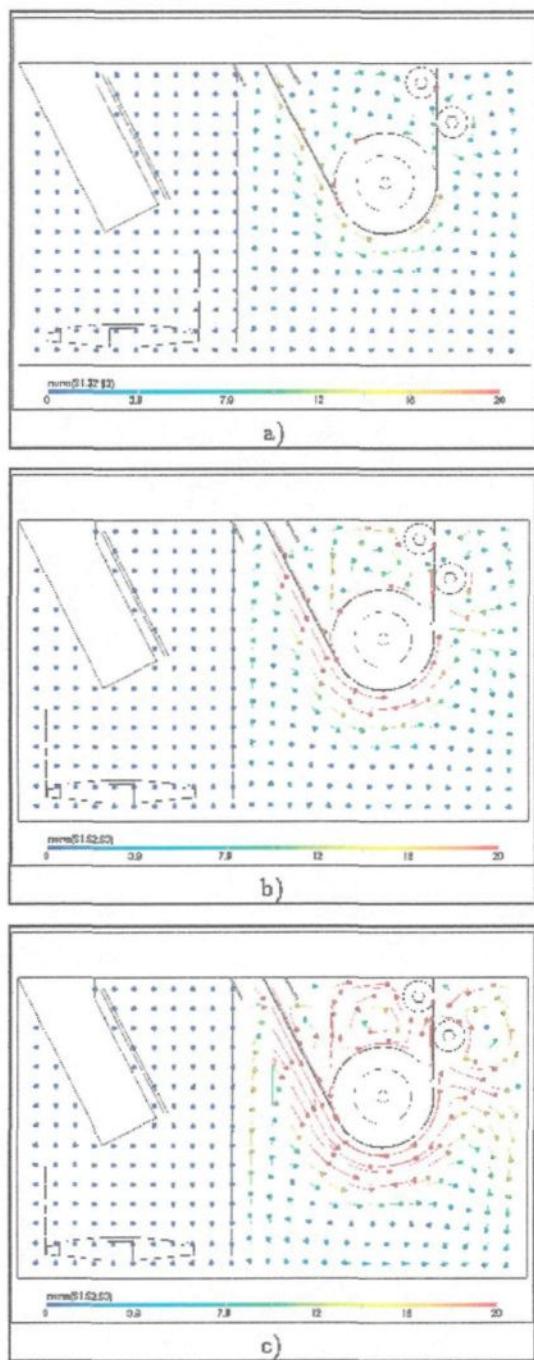


Figure 2.34 Effet de la vitesse de la feuille sur l'écoulement a) 0,5 m/s, b) 1,0 m/s
c) 2,0 m/s (Hétu et Perrault, 1998)

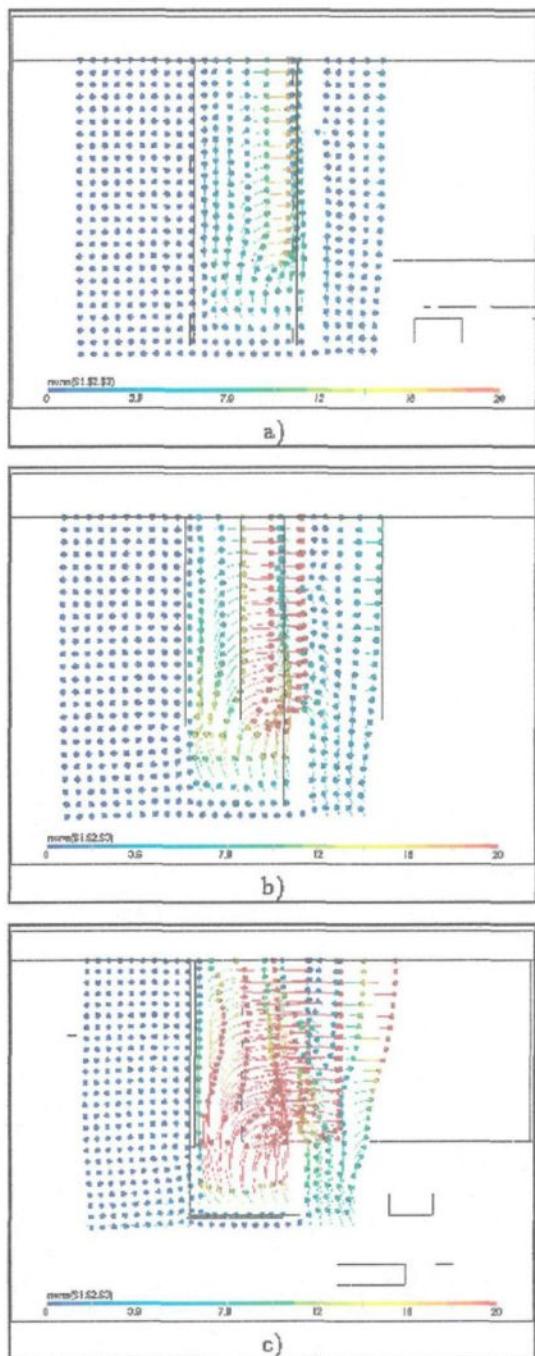


Figure 2.35 Effet de la vitesse de la feuille sur l'écoulement à l'intérieur de la cloche a)0,5 m/s, b)1,0 m/s c)2,0 m/s (Hétu et Perrault, 1998)

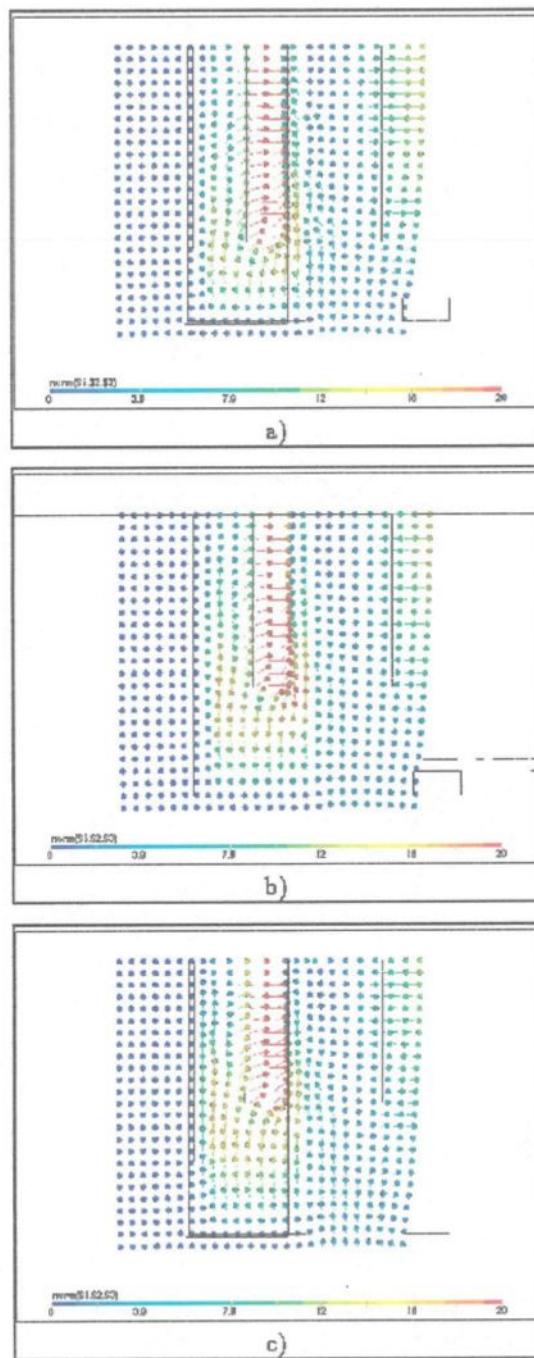


Figure 2.36 Effet de la largeur de la feuille sur l'écoulement à l'intérieur de la cloche a) 1,73 m, b) 1,5 m c) 1,27 m (Hétu et Perrault, 1998)

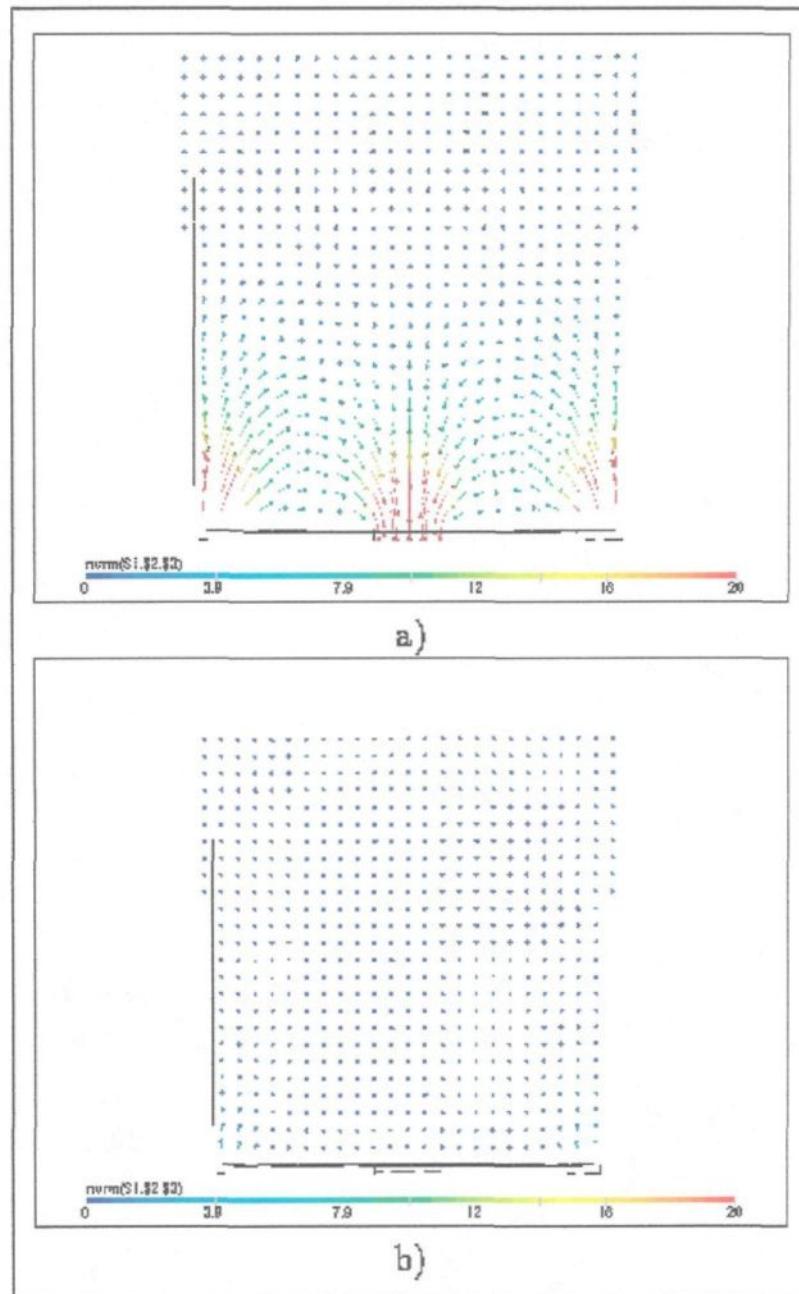


Figure 2.37 Effet de la présence des inducteurs sur l'écoulement à l'arrière du bain (vue de la gorge), capacité des inducteurs: a) 100% b) 10% (Hétu et Perrault, 1998)

2.3 Les couteaux à air

Les modèles à eau décrits dans la section précédente ont tous la particularité d'omettre l'effet du retour de fluide dans le bain après le passage de la feuille au niveau des couteaux à air. Ce phénomène sera étudié dans ce travail et les études effectuées sur l'essuyage par couteaux à air seront résumées ici.

Le principe des couteaux consiste à souffler un gaz sous forme de jet sur la feuille d'acier qui sort du bain. Les jets gazeux essuient de cette façon le surplus de zinc en excès. Thornton et Graff (1976) ont analysé le processus de la finition de la couche galvanisée à l'aide des jets d'air et ont proposé une représentation du procédé en la divisant en six régions. Ces six régions sont (figure 2.38):

1. La région où le fluide est entraîné hors du bain,
2. La région où une quantité de fluide est entraînée par la feuille hors du bain et une quantité de fluide tombe sous l'effet des jets et de la gravité,
3. La région où les jets frappent la feuille,
4. La région où les forces visqueuses rétablissent le profil de vitesse (pas d'interaction avec les jets),
5. la région où il y a une augmentation de la viscosité du film et un début de solidification,
6. et enfin, la région où la couche est solide.

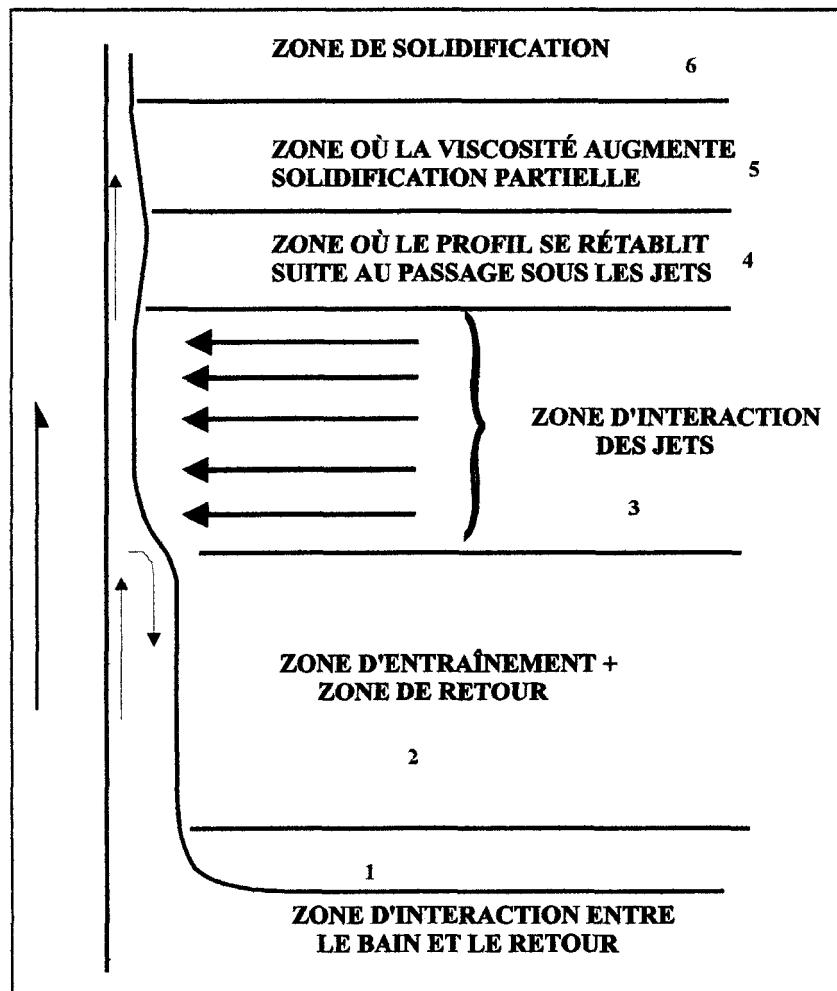


Figure 2.38 Représentation en six régions du procédé d'essuyage de la feuille à l'aide des couteaux à air (Thornton et Graff, 1976)

La zone où le zinc est retiré du bain et ensuite retourné à la masse liquide du bain est la région d'intérêt pour ce projet, car c'est celle qui peut affecter l'écoulement dans le bain. Pour vérifier son effet sur l'écoulement, il est nécessaire de quantifier l'épaisseur du retour de fluide dans le bain.

L'épaisseur de fluide qui reste sur la feuille après le passage sous les couteaux peut être donnée comme étant la différence entre l'épaisseur de fluide entraînée (t_U) et celle qui retourne vers le bain (t_D), soit:

$$t_F = t_U - t_D \quad (9)$$

où t_F est l'épaisseur de revêtement après l'interaction des jets, t_U est l'épaisseur de fluide qui est entraînée par la tôle lors de sa sortie du bain et t_D est l'épaisseur qui retombe après l'essuyage des couteaux.

2.3.1 Épaisseur de fluide sans les jets

L'épaisseur de fluide qui est entraînée par la feuille (t_U) peut être évaluée par un bilan de quantité de mouvement sur une plaque qui sort d'un bain contenant un fluide. Il existe beaucoup de publications qui étudient cette épaisseur de fluide entraînée par le retrait d'une plaque verticale, à la fois pour les régimes permanent et transitoire. Les auteurs Ellen et Tu (1983) résument, sous forme de graphique de

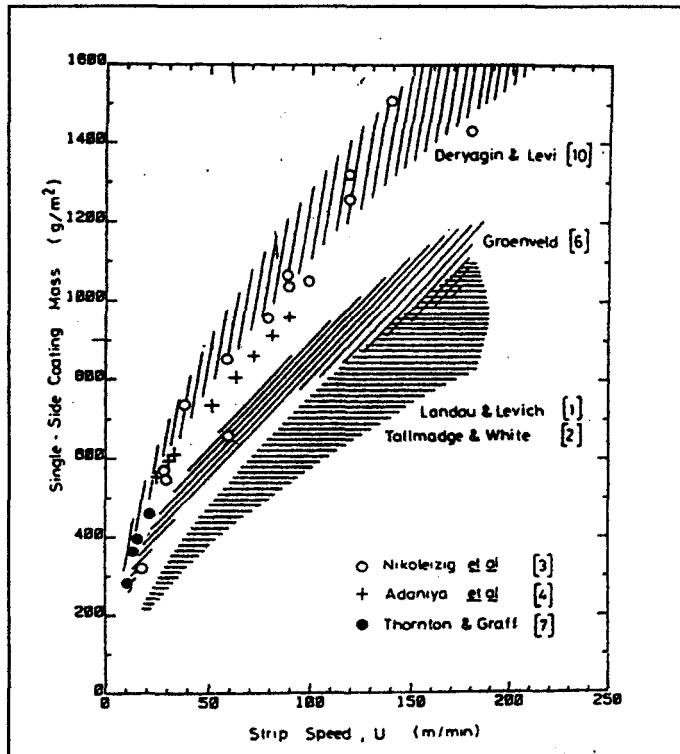


Figure 2.39 Masse de revêtement en fonction de la vitesse de la feuille selon divers modèles théoriques et expérimentaux (Ellen et Tu, 1976)

la masse de revêtement en fonction de la vitesse de la feuille, les différents modèles proposés (figure 2.39).

Une des ces théories porte sur le retrait d'un fluide en régime permanent sous l'effet de la gravité en tenant compte de la tension de surface. Cette théorie, proposée par Landau et Levich (1942) ainsi que par Tallmadge et White (1965) est conçue pour des nombres de Reynolds et de capillaires faibles. Ces auteurs ont combiné dans leur équations l'écoulement qu'on retrouve dans la région du ménisque

avec celui du retrait situé plus haut. Dans ce cas, il faut considérer l'effet de la tension de surface qui est responsable de la formation du ménisque.

L'équation qui régit cet écoulement prend la forme suivante:

$$\sigma \frac{d^3h}{dx^3} - \rho g = \mu \frac{\delta^2 u}{\delta y^2} \quad (10)$$

où h est l'épaisseur du film, σ est la tension de surface, μ est la viscosité et ρ est la densité.

En tenant compte de la conservation de masse,

$$Q = \int_0^t U dy \quad (11)$$

et en utilisant cette équation de Laplace pour la capillarité statique:

$$\frac{\rho g x}{\sigma} = \frac{\frac{d^2 h}{dx^2}}{\left[1 + \left(\frac{dh}{dx} \right)^2 \right]^{\frac{3}{2}}} \quad (12)$$

on obtient, après l'intégration de l'équation (10):

$$h = 0,944 \frac{(\mu U)^{\frac{2}{3}}}{\sigma^{\frac{1}{6}} (\rho g)^{\frac{1}{2}}} \quad (13)$$

où h est l'épaisseur de fluide en haut du ménisque. Cette équation est représentée à la figure 2.39 (région la plus basse, hachures horizontales). On voit que ce modèle

sous estime la valeur de l'épaisseur de fluide par rapport aux valeurs mesurées, plus particulièrement pour les vitesses de feuille élevées. Pour que ce modèle s'apparente aux valeurs mesurées, il faudrait utiliser une viscosité supérieure à 4 mPa.s ou bien une valeur de tension de surface très petite, ce qui ne correspond pas aux propriétés du zinc liquide.

D'autres modèles ont alors été conçus pour s'adapter au retrait de zinc liquide. Pour ce faire, des modèles avec des grands nombres de Reynolds et de capillarité (Landau et Levich, 1942 et Ellen et Tu, 1984) ont été utilisés. Ceux-ci négligent la présence du ménisque à la sortie du bain. Les hypothèses suivantes sont utilisées pour évaluer le profil de vitesse:

- Écoulement permanent en 2-D;
- Fluide Newtonien et incompressible, propriétés physiques constantes;
- Forces visqueuses plus importantes que les forces d'inertie;
- Tension de surface et oxydation en surface négligées;
- Tôle lisse, pas de formation de composés sur celle-ci;
- Pas de glissement entre la tôle et le fluide.

Le profil de vitesse du fluide sur la feuille qui sort du bain sans l'effet des jets peut alors être décrit par l'équation de mouvement:

$$\mu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = \rho g \quad (14)$$

et par l'équation (11).

Pour résoudre l'équation (14), il faut des conditions frontières appropriées. La première est évidente,

$$\text{C.F. (1): à } y = 0, \quad U = V_t;$$

mais la seconde l'est moins. Il existe trois cas limites possibles:

- 1) à $y = t$, $U = V_{tôle}$, comme si le fluide était à l'état solide;
- 2) à $y = t$, $U = 0$, vitesse nulle à l'extérieur;
- 3) à $y = t$ $dU/dy = 0$, gradient nul.

Pour résoudre les deux premiers cas, on peut utiliser $U = kV_{tôle}$ où $1 > k > 0$ à $y = t$.

On obtient alors comme solution des équations (11) et (14):

$$t = \frac{\sqrt{2}}{3} (k+1)^{\frac{3}{2}} \left(\frac{\mu V_{tôle}}{\rho g} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (15)$$

Avec les trois cas limites:

si $k=0$, $U=0$ alors:

$$t = \frac{\sqrt{2}}{3} \left(\frac{\mu V_{tôle}}{\rho g} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (16)$$

si $k=1$, $U=V_t$, alors:

$$t = \frac{4}{3} \left(\frac{\mu V_{tôle}}{\rho g} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (17)$$

si $dU/dy = 0$ à $y=t$, (flux maximum) alors:

$$t = \frac{2}{3} \left(\frac{\mu V_{tôle}}{\rho g} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (18)$$

L'analyse de l'épaisseur de revêtement sans les jets telle que décrite ici a été effectuée par Hrbek (1961), reprise par Thornton et Graff (1976), et utilisée par Adaniya et al (1980). Les auteurs allemands Nikoleizig et al (1978) ont préféré concevoir un modèle empirique à partir de données expérimentales qui donne la relation suivante:

$$t = R_1 \left(\frac{\mu V_{tôle}}{\rho g} \right)^{0.63} \quad (19)$$

Sur la figure 2.39, la zone hachurée au centre représente les résultats de l'équation (16) et la zone supérieure ceux de l'équation (18), pour une gamme de

viscosité entre 2.5 et 3.5 mPa.s. Les points expérimentaux sont issus des études effectués par Nikoleizig et al (1978), Adaniya et al (1980) et Thornton et Graff (1976). Ces données expérimentales indiquent que la meilleure corrélation est celle donnée par l'équation (18).

L'épaisseur de fluide entraîné sans couteau (t_U) a été évaluée par différents auteurs. En résumé, la valeur de t_U peut être exprimée par la relation suivante:

$$t_U = t_F = R_1 \left(\frac{\mu V}{\rho g} \right)^{R_2} \quad (20)$$

où μ est la viscosité du fluide, V est la vitesse de la feuille, ρ est la densité du fluide, g est la constante gravitationnelle et R_1 et R_2 sont des constantes qui dépendent des conditions frontières théoriques utilisées lors de la résolution des équations de continuité et de mouvement ou de la corrélation expérimentale calculée (R_1 varie entre 0,5 et 1 et R_2 entre 0.5 et 0.63).

2.3.2 Épaisseur de revêtement avec jets

L'évaluation de l'épaisseur finale de revêtement, après l'interaction avec les jets, est plus complexe. Il faut tenir compte, en plus de la vitesse de la tôle et des propriétés physiques du fluide, de nombreuses variables dues aux jets, soit:

- La pression;
- Le type de gaz utilisé;
- Le diamètre d'ouverture des couteaux;
- La distance entre les couteaux et la feuille;
- L'angle d'incidence du jet;
- Le design du couteau;
- etc.

Plusieurs auteurs proposent des modèles pour évaluer l'épaisseur finale du revêtement. Le plus simple est celui proposé par Nikoleinzig et al (1978) qui utilisent le bilan donné à l'équation (9):

$$t_F = R_1 \left(\frac{\mu V_{tôle}}{\rho g} \right)^{0.63} - R_1 \left(\frac{\mu V_{tôle}}{\rho g} \right)^{0.63} R_2 \left(\frac{\mu P_o}{\rho g} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (21)$$

alors

$$t_F = R_1 \left(\frac{\mu V_{tôle}}{\rho g} \right)^{0.63} \left[1 - R_2 \left(\frac{\mu P_o}{\rho g} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \quad (22)$$

Ce modèle regroupe les variables telles que le gaz, le diamètre d'ouverture ainsi que la distance entre le couteau et la feuille sous forme de constantes R_1 et R_2 .

Adaniya et al (1980) proposent un modèle un peu différent qu'ils ont construit à l'aide de bilan de matière et de mesures expérimentales. Le modèle empirique est

le suivant:

$$t_F = K_o \rho P_o^{-K_1} z^{K_2} V_t^{K_3} \exp \left(-\frac{K_4}{V_{tôle}} \right) \quad (23)$$

De la même façon que les auteurs allemands, ceux-ci regroupent sous forme des constantes K_o à K_4 les effets de l'ouverture des couteaux, du type de gaz et les propriétés du fluide. En utilisant comme fluide d'essuyage les gaz formés par la combustion du kérosène, ils ont obtenu les constantes suivantes:

$$-K_o=0.45, K_1=0.63, K_2=0.88, K_3=0.5, K_4=8.3$$

Un des modèles les plus élaborés est celui proposé Thornton et Graff (1976). Dans un premier temps, ils ont évalué l'équation (18) comme étant la meilleure approximation de la quantité de fluide qui est entraînée par la feuille, étant donné qu'elle représente le minimum d'énergie cinétique par unité de masse transmise au fluide par la feuille qui bouge. Ensuite, à l'aide des équations de Navier-Stokes, ils ont évalué le gradient maximum de pression. Les hypothèses suivantes, en plus de celles énumérées précédemment, ont été utilisées:

- Le jet d'impact exerce seulement une force normale sur le fluide;
- La mécanique d'interaction du jet avec le fluide n'est pas affectée par les changements locaux de surface sur le fluide.

L'équation de Navier-Stokes prend alors la forme suivante:

$$\mu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = \rho g + \frac{dP}{dx} \quad (24)$$

En solutionnant cette équation avec les mêmes conditions frontières que celles utilisées sans l'interaction des jets (hypothèse du flux maximum) et à l'aide de l'équation (11), on obtient:

$$\left(\frac{dP}{dx} \right)_{\max} = \frac{4}{9} \mu \frac{V_t}{t^2} - \rho g \quad (25)$$

Pour évaluer le gradient de pression maximum, il est nécessaire de décrire le jet d'air sous forme analytique. Le profil de vitesse doit tenir compte des critères suivants:

- le jet à la sortie est laminaire et devient ensuite turbulent;
- la vitesse centrale du jet obéit à une relation empirique donnée par Perry (1968) pour un jet en 2-D et turbulent;
- le point d'interaction entre le jet et la tôle est suffisamment loin de la sortie du nez (8 fois la grandeur de l'ouverture des couteaux ou plus) pour que le jet soit entièrement développé en turbulence.

Les auteurs ont choisi d'exprimer le profil de vitesse des jets selon la relation suivante décrite par Tollmien-Goertler (Schlichting, 1960):

$$W(z, \zeta) = 2.28 V_g \left(\frac{d}{z} \right)^{\frac{1}{2}} \left[\operatorname{Sech}^2 \left(\sigma \frac{\zeta}{z} \right) \right] \quad (26)$$

où z est la coordonnée centrale du jet, (ζ) est la coordonnée en hauteur, d est la grandeur d'ouverture des couteaux, V_g est la vitesse centrale du gaz à sa sortie des couteaux et σ est un facteur de turbulence (figure 2.40).

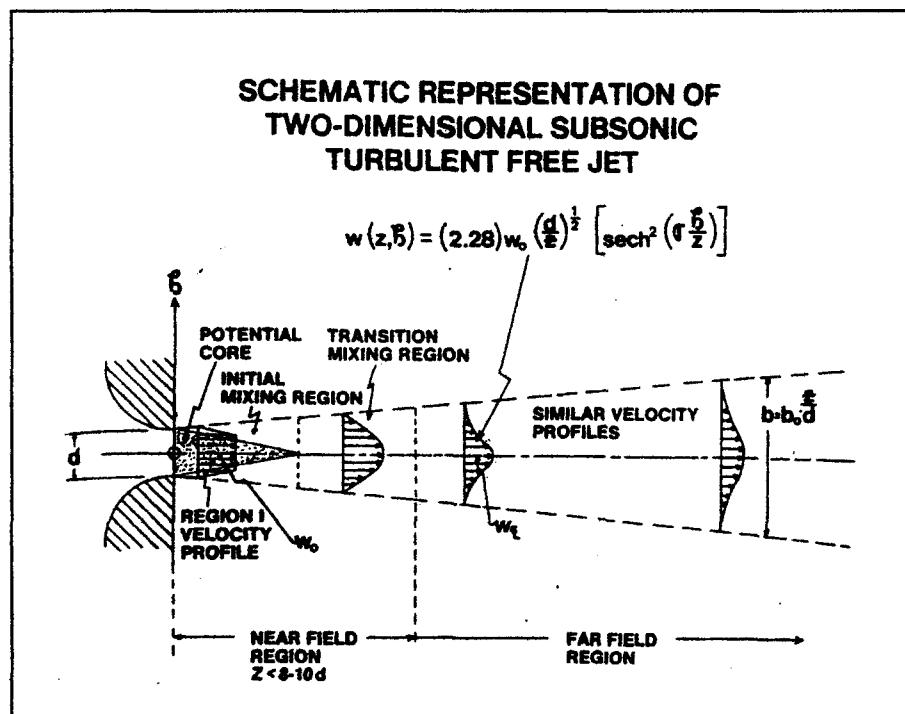


Figure 2.40 Schéma d'un jet d'air libre sous la vitesse du son, bidimensionnel et turbulent utilisé dans la description analytique de Thornton et Graff (1976)

Les auteurs ont ensuite exprimé la pression stagnante $(dP/dx)_{\max}$ en fonction de ce profil et des hypothèses suivantes:

- le profil qui se développe sur la tôle n'est pas affecté par la différence de température entre le jet à sa sortie et celle de la tôle ;
- le profil qui se développe sur la tôle est semblable à celui qu'on retrouverait sans tôle à une distance βz_0 , où z_0 est la distance entre le jet et la tôle (figure 2.41).

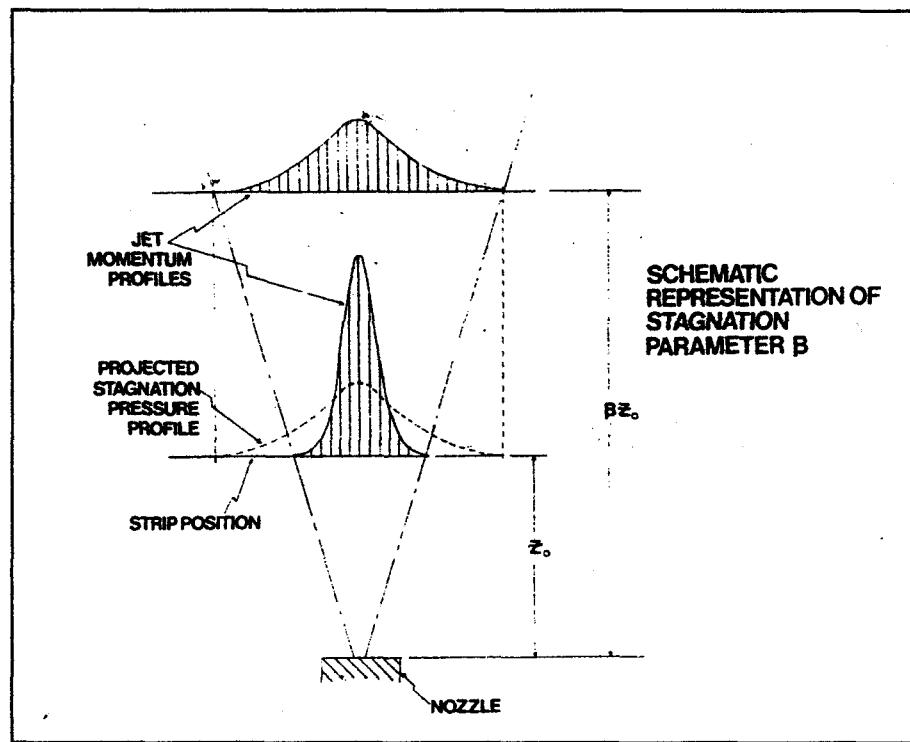


Figure 2.41 Représentation schématique d'une méthode pour déduire le profil de pression stagnante d'un jet de gaz selon Thornton et Graff (1976)

Ils ont obtenu:

$$\left(\frac{dP}{dx} \right) = 45.7 \left(\frac{\rho_F W_o^2 d}{\beta^2 z_o^2} \right) \quad (27)$$

où ρ_F est la densité du gaz, W_o est la vitesse du gaz à la sortie du nez des couteaux et z_o est la distance entre un couteau et la feuille.

En combinant les équations (25) et (27), et en négligeant la gravité (valide pour une vitesse de feuille pas très élevée), l'épaisseur finale devient:

$$t = \frac{1}{10} \beta z_o \left(\frac{\alpha \mu_o V}{\rho_F W_o^2 d} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (28)$$

où α est la viscosité relative et μ_o est la viscosité de référence.

De plus, si le jet est un gaz parfait, de rapport de chaleur spécifique γ , alors le flux de mouvement par unité d'épaisseur peut être exprimé en terme de la pression d'alimentation P_o et de l'efficacité du jet:

$$\rho_F W_o^2 d = \eta d \frac{2\gamma}{\gamma - 1} p_A \left(\left(\frac{p_o}{p_A} \right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}} - 1 \right) \quad (29)$$

En combinant les équations (28) et (29) on obtient comme épaisseur de revêtement finale:

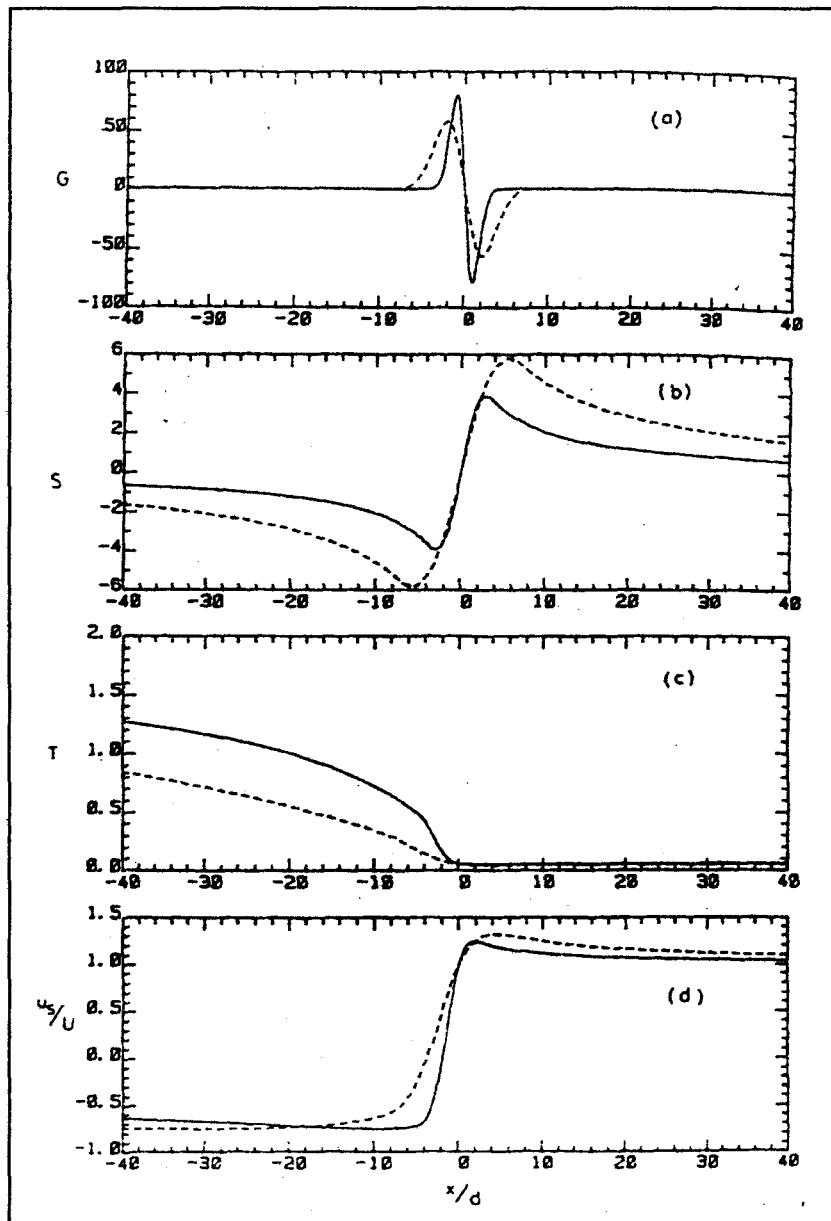
$$i_U = \frac{1}{10} \beta z_o \left(\frac{\alpha \mu_o V_{tôle} (\gamma - 1)}{2 \eta p_A \gamma d} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\left(\frac{p_o}{p_A} \right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}} - 1 \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (30)$$

Dans ce modèle, le produit des deux facteurs β et $\alpha^{0.5}$ est une constante qui sert de facteur correctif. Sa valeur doit être déterminée expérimentalement. Thornton et Graff (1976) ont évalué cette constante et sa valeur varie entre 0,99 et 2,25. Une valeur de 1,5 pour β et de 2,3 pour α est le meilleur choix d'après ces auteurs. Cependant, ces valeurs ont été estimées par les auteurs en utilisant une viscosité de référence du zinc de 1.3 mPa.s, ce qui est très faible.

Le modèle proposé par Thornton néglige la distribution de la pression sur la feuille de même que le cisaillement sur la feuille dus aux jets d'air. Leur équation montre d'ailleurs une pente légèrement différente entre les valeurs expérimentales et les valeurs issues de l'équation (28).

Ellen et Tu (1984) ont alors ajouté l'effet du cisaillement à un modèle en modifiant les conditions frontières de l'équation (22). Celles-ci sont alors:

$$\text{à } y = 0, \quad U = V_{tôle} \quad \text{et} \quad \text{à } y = t, \quad \mu du/dy = \tau$$



où G = accélération gravitationnelle effective, S = Contrainte de cisaillement, T = Épaisseur de film adimensionnelle, u_s/U = profil de vitesse. Les deux courbes sont pour des configurations de jet différentes. Pour plus de détails, voir Ellen et Tu (1976)

Figure 2.42 Valeurs adimensionnelles de la pression, du cisaillement, de l'épaisseur de revêtement et de la vitesse en fonction de la position des couteaux selon Ellen et Tu (1976)

Les résultats qu'ils obtiennent suite à l'ajout de la contrainte de cisaillement sur la feuille ont présentés à la figure 2.42. En a) on voit la variation de G qui est la valeur adimensionnelle des forces de corps ($G = 1 - (dp/dx)/\rho g$). En b), c'est la valeur adimensionnelle de la contrainte de cisaillement le long de la feuille. En c), c'est la valeur adimensionnelle de l'épaisseur de fluide. Finalement, en d) on retrouve la valeur adimensionnelle du profil de vitesse le long de la feuille.

D'autres modèles existent pour calculer l'épaisseur finale du revêtement en fonction des paramètres d'utilisation des couteaux. Par exemple, on peut mentionner le travail effectué par Tuck (1983) qui prédit l'épaisseur finale du revêtement en tenant compte de la distribution de la pression sur la feuille et d'un facteur temps. Milani et Laviosa (1996) ont construit un modèle 3-D de l'essuyage des couteaux au niveau de la sortie du bain pour évaluer l'effet des couteaux à air sur la formation des défauts de bout de feuille. Ils ont trouvé qu'il existe des discontinuités de la pression au bout de la feuille, ce qui cause la formation de ces défauts.

2.3.3 Éclaboussement et autres phénomènes

Une étude fondamentale a étudié les limites physiques de l'essuyage des couteaux à air en fonction de la vitesse de la feuille, de la pression d'air fournie aux couteaux et de la distance entre le nez du couteau et la feuille (Dubois, 1995). Les auteurs ont trouvé que la limite physique de l'essuyage par couteau à air consistait

en une instabilité soudaine de la surface libre sous le jet. Ce phénomène est celui de l'éclaboussement. À l'aide d'expériences sur un modèle à eau, les auteurs ont réussi à prédire les conditions qui entraînent l'éclaboussement et celles qui le restreignent.

Des observations industrielles indiquent que des vagues apparaissent sous la région des couteaux, dû à l'action des jets d'air (figure 2.43). Il semble que seule cette région présente une surface de fluide liquide, par rapport au reste du bain entièrement recouvert d'une couche solide. Le mouvement du zinc liquide à cet endroit est dû à la turbulence des jets d'air qui frappent la feuille et imposent des contraintes sur la surface du bain tout autant que sur le revêtement liquide.

2.4 Inducteurs

La présence des inducteurs comme moyen de chauffage du bain affecte probablement l'écoulement dans le bain. Ceux-ci seront ajoutés au modèle numérique et la section qui suit servira à décrire ces appareils.

La compagnie Ajax Magnethermic (communication privée) a fourni des croquis des inducteurs à étudier ainsi que des mesures de vitesse et de température au niveau des canaux intérieurs. Les figures 2.44 à 2.46 illustrent ces inducteurs ainsi que leur position sur une cuve de galvanisation.

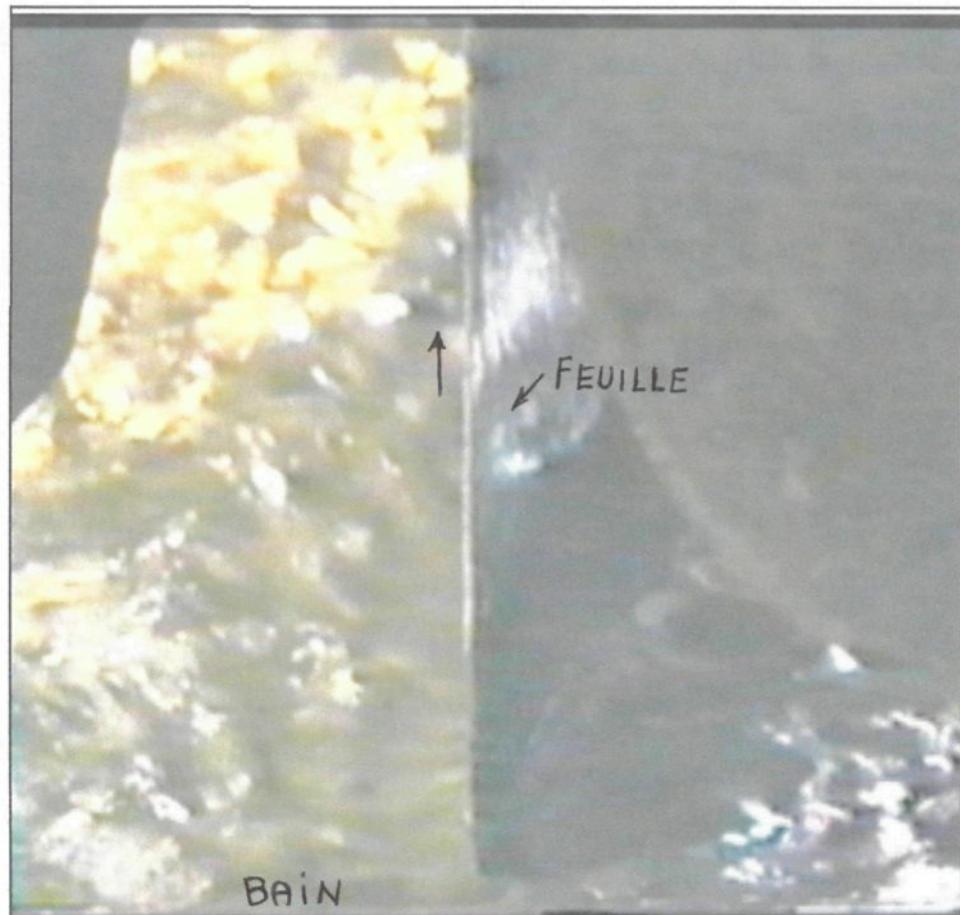


Figure 2.43 Photographie de la feuille qui sort du bain et de la formation des vagues

La figure 2.44 montre la géométrie d'un inducteur à boucle double, inducteur type utilisé dans la galvanisation. La puissance typique d'utilisation de cet inducteur en galvanisation est de 300 à 550 kW. Les caractéristiques suivantes nous ont été fournies pour un inducteur fonctionnant à 500 kW:

Vitesse moyenne du métal dans le conduit central:	0.762 m/s
Flux de métal:	180 tonnes par heure
Augmentation de température dans le canal:	5.6°C
Pression de zinc (p/pg):	40.6 cm de zinc.

La position où ces mesures ont été prises est indiquée à la figure 2.44. La compagnie mentionne aussi que la vitesse, le flux et la température du canal sont proportionnels à la racine carrée de la puissance et que la pression de métal est proportionnelle à la puissance.

La figure 2.45 montre un schéma de la manière dont l'inducteur est relié au bain de galvanisation. Celui-ci est positionné sur le bain via une gorge sous un angle de 30° par rapport à l'horizontale. La gorge est isolée pour éviter les pertes de chaleur. Enfin, la figure 2.46 montre une vue de dessus de l'inducteur relié au bain de galvanisation et de l'écoulement possible rencontré dans le conduit et dans le bain. Cette figure montre que le fluide est acheminé vers le bain via les deux extrémités de l'inducteur et est retourné dans l'appareil de chauffage au centre de celui-ci. La compagnie Ajax Magnethermic mentionne que l'étude de l'écoulement du zinc effectuée sur ses inducteurs est limitée à la zone interne aux inducteurs. En fait, l'écoulement dans la gorge n'est pas connu précisément.

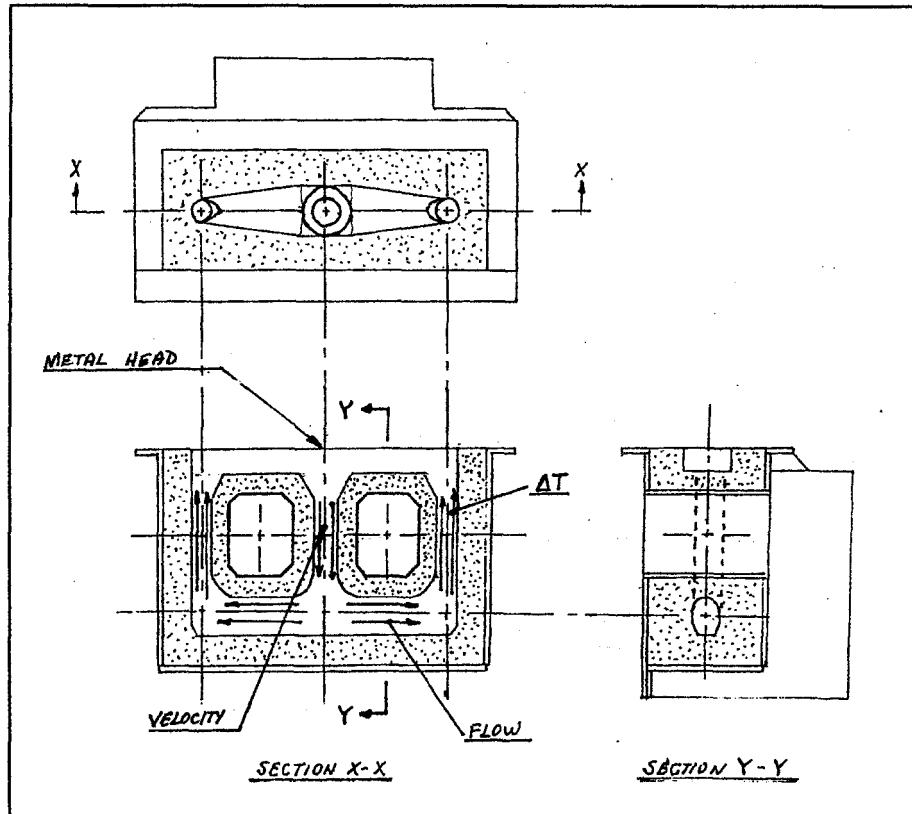


Figure 2.44 Géométrie des inducteurs tels qu'utilisés pour le procédé de galvanisation (Ajax Magnethermic)

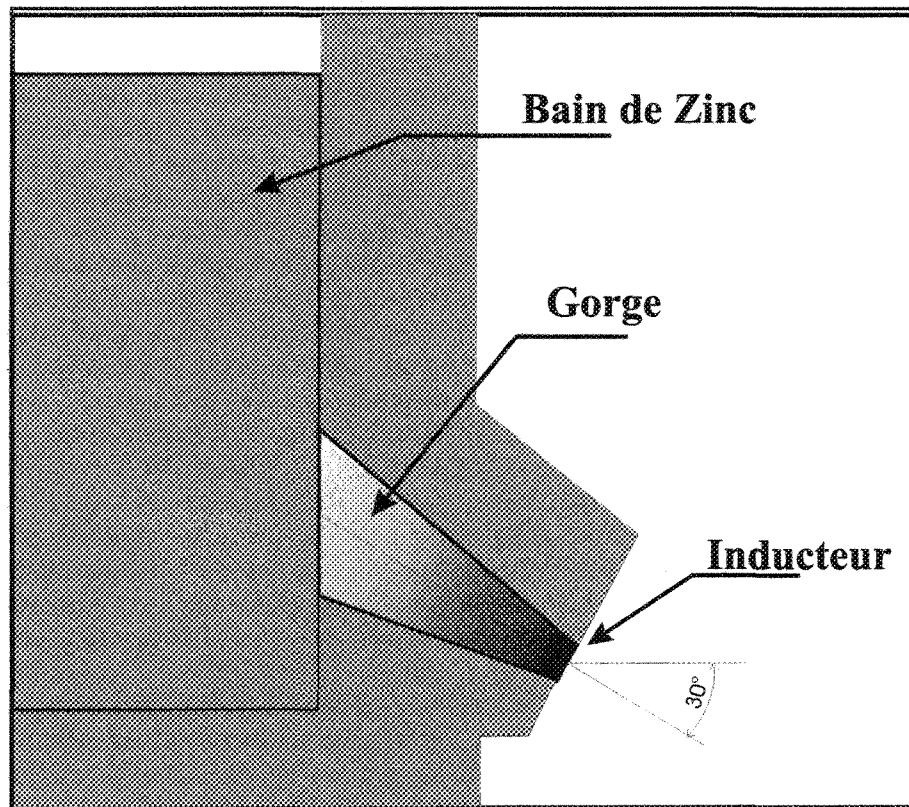


Figure 2.45 Position des inducteurs sur un bain de galvanisation (Ajax Magnethermic)

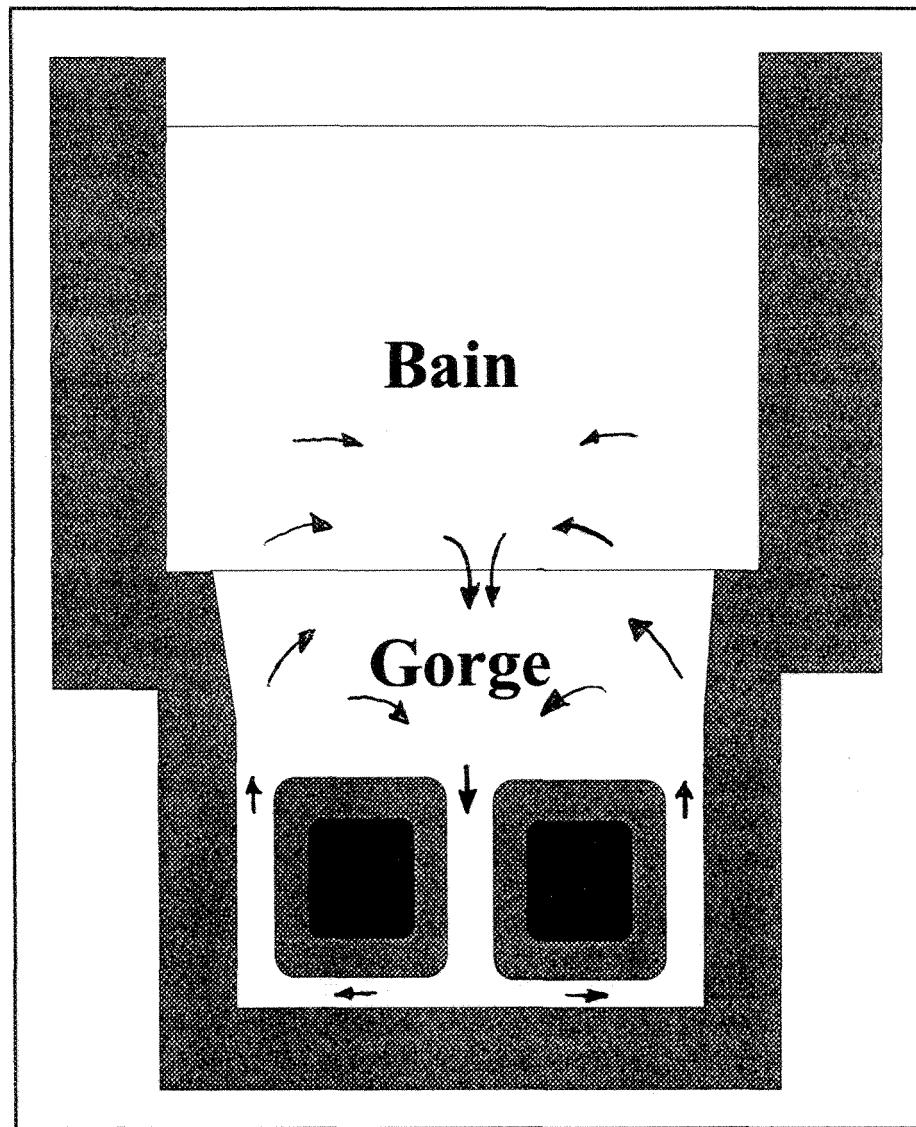


Figure 2.46 Schéma de l'écoulement dans la gorge et dans le bain dû à la présence d'inducteurs

Ce type d'inducteur procure une haute efficacité électrique, permet une bonne isolation thermique du bain et améliore la vie de service du bain. Dans le domaine de la galvanisation, très peu d'études sont effectuées sur le chauffage par induction extérieure. Cependant, il existe des études qui portent sur l'écoulement et les transferts de masse et de chaleur à l'intérieur de ces inducteurs.

2.4.1 Écoulement dans les inducteurs

Les recherches effectuées sur les inducteurs décrivent et étudient le fonctionnement de ces appareils ainsi que leurs forces et faiblesses (Eggers et al, 1991, Andree et al, 1991 et Feldman et al, 1988). Le mouvement du métal qu'on retrouve dans les canaux d'un inducteur est causé par les forces électromagnétiques de Lorentz (f_{el}) (Feldman et al, 1988) . Sous certaines conditions, ces forces fournissent un mouvement au métal liquide. Ainsi, dans les équations de mouvement de Navier-Stokes, au niveau des inducteurs, on ajoute une composante qui tient compte de ces forces:

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = -\nabla p + \rho g + \mu \nabla^2 v + f_{el} \quad (31)$$

L'écoulement qu'on retrouve dans les inducteurs provient d'au moins deux contributions: l'écoulement de transit (transit flow) qui est l'écoulement suivant le sens des canaux dans les inducteurs, et l'écoulement local qui se crée à cause de

perturbations locales dues aux variations de l'intensité de courant (Andree et al, 1991).

Il est connu que la géométrie des inducteurs affecte l'écoulement dans les inducteurs et dans le réacteur auquel ils sont reliés. En effet, chaque changement de géométrie dans le contour de l'inducteur entraîne des perturbations locales qui se transforment en tourbillons et qui, selon la géométrie, peuvent se transformer en écoulement de transit (Andree et al, 1991).

Au départ, la majorité des études considéraient que le mouvement de fluide était un effet direct de l'écoulement de transit, supposé grand. Les vitesses de ce dit écoulement étaient évaluées en mesurant les températures le long d'un modèle de canal. Les valeurs de vitesse issues de ce calcul étaient autour de 1 m/s (Andree et al, 1991).

Cependant, il a été démontré par Andree et al que l'écoulement de transit n'est pas l'écoulement primaire, mais que l'écoulement local est plutôt responsable du mouvement de fluide généré par les inducteurs. Néanmoins, ce projet n'ayant pas pour but l'étude de l'écoulement dans les inducteurs, il sera admis que seulement les renseignements fournis par Ajax Magnethermic seront utilisés comme données de base pour la modification du calcul de l'écoulement dans le modèle numérique du bain de galvanisation.

CHAPITRE 3

CONSIDÉRATIONS EXPÉRIMENTALES ET NUMÉRIQUES

L'écoulement dans la cuve de galvanisation est mieux connue grâce aux modèles numériques et à eau résumés dans les sections 2.2.1 et 2.2.2. Cependant, à ce stade, il est important d'entreprendre la validation des hypothèses émises lors des simulations numériques. Pour cette fin, un modèle à eau a été construit et l'écoulement à l'intérieur de celui-ci a été visualisé et des mesures de vitesses locales dans la cuve ont été effectuées. À l'aide des vitesses mesurées, l'indice de turbulence a aussi été calculé. Ces visualisations, ces mesures et ces calculs seront comparés ultérieurement.

De plus, l'effet du retour de fluide dans le bain après le passage de la feuille sous les couteaux à air a été étudié afin de visualiser son effet sur l'écoulement à l'intérieur du bain. Ceci permettra de connaître la pertinence d'un ajout ou non de cet effet sur le modèle numérique. De la même façon, la présence d'inducteurs sur la cuve a aussi été étudiée en incorporant un de ceux-ci dans le modèle numérique.

Finalement, des tests industriels ont été effectués. Ces tests consistent en la mesure de la teneur en aluminium en présence dans le bain et de la température du

bain. Des ajouts de traceur riche en aluminium permettront de déduire le schéma d'écoulement rencontré dans la cuve. La description plus complète de ces tests sera faite à la section 3.3.

3.1 Modèle à eau

Pour effectuer une validation en règle du modèle numérique, un modèle à eau de grandeur du cinquième d'un bain réel et de géométrie semblable au modèle numérique a été construit. La figure 3.1 présente un schéma de ce modèle physique qui consiste en une courroie de polymère qui est introduite de façon rotative dans une cuve de plexiglass transparent remplie d'eau du robinet. Ce modèle est construit avec deux rouleaux stabilisateurs, un angle de courroie modifiable (45° et 32°) et un seul couteau à air à la sortie de la feuille. La vitesse de la courroie est maintenue et ajustée au moyen d'un moteur à vitesse variable. L'ajustement de cette vitesse permet de faire varier le nombre de Reynolds. Il est aussi inclus dans ce modèle une cloche transparente, ce qui permet de visualiser l'écoulement à l'intérieur de ce conduit.

L'amélioration principale de ce modèle par rapport aux autres modèles à eau précédemment conçus réside dans la souplesse de sa construction. Ainsi, il est possible, par quelques modifications simples, de changer l'angle de la courroie, de retirer un ou deux rouleaux stabilisateurs, de changer la profondeur de la cloche, etc.

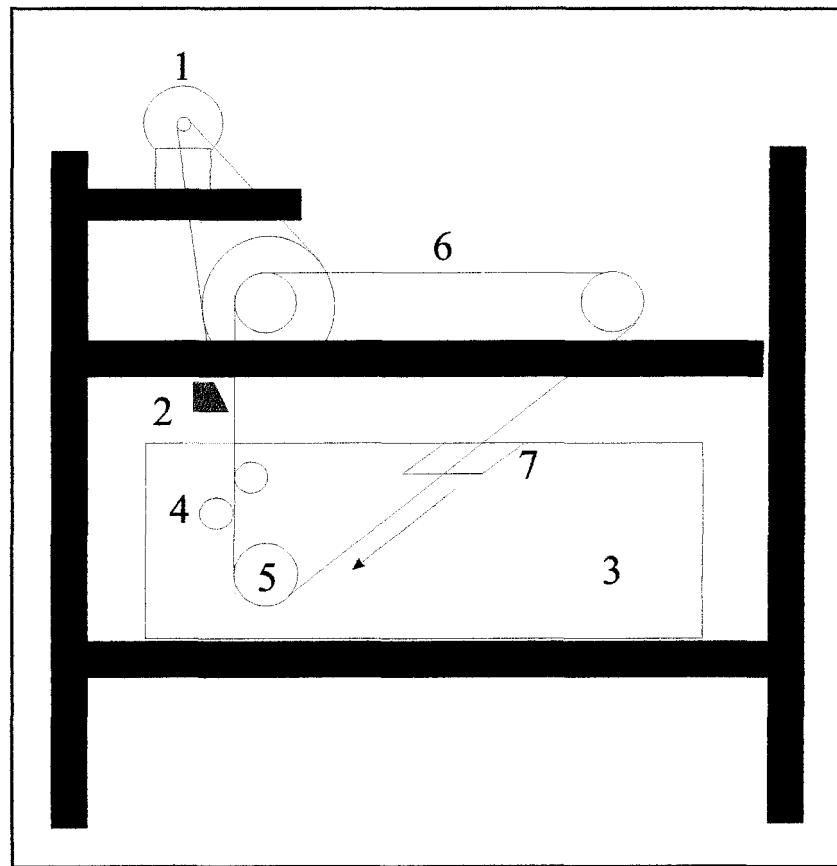


Figure 3.1. Schéma du modèle à eau 1) moteur à vitesse variable, 2) couteau à air, 3) cuve de plexiglass, 4) rouleaux stabilisateurs, 5) rouleau principal, 6) courroie, 7) cloche.

Comme on retrouve dans le bain réel une couche solide à la surface du zinc, cette particularité est simulée en recouvrant la surface de l'eau d'un plastique de rapport de densité semblable à celui du zinc solide à la surface. Bien entendu, la région des couteaux à air sera conservée libre, ce qui implique qu'à cet endroit le nombre de Froude ne sera pas respecté lorsque le nombre de Reynolds le sera.

Pour obtenir une similitude de l'écoulement entre le modèle à eau et le bain réel, leurs nombres de Reynolds doivent être égaux, selon le rapport suivant, où "m" fait référence au modèle à eau et "b" au bain réel:

$$Re_m = Re_b \quad (32)$$

$$\frac{\rho_m v_m L_m}{\mu_m} = \frac{\rho_b v_b L_b}{\mu_b} \quad (33)$$

Comme on sait que $L_m=1/5 L_b$, que les propriétés de l'eau à 20°C sont $\rho_m=998$ kg/m³ de $\mu_m=0.001$ Pa.s et que celles du zinc liquide contenant 0.15%Al à 470°C sont $\rho_b= 6500$ kg/ m³ et $\mu_b=0.0032$ Pa.s, on peut alors calculer le rapport de vitesse nécessaire pour ajuster la vitesse de la courroie selon:

$$v_b = 10 v_m \quad (34)$$

Cette équation implique que pour que le bain à eau représente un bain réel avec une vitesse de feuille de 2,0 m/s, la vitesse de la courroie devrait être de 20 m/s. Comme cette vitesse est très élevée et que le moteur rotatif utilisé ne possède pas la puissance requise, la vitesse utilisée lors des essais varie de 0.32 à 1.52 m/s. De toute manière, lorsque la vitesse est plus grande, il en résulte un éclaboussement qui nuit aux manipulations.

Cependant, tel que mentionné dans la revue de la littérature, lorsque le nombre de Reynolds du modèle à eau est de l'ordre de 10^5 , l'écoulement dans la cuve est turbulent, et le schéma d'écoulement est le même que pour un Re plus élevé. Cette hypothèse a été confirmée par la visualisation de l'écoulement pour plusieurs vitesses.

3.1.1 Visualisation de l'écoulement

Pour visualiser l'écoulement, la vitesse de la courroie utilisée est en général de 1.5 m/s. La visualisation de l'écoulement a été effectuée à l'aide d'un faisceau laser (celui-ci sera décrit à la section 3.1.2) et de l'injection d'un traceur sensible à la lumière. Deux faisceaux laser ont été positionnés à différents endroits dans le bain pour visionner plusieurs plans dans les trois axes. La figure 3.2 résume les différents plans visualisés.

La visualisation à l'extérieur de la feuille est simple à effectuer car la lumière du laser ne rencontre pas d'obstacle. Cependant, à l'intérieur de la feuille, il a fallu détourner le rayon à un angle de 90° au dessus du bain. Ensuite, une petite lame de plexiglass a été installée à la surface de l'eau pour éviter la trop grande réflexion de celle-ci. Le plan de lumière traverse alors cette lame positionnée au centre du bain.

Une autre difficulté s'est présentée lors de la visualisation à l'intérieur du bain:

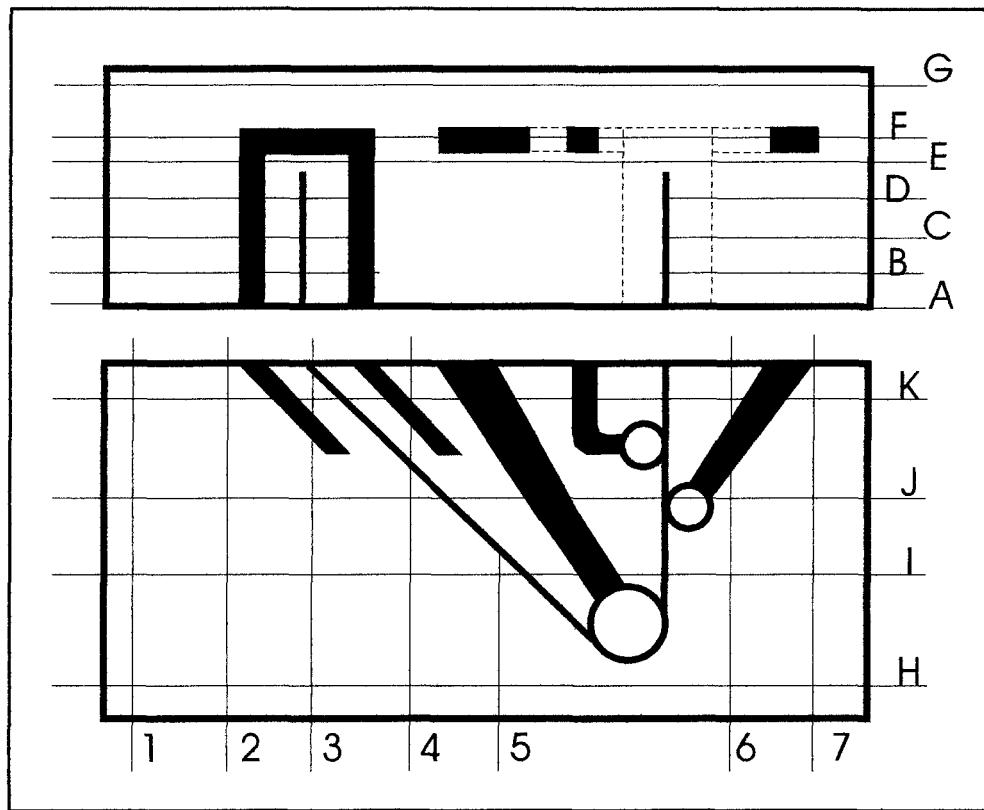


Figure 3.2 Schéma des plans choisis pour la visualisation de l'écoulement

la lumière du laser est réfléchie par la surface brillante du rouleau principal. Afin de pallier à ce problème, le rouleau principal a été anodisé et teint afin de rendre sa surface matte et noire. À ce moment, la visualisation à l'intérieur a été possible.

Une fois le laser installé, il faut observer l'écoulement à l'aide d'un traceur. Pour ce faire, de nombreux essais avec plusieurs types de traceur à divers endroits d'injection ont été tentés. Comme traceur, du lait, de l'encre de Chine et de la fluorescéine ont été injectés à l'aide de seringues à l'avant, l'arrière et au centre du

bain. Le meilleur traceur s'est avéré être la fluorescéine car ce colorant réagit à la lumière pour rendre les mouvements du fluide très visibles.

Les différents endroits d'injection de fluorescéine à l'aide de seringues n'ont pas donné des résultats très éloquents. Après plusieurs tests infructueux, le meilleur endroit d'introduction du traceur dans le bain est sur la courroie juste avant son entrée dans le fluide. À ce moment, on évite de perturber l'écoulement dans la masse du bain. D'ailleurs, pour la majorité des figures du chapitre 4, l'injection de fluorescéine est faite sur la courroie.

La visualisation de l'écoulement a donc été réalisée pour plusieurs configurations du bain, soit, avec 1, 2 et sans rouleaux stabilisateurs, avec un angle de feuille de 45° et de 32° et avec et sans la présence de plaque déflectrice. Chacune des visualisations de ces configurations a été enregistrée par caméra vidéo et des images de ces enregistrements ont été captées à l'aide d'un logiciel de traitement d'image informatique.

3.1.1.1 Visualisation du retour de fluide au niveau des couteaux à air

Un couteau à air a été usiné d'après un modèle réel de couteau et celui-ci a été ajouté sur la maquette du modèle à eau. Cet appareil est placé à l'avant du bain et est alimenté par un compresseur d'air qui fournit 414 kPa (60 psi) de pression à

l'entrée. Le couteau est mobile et peut être positionné pour plusieurs hauteurs de la surface du bain, pour plusieurs angles par rapport à la feuille et pour plusieurs espacements de nez à feuille.

Pour visualiser le retour de fluide sous les couteaux à la sortie de la feuille, il est nécessaire d'ajuster le nombre de Froude plutôt que le nombre de Reynolds, car les forces dues à la gravité prennent plus d'importance par rapport aux forces visqueuses dans cette région. En effectuant un rapport de similitude, on obtient:

$$Fr_m = Fr_b \quad (35)$$

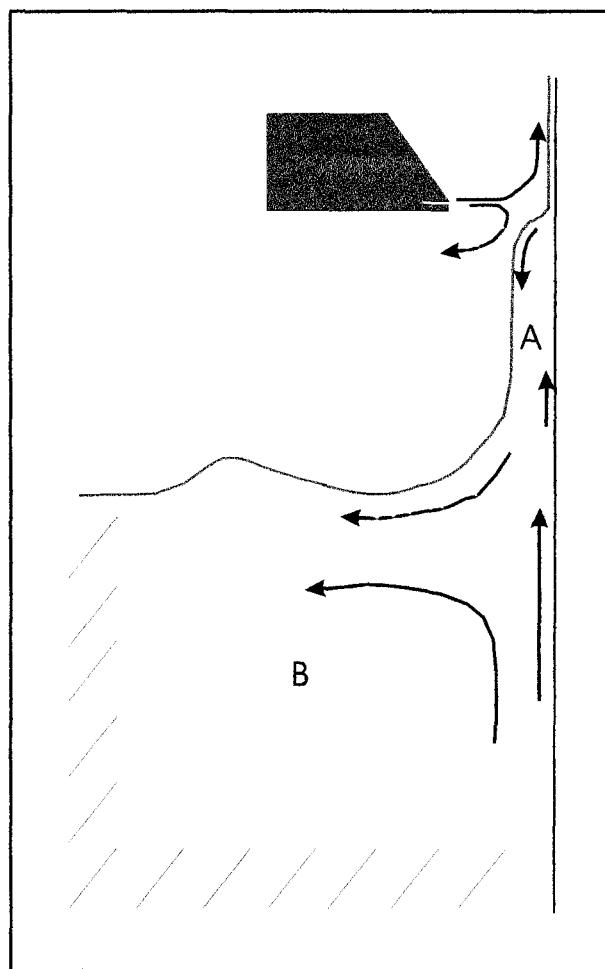
$$\frac{v_m^2}{g L_m} = \frac{v_b^2}{g L_b} \quad (36)$$

et

$$v_m = 0,45 v_b \quad (37)$$

Il est donc facile d'ajuster la vitesse de la feuille afin d'obtenir une similitude dynamique basée sur le nombre de Froude pour la région qui se situe au niveau du retour de fluide dû au couteaux. Cependant, lorsque des observations de l'écoulement sont faites à l'intérieur du bain, sous les couteaux, c'est alors le nombre de Reynolds qui prend de l'importance. Comme il n'est pas possible d'ajuster les deux nombres simultanément, chacun de ceux-ci sera considéré en fonction de la région d'observation.

La visualisation de la région où le fluide retourne dans le bain après essuyage s'est faite à l'aide de deux méthodes d'observation (figure 3.3). D'abord, la région située juste sous le couteau a été enregistrée sur bande vidéo à l'aide d'un éclairage normal centré sur la zone où le fluide retourne dans le bain. Ces enregistrements ont été faits pour trois vitesses de feuille, trois hauteurs de couteaux et trois distances d'espacement entre la feuille et le nez du couteau.



**Figure 3.3 Régions d'observation de l'écoulement sous le couteau à air
A) retour de fluide, B) dans la cuve**

Ensuite, des enregistrements de la zone du bain se trouvant sous le couteau ont été pris. Pour visualiser l'écoulement dans cette zone, un laser a été utilisé et de la fluorescéine injectée au bain. Ces visualisations ont été faites pour les mêmes conditions de positionnement des couteaux.

Bien entendu, afin de voir l'effet de la présence et du positionnement du couteau à air sur l'écoulement, des enregistrements ont aussi été pris pour les trois vitesses de feuille mais sans présence des couteaux. De même, pour ne voir que l'effet de la présence du couteau sur l'écoulement dans le bain, les tests ont été faits lorsque les deux rouleaux stabilisateurs sont absents. Ainsi, seule la présence du couteau sera considérée.

3.1.2 Mesures de vitesse

L'observation de l'écoulement permet de connaître la direction des trajectoires suivies par le fluide. Cependant, il est difficile avec ces observations de mesurer quantitativement la grandeur des vitesses. Afin de valider quantitativement le modèle numérique, des mesures de vitesse ont été prises à plusieurs endroits dans le bain à eau. Pour ce faire, la technique de vélocimétrie laser (LDV, Laser Doppler Velocimetry) a été utilisée.

3.1.2.1 Vélocimétrie laser

La lumière qu'émet un faisceau laser à gaz est cohérente et lorsque deux faisceaux séparés provenant d'une même source se rencontrent, leur recouplement produit une structure spatiale régulière de plans sombres et clairs appelés franges (figure 3.4). La distance l entre ces franges parallèles peut être évaluée en fonction de l'angle d'inclinaison des faisceaux (Maillet, 1990):

$$l = \frac{\lambda}{2 \sin \frac{\theta}{2}} \quad (38)$$

où λ est la longueur d'onde du laser et θ est l'angle d'inclinaison (figure 3.4). Lorsqu'une particule traverse le réseau de franges, elle est éclairée seulement au passage de chaque raie lumineuse et elle diffuse cette lumière. La lumière diffusée est reçue par un récepteur qui mesure sa fréquence f et calcule la vitesse v de la particule à partir de la distance entre les franges, soit (Maillet, 1990):

$$f = \frac{v}{l} \quad (39)$$

La vitesse d'une particule est donc déterminée seulement à partir de la distance entre les franges et de la période du signal de fréquence. Ce système permet une mesure absolue de la vitesse et ne nécessite pas d'étalon. Les mesures de vitesse effectuées par la technique LDV sont non invasives, i.e. qu'elles n'affectent pas

l'écoulement à quantifier. Par contre, pour obtenir des mesures, la présence de particules en suspension dans l'écoulement est nécessaire.

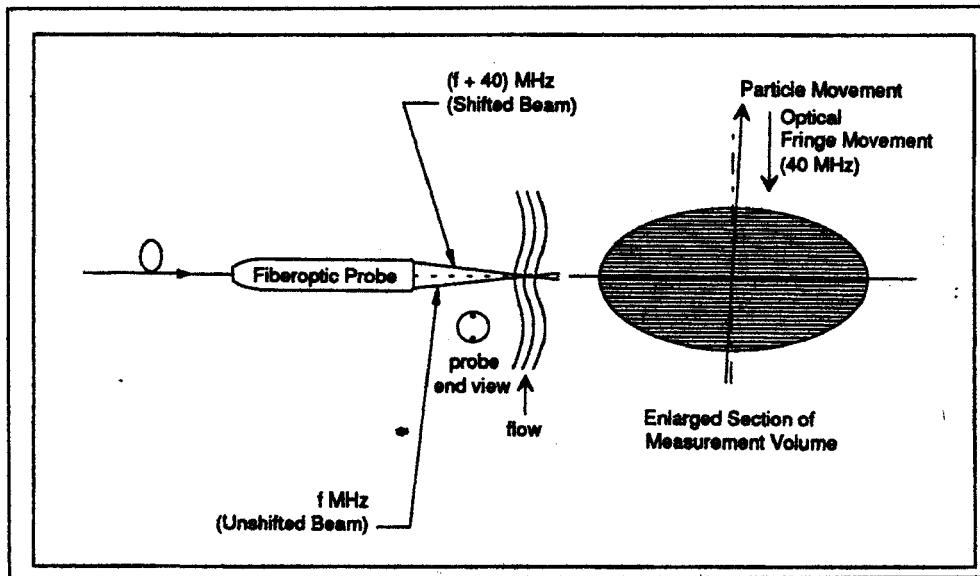


Figure 3.4 Schéma de la sonde optique et de franges (Instruction Manual, Model 9230 Colourlink™ Multicolor Receiver)

Le système de vélocimétrie laser utilisé est schématisé à la figure 3.5. Le laser à l'argon-ion multi couleurs émet le rayon qui est transmis au Colorburst. Le Colorburst permet de séparer le faisceau laser provenant de la source en trois couleurs différentes. Lorsque le faisceau entre dans le Colorburst, une cellule acoustique de Bragg sépare d'abord le rayon en deux faisceaux: un avec la fréquence de base et l'autre avec une fréquence décalée de 0 à 40 MHz. Ensuite, les deux faisceaux sont acheminés vers un prisme de dispersion qui sépare ceux-ci en trois

couleurs distinctes, soit vert (514,5 nm), bleu (488 nm) et violet (476,6 nm). Avec ce type de LDV, il est possible de mesurer simultanément les composantes x, y et z de la vitesse. Cependant, le système utilisé ne possède qu'une seule unité réceptrice de traitement (IFA 550) et la couleur verte sera choisie pour les mesures de vitesses.

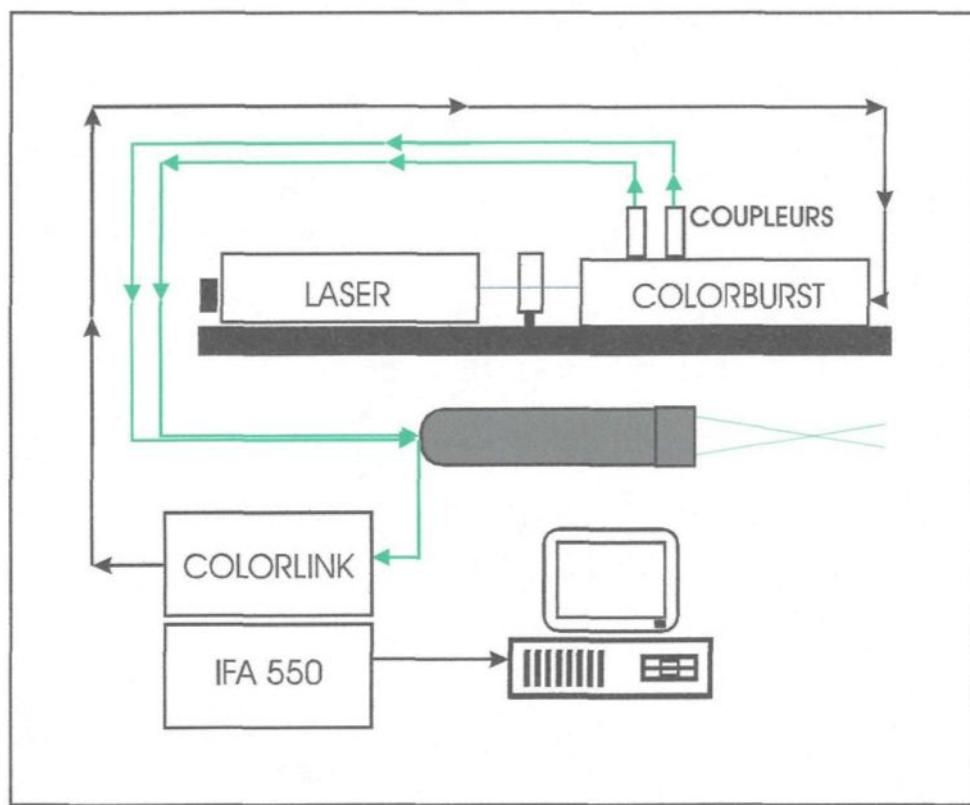


Figure 3.5 Schéma du système de vélocimétrie laser

Les faisceaux séparés sont ensuite acheminés vers une sonde optique à l'aide de coupleurs et de fibres optiques. La sonde optique reçoit les rayons laser et les transmet à l'extérieur en deux faisceaux convergents. La zone de croisement des deux faisceaux est celle où les mesures de vitesse sont effectuées. Le signal émis

par les particules qui traversent la zone de mesure est capté par la sonde optique et acheminé vers le Colorlink via des fibres optiques. Le Colorlink reçoit la lumière diffusée par les particules dans l'écoulement et convertit celle-ci en signaux électriques. Ces signaux sont envoyés à un processeur (IFA 550) qui extrait la fréquence des signaux. Ces données sont ensuite analysées et traitées par un ordinateur.

Le Colorlink permet aussi d'effectuer un décalage de fréquence sur le faisceau divisé (Instruction Manual, Colorlink, 1991). Ce décalage permet, sous certaines conditions, d'obtenir de meilleures lectures. Lorsque le LDV est utilisé sans décalage de fréquence, les franges sont fixes dans le volume de mesure. Par contre, lorsqu'on impose un décalage de fréquence, un des deux faisceaux est décalé alors que l'autre ne l'est pas. Ceci entraîne un mouvement des franges dans la zone de mesure dans la direction qui part du faisceau décalé vers le faisceau non décalé à une fréquence égale au décalage imposé. Lorsqu'une particule passe dans la zone de mesure, et se déplace dans le sens opposé à celui des franges, le signal qu'elle transmet est égal à sa fréquence plus celle du décalage. D'un autre côté, si elle se déplace avec le mouvement des franges, sa fréquence est égale à la différence entre le décalage de fréquence et la sienne.

Le système LDV utilisé sans décalage de fréquence permet de lire des vitesses modérées dont la direction est connue. Cependant, si on se trouve dans une zone

où les vitesses sont très faibles ou bien dans une zone où on rencontre un changement de direction de l'écoulement, il est alors utile, voire nécessaire d'utiliser un décalage de fréquence. De plus lorsque le LDV est utilisé sans décalage, il n'est pas possible de connaître la direction de la vitesse. En décalant un des deux faisceaux, il est possible de connaître cette direction. Par exemple (figure 3.6), avec un décalage de fréquence de 1 MHz, la fréquence de sortie est de 1 MHz à vitesse nulle. La fréquence augmente de 1 MHz dans la direction positive de l'écoulement et diminue de 1 MHz dans la direction négative. Lorsque le décalage de fréquence est utilisé, le logiciel FIND installé dans l'ordinateur traite les données en fonction de ce décalage pour en extraire les vitesses et les directions réelles des particules.

Le système IFA 550 est un processeur qui permet de traiter les signaux électriques envoyés par le Colorlink (Instruction Manual, IFA 550, 1988). L'IFA 550 extrait les signaux du bruit de fond et transforme les signaux en fréquences directement proportionnelles aux vitesses et les transmet à l'ordinateur. Pour extraire le signal, ce système utilise des filtres dont la limite inférieure permet d'éliminer les bruits de basses fréquences du signal analogique et la limite supérieure permet de réduire les interférences engendrées par les bruits de hautes fréquences. Le choix des filtres peut se faire en mode automatique, manuel ou "hardware". En mode "hardware", c'est le IFA 550 qui permet de choisir les filtres, en mode automatique, le logiciel FIND étudie chacun des filtres et sélectionne ceux qui donnent le plus grand

nombre de données. Le mode manuel permet à l'utilisateur de choisir lui même ces filtres.

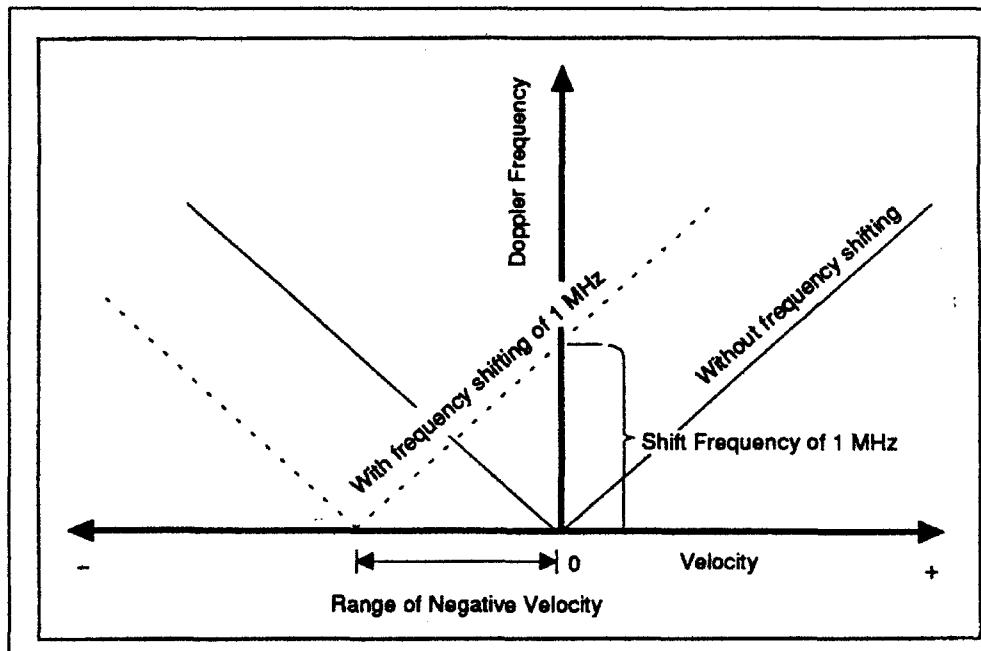


Figure 3.6 Vue graphique qui indique de quelle façon le décalage de fréquences élimine les ambiguïtés de sens d'écoulement (Instruction Manual, Model 9230 Colorlink™ Multicolor Receiver)

Les données sont recueillies par le logiciel FIND installé dans le micro ordinateur et se retrouvent sous forme de distribution de vitesses enregistrées dans le temps (Instruction Manual, FIND). Ainsi, le nombre de données à recueillir et le temps pour enregistrer celles-ci doivent être imposés au système de traitement des lectures. Pour les mesures de vitesse prises dans ce projet, le temps imposé est de

10 minutes et le nombre de lectures est limité à un fichier de 2 kilo-octets. En général, le mode d'acquisition de données s'est fait en mode automatique pour le choix des filtres. De même, lorsque la direction de la vitesse était connue et que cette vitesse était suffisamment élevée, le décalage de fréquence n'a pas été utilisé. Cependant, pour certains cas d'ambiguïté quant au sens de l'écoulement et pour les cas de vitesses changeant de direction, un décalage de fréquences fut utilisée. Pour choisir celui-ci, un balayage des décalages possibles a été effectué jusqu'au choix qui semblait le plus justifiable en fonction de la vitesse mesurée.

3.1.2.2 Expérimentation

Avant d'entreprendre les mesures de vitesse dans l'écoulement du modèle à eau de la cuve de galvanisation, l'ajustement du laser a été fait pour obtenir deux rayons de même intensité. Ensuite, des mesures de vitesses ont été prises sur un disque de papier sablé roulant pour tester le système et vérifier la justesse de mesures enregistrées par l'appareil LDV. Les premiers tests consistaient à mesurer la vitesse de la feuille dans le bain, sans la présence de la cuve de plexiglass. La mesure de la vitesse de la feuille a ensuite été reprise avec la cuve de plexiglass sans eau et finalement avec eau en modifiant la position de la sonde optique à cause de la diffraction. La vitesse de la feuille a aussi été calculée à l'aide de la vitesse de rotation d'un des rouleaux supérieurs mesurée avec un tachymètre. Les quatre mesures étant identiques, on peut alors conclure que les mesures sont bonnes et que

la diffraction causée par la présence de la paroi de plexiglass et de l'eau n'affectera pas les mesures de vitesse dans l'écoulement.

Des tests préliminaires de mesures de vitesse de l'écoulement ont été faits afin de voir si l'ajout de particules était nécessaire pour une bonne lecture. Il s'est avéré que les poussières en présence naturellement dans l'eau du robinet permettaient d'obtenir des lectures fiables.

Le système de vélocimétrie laser a alors été utilisé pour mesurer les vitesses en x, y et z en plusieurs endroits du bain, pour une vitesse de feuille de 1,5 m/s. La figure 3.7 montre les positions pour lesquelles la vitesse a été mesurée. Les vitesses dans la direction des x ont d'abord été mesurées le long de lignes droites dans le bain. La sonde optique a ensuite été retournée d'un angle de 90° pour mesurer les vitesses dans la direction des y. Pour les mesures de vitesse dans la direction z, celles-ci ont été prises en pointant la sonde optique sur la face avant et arrière du bain (plan yz). Pour évaluer la position des lectures dans la cuve, la sonde optique a été posée sur un table pourvue d'un règle graduée et le mouvement de la sonde a été mesurée à chaque déplacement. L'évaluation de la position en profondeur de la zone de mesure des faisceaux convergents a été faite à l'aide d'une règle et on suppose que les déplacements latéraux subséquents sont parallèles à la position de départ. Ainsi, l'erreur sur le positionnement de la sonde est de $\pm 0,001$ m dans la direction des x et y et de $\pm 0,005$ m dans la direction z.

Les vitesses enregistrées pour chaque point ont été prises pendant un laps de temps suffisamment long pour avoir une distribution statistique suffisante. La figure 3.8 illustre un exemple de mesure prise et de la distribution de vitesse enregistrée. De ces données, la vitesse moyenne est extraite par le logiciel FIND.

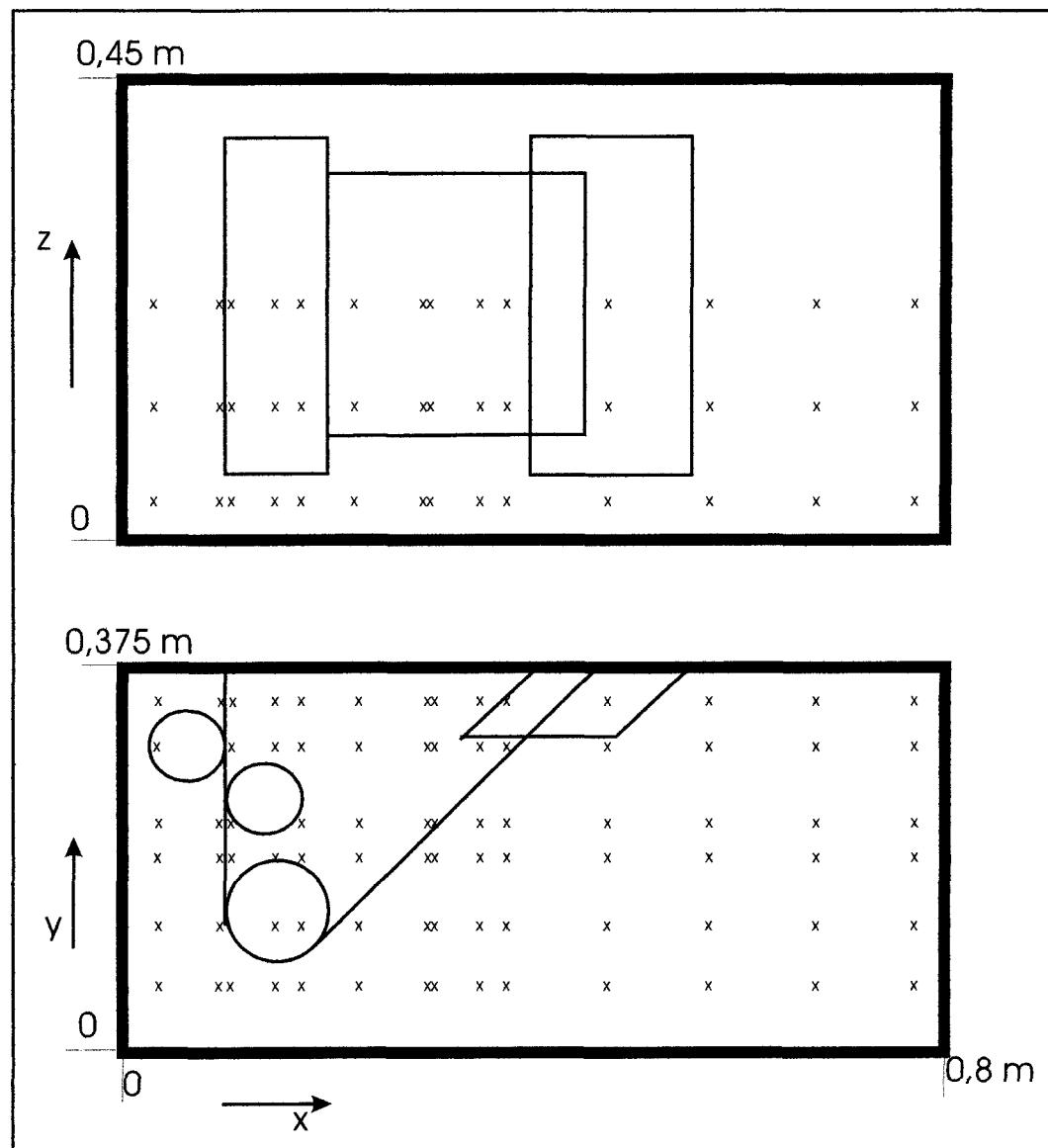


Figure 3.7 Position des lectures prises dans le modèle à eau

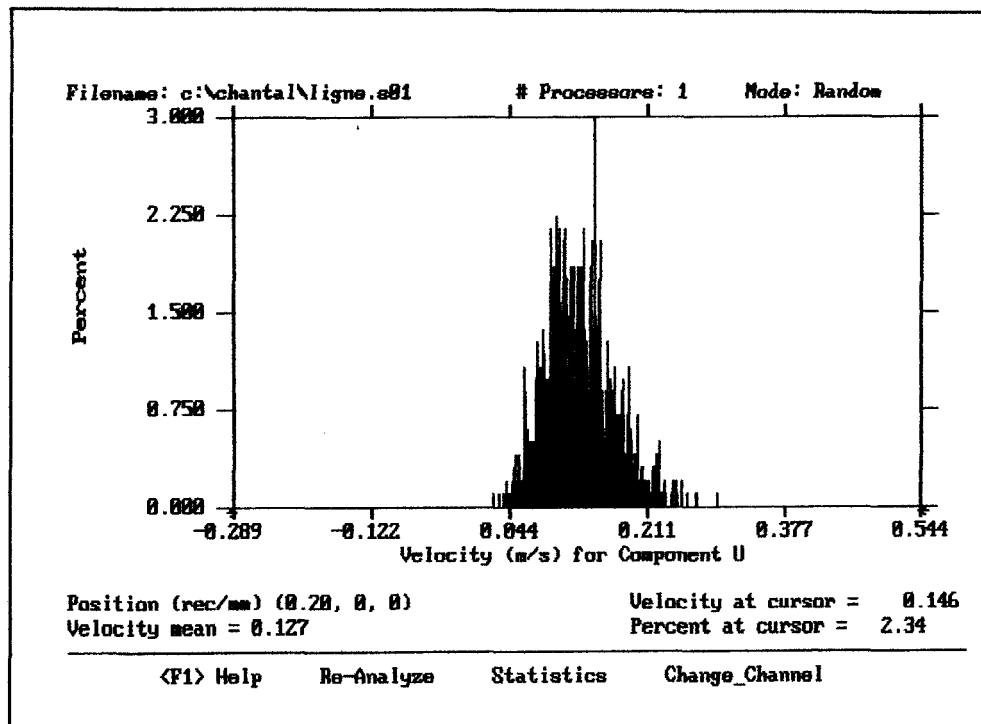


Figure 3.8 Exemple de lecture de vitesse

3.1.3 Calculs de turbulence

Les mesures de vitesse prises par le système LDV sont pratiquement instantanées dans le temps. Le nombre élevé de mesures prises sous forme de distribution permet de calculer le degré de turbulence des vitesses.

3.1.3.1 La nature de la turbulence

Dans un écoulement turbulent, les variables v_x , v_y et v_z ont des valeurs instantanées et il est impossible de prédire celles-ci exactement pour un instant donné. Cependant, les valeurs moyennes dans le temps de ces composantes de vitesse sont utilisées pour décrire la turbulence. Ainsi, on ajoute à ces valeurs moyennes une fluctuation, soit (Geiger et Poirier, 1994):

$$v_x = \overline{v_x} + v'_x \quad (40)$$

$$v_y = \overline{v_y} + v'_y \quad (41)$$

$$v_z = \overline{v_z} + v'_z \quad (42)$$

où v_x , v_y et v_z sont les valeurs instantanées des composantes de la vitesse, $\overline{v_x}$, $\overline{v_y}$ et $\overline{v_z}$ les valeurs moyennes dans le temps de la composante de la vitesse et v'_x , v'_y et v'_z les fluctuations par rapport à la moyenne. En incluant ces variations de la vitesse aux équations de continuité et de mouvement en 3-D, on obtient pour la composante x de la vitesse:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial \bar{v}_x}{\partial t} + \bar{v}_x \frac{\partial \bar{v}_x}{\partial x} + \bar{v}_y \frac{\partial \bar{v}_x}{\partial y} + \bar{v}_z \frac{\partial \bar{v}_x}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial}{\partial x} \left[\eta \frac{\partial \bar{v}_x}{\partial x} - \rho \bar{v}_x' \bar{v}_x' \right] \right. \\
 \left. + \frac{\partial}{\partial y} \left[\eta \frac{\partial \bar{v}_x}{\partial y} - \rho \bar{v}_y' \bar{v}_x' \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\eta \frac{\partial \bar{v}_x}{\partial z} - \rho \bar{v}_z' \bar{v}_x' \right] \right) + g_x \quad (43)
 \end{aligned}$$

Dans cette équation, les termes de la forme $\bar{v}_i' \bar{v}_j'$ sont le cœur de la turbulence et les modèles de turbulence utilisent ceux-ci pour fins de modélisation (Geiger et Poirier, 1994). Dans un écoulement turbulent en deux dimensions, ce terme doit toujours être négatif car si la fluctuation en x est négative la fluctuation en y doit être positive pour compenser. De la même manière, si la fluctuation en x est positive, celle en y doit être négative. Ce terme est donc toujours négatif pour un écoulement turbulent en deux dimensions et est toujours différent de zéro.

Ce terme de turbulence est aussi défini en termes de diffusivité de tourbillons:

$$\bar{v}_y' \bar{v}_x' = -\epsilon_M \frac{\partial \bar{v}_x}{\partial y} \quad (44)$$

où ϵ_M est la diffusivité de tourbillon qui est fonction à la fois des propriétés du fluide et de l'écoulement.

3.1.3.2 Expérimentation

À l'aide des mesures de vitesse prises par vélocimétrie laser, il est possible de calculer l'écoulement turbulent retrouvé dans le modèle à eau de la cuve de galvanisation. Les mesures de vitesse prises aux endroits sélectionnés se retrouvent sous forme de distribution de vitesse. À partir de cette distribution, on calcule la vitesse moyenne selon:

$$\bar{v} = \sum_{i=1}^N (v_i / N) \quad (45)$$

où N est le nombre de données et i indique le ième signal. Cette vitesse moyenne nous permet de calculer la fluctuation de la vitesse par rapport à celle-ci selon les équations (40) à (42).

Ensuite, on peut calculer les vitesses fluctuantes à partir de la racine de la moyenne du carré de la fluctuation (v'_{rmc}) pour chaque test et la valeur de $\overline{v'_x v'_y}$ pour certaines mesures selon:

$$\overline{v'_j}^2 = (v'_{rmc})^2 = \sum_{i=1}^N {v'_{ji}}^2 / N \quad où \quad j = x, y \quad (46)$$

et

$$\overline{v'_x v'_y} = \sum_{i=1}^N (v'_{xi} v'_{yi}) / N \quad (47)$$

Ces valeurs calculées sont des indicatrices du degré de turbulence qu'on retrouve dans l'écoulement du modèle à eau. Plus leur valeur absolue est élevée, plus la turbulence est grande. Celles-ci ont été calculées à l'aide d'un programme en Fortran (Annexe A).

3.2 Modèle numérique

La simulation numérique de l'écoulement dans le bain a été modifiée pour tenir compte de différents paramètres qui l'affectent. Ces modifications sont, d'un premier abord, les suivantes:

- À la surface du bain, une vitesse nulle a été imposée pour simuler la couche de zinc solide, sauf à l'intérieur de la cloche et dans la zone qui entoure la sortie de la feuille;
- Le maillage a été modifié afin d'ajouter la gorge qui relie l'inducteur à la paroi extérieure arrière du bain. Des conditions frontières seront introduites sur l'extrémité de la gorge à l'endroit où est relié l'inducteur;
- Un modèle de turbulence a été ajouté aux calculs.

Pour calculer l'écoulement dans la cuve de galvanisation par la méthode des éléments finis, le logiciel commercial FIDAP a été utilisé. Ce logiciel offre la possibilité de calculer des écoulements laminaire et turbulent pour des géométries complexes. Le logiciel offre plusieurs modèles de turbulence soit, modèle à zéro équation (zero-equation type simulations) et plusieurs types de modèles $k-\varepsilon$ (FIDAP, Theory Manual, 1993).

Le modèle de turbulence retenu pour le calcul de l'écoulement est le plus simple, soit le modèle à zéro paramètre (FIDAP, Theory Manual, 1993). Ce type de modèle est, d'un point de vue mathématique, identique à un système d'équations d'écoulement laminaire. La turbulence, dans ce type de modèle, est représentée par la viscosité moléculaire de l'écoulement qui peut être constante ou variable. L'utilisation de ce modèle permet d'obtenir une convergence rapide en comparaison avec les autres modèles de turbulence.

Le modèle utilisé pour la modélisation de la cuve tient compte d'une longueur de mélange l_m pour modéliser les fluctuations dans l'écoulement, soit:

$$v'_i = -l_m \frac{\partial \bar{v}_x}{\partial y} \quad (48)$$

Cette équation permet l'évaluation explicite d'une viscosité turbulente μ_t à partir de cette longueur selon:

$$\mu_t = \rho_o I_m^2 \sqrt{\left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial v_i}{\partial x_j}} \quad (49)$$

Ceci constitue l'hypothèse de longueur de mélange de Prandtl. Ce modèle implique un seul paramètre inconnu, la longueur I_m dont la distribution dans l'écoulement doit habituellement être entrée dans le logiciel à partir de données empiriques.

Cependant, la version 7.62 du logiciel FIDAP permet d'utiliser une sous routine pour obtenir un calcul automatique de la longueur I_m selon (FIDAP, Update, 1995):

$$I_m = \min (\kappa l_n, 0.09 l_c) \quad (50)$$

où l_n est la distance du plus près des murs et $\kappa \approx 0.41$. Cette distance est calculée automatiquement pour chaque point du maillage. Le paramètre l_c est une longueur caractéristique de l'écoulement. Celle-ci est unique et elle est obtenue automatiquement à partir de la plus grande valeur de l_n calculée dans le maillage.

Pour pouvoir valider le modèle numérique avec les mesures de vitesse effectuées à l'aide du modèle à eau, les propriétés physiques entrées dans le logiciel (sous la forme du nombre de Reynolds) seront modifiées afin de pouvoir comparer les résultats obtenus. Ces calculs seront effectués pour pallier au problème

d'ajustement de vitesse dans le modèle à eau mentionné plus haut.

3.3 Tests industriels

Les tests de validation en industrie ont été effectués avec le concours de la compagnie Bethlehem Steel sur le bain de galvanisation de leur usine de Burns Harbor. Cette ligne a été choisie comme celle qui correspondait le plus à une ligne de galvanisation standard. La ligne de galvanisation de Burns Harbor utilise une composition d'aluminium conventionnelle, autant pour le galvanisé que pour le galvanisé allié et, de plus, son bain est accessible et bien dégagé, ce qui accorde l'expérimentation.

Le principe général des tests de validation consiste en l'évaluation du mixage dû à l'écoulement dans le bain en utilisant la méthode des traceurs. Cette méthode consiste à introduire dans un liquide en mouvement un soluté qui peut être détectable à des endroits définis. On utilise cette méthode lorsqu'il est difficile, voire impossible de visualiser l'écoulement ou d'en quantifier les vitesses locales. Dans notre cas, le traceur utilisé a été l'aluminium. Ainsi, 20 lingots riches en aluminium (Zn-4%Al) de 10 kg chacun ont été ajoutés au métal liquide à des endroits stratégiques. Comme l'ajout des lingots jumbos (1 tonne) réguliers contenant 0.47% poids Al contribuent à augmenter l'aluminium en présence dans le bain d'une valeur de près de 0.0023%

poids Al, on considère qu'une addition de 200 kg de lingots riches en aluminium correspond à une augmentation moyenne de 0.0035% poids Al dans la masse totale du bain.

Ainsi, cet aluminium supplémentaire fourni par les lingots a été enregistré à l'aide de sondes Yamari situées à quatre endroits différents dans le bain (figure 3.9 et 3.10). Les sondes Yamari ont été développées par Yamagushi (1995) pour mesurer l'aluminium effectif en temps réel dans des bains de galvanisation. Ces sondes sont des cellules électrochimiques qui utilisent de l'aluminium très pur comme électrode de référence et du NaCl-AlCl₃ saturé avec du NaCl solide comme électrolyte. L'électrode de référence et l'électrolyte sont scellés sous vide dans un tube de quartz. Un schéma de l'assemblage des sondes est présenté à la figure 3.11. Pour recueillir les données mesurées par les sondes, le logiciel de Cominco, ALSENSORTM, a été utilisé (Adams, Tang et Kolisnyk, 1997).

Selon Cominco, les sondes enregistraient simultanément et constamment l'aluminium effectif et la température avec une erreur relative de $\pm 2\%$ des lectures. Cette technologie a été testée avec succès sur plusieurs lignes de galvanisation (Adams, Qiang et Tang, 1997 et Adams, Tang et Kolisnyk, 1997). Deux de ses senseurs ont été localisés de chaque côté du panier d'introduction des lingots et les deux autres ont été placés à l'avant du bain, dans les coins tel qu'illustré aux figures 3.9 et 3.10. Les positions ne sont pas symétriques l'une envers l'autre à cause de

l'accessibilité réduite du bain par les appareils qui l'entourent et à la nécessité de laisser de l'espace disponible aux travailleurs pour l'écumage et pour l'introduction des lingots.

La température et la composition en aluminium effectif ont été continuellement enregistrées à l'aide du système d'acquisition de données ALSENSOR fourni par Cominco. De plus, des échantillons ont été prélevés dans le bain près de chaque senseur afin de comparer les valeurs enregistrées par les sondes à celles mesurées dans les échantillons. Le système DEAL™ a été utilisé pour calculer l'aluminium effectif à partir des résultats d'analyses des échantillons. Toutes les données issues des quatre sondes ont été enregistrées sur un disque dur à toutes les une ou deux secondes et ont pu être reproduites en graphes de l'évolution de la composition en aluminium effectif du bain et de la température en fonction du temps et ce, pour chaque senseur.

La première série d'expérimentations consistait à faire varier la capacité du chauffage par induction de la ligne de galvanisation sans utiliser de traceurs. Pour la deuxième série, le chauffage a aussi été modifié tout en ajoutant des traceurs d'aluminium à l'arrière du bain. La troisième série consistait à ajouter des traceurs d'aluminium en plusieurs endroits différents du bain tout en maintenant le chauffage constant (en mode automatique). La dernière série consistait à enregistrer la transition de galvanisé allié à galvanisé par l'addition de grands lingots (jumbo de 1

tonne chaque) de 0.75% Al poids et de petits lingots (10kg) riches en aluminium. Le bain a été échantillonné près de chaque senseur immédiatement après l'addition de traceurs et à des intervalles de 12 à 24 minutes après l'addition. Les additions normales de lingots jumbo n'ont pas été interrompues pendant les tests. Ces additions ont lieu lorsque requises par la planification de production et pour maintenir le niveau d'aluminium et de liquide requis. Lors de la transition de galvanisé allié à galvanisé, des échantillons ont été prélevés près de chaque senseur à des intervalles de 60 à 90 minutes après l'addition de lingot jumbo ou de lingots riches en aluminium.

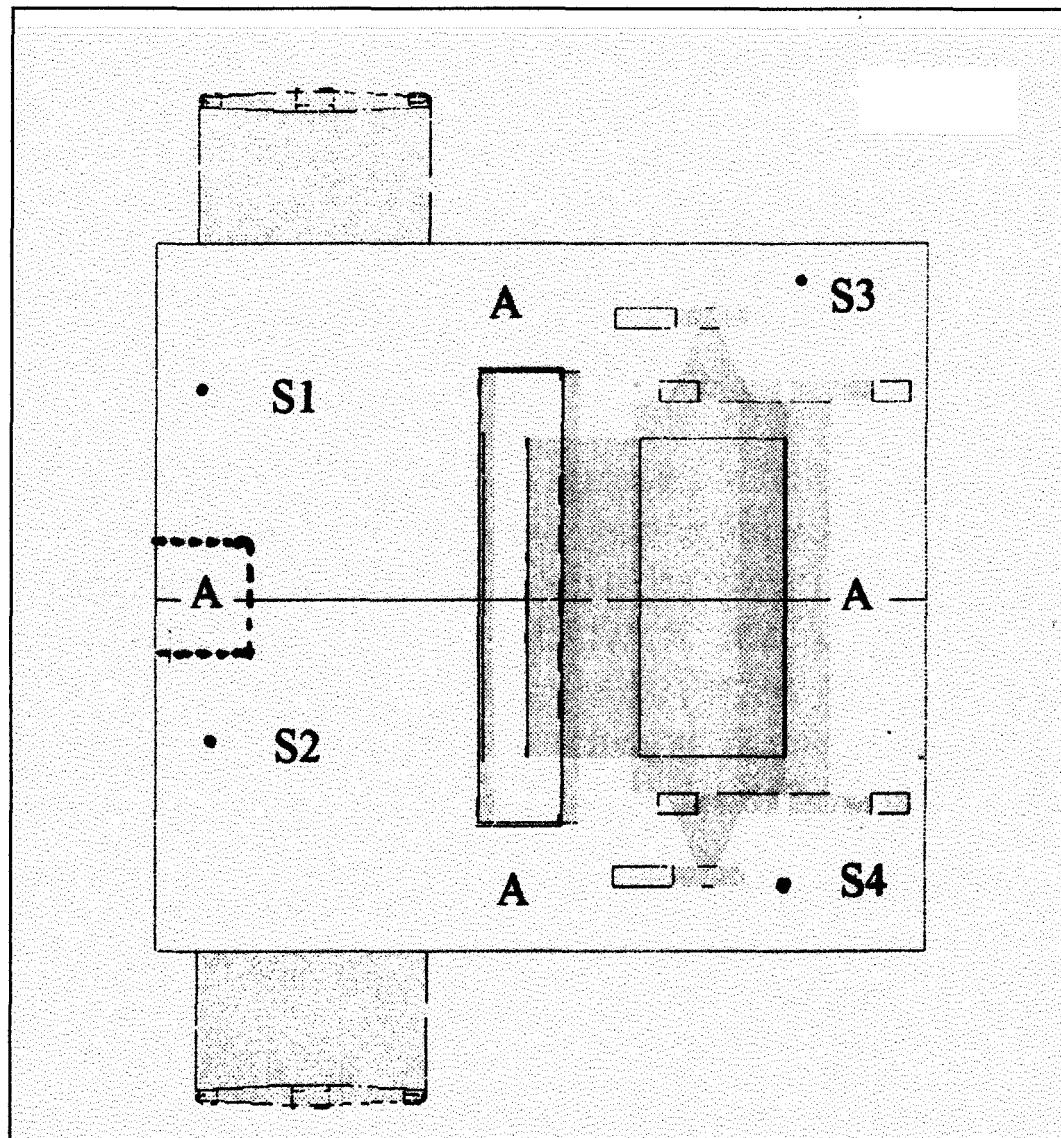


Figure 3.9 Vue de dessus du bain montrant le positionnement des quatre senseurs (S1, S2, S3 et S4) et la position des additions (A)



Figure 3.10 Sonde Yamari installée dans le bain de galvanisation de Burns Harbor

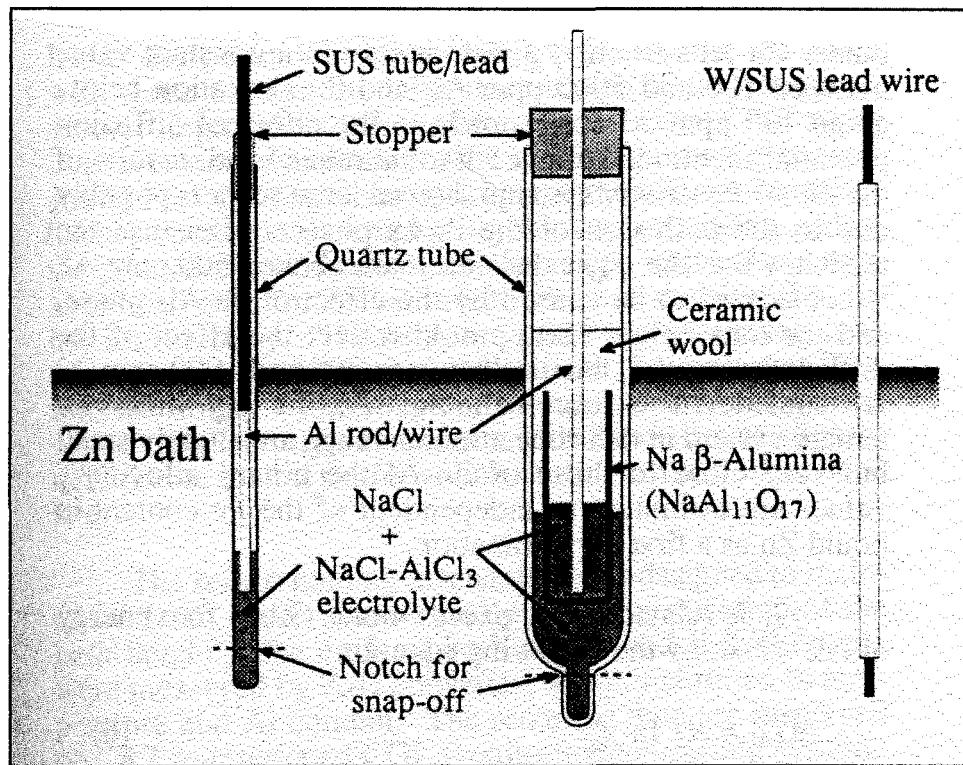


Figure 3.11 Schéma d'une sonde Yamari (Yamaguchi et al, 1995)

CHAPITRE 4

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Ce chapitre est consacré à la présentation et à la discussion des résultats de visualisation de l'écoulement dans le modèle à eau, des mesures de vitesse, des calculs de turbulence, des modifications apportées au modèle numérique et des tests industriels. Les essais effectués sur le modèle à eau et les tests industriels seront comparés avec les résultats calculés à l'aide de la modélisation numérique.

4.1 Modèle à eau

Le modèle à eau a été utilisé, dans un premier temps, pour visualiser l'écoulement à l'aide d'un faisceau laser et d'injection de fluorescéine. Des figures issues des enregistrements de ces visualisations seront présentées et discutées ici. Ensuite, l'effet dû à la présence de couteaux à air sera discuté. Finalement, les mesures de vitesses sur plusieurs droites et les calculs de turbulence seront rapportés dans cette section.

4.1.1 Visualisation de l'écoulement

La visualisation de l'écoulement dans le modèle à eau a été effectuée pour chacun des plans de la figure 3.2 et pour plusieurs configurations du bain. Les figures 4.1 à 4.24 présentent les résultats obtenus pour certaines configurations, représentatives de l'effet de la présence ou de l'absence de rouleaux stabilisateurs, de la présence d'une plaque déflectrice et de la variation de l'angle de la courroie. Tous les essais effectués ne sont pas rapportés afin de diminuer le volume du document. Les figures sont présentées sous forme d'images de plans dans le bain, captées dans le temps, après l'injection du traceur. Ainsi, chacune des photos correspond à un temps connu après l'injection de la fluorescéine. Les temps après l'injection seront toujours indiqués dans le titre de la figure pour alléger le texte.

4.1.1.1 Écoulement avec deux rouleaux, angle de 45° sans plaque

La figure 4.1 (a et b) montre un plan au centre du bain (plan A) pour la configuration du bain avec deux rouleaux stabilisateurs et un angle de 45°. Le traceur injecté sur la courroie se dirige dans un premier temps vers l'avant du bain (à gauche sur les figures) où il se disperse sous l'effet du mouvement du rouleau stabilisateur extérieur et reste quelque temps à cet endroit. Ensuite, il apparaît tranquillement à l'arrière du bain (à droite sur les figures), bien après que la section

avant a été mélangée et semble homogène à l'oeil.

Pour la même configuration de la cuve, la figure 4.2 (a et b) montre un plan du bain qui se situe entre la courroie et les bras des rouleaux (plan E). Encore une fois, le traceur se retrouve dès le début de l'injection à l'avant du bain pour ensuite se déplacer vers l'arrière du bain. Lorsqu'il se retrouve dans la partie centrale du bain (figure 4.2 a), i.e. la région entourée de la courroie mobile, le traceur a tendance à disparaître, d'une part parce qu'il se mélange fortement dans cette section, à cause des mouvements de la courroie et des rouleaux et d'autre part parce qu'il "entre" dans la section centrale (direction normale au plan). Sur la figure 4.2 b, le traceur commence à réapparaître dans le haut du bain, se dirigeant vers l'arrière où il se mélange beaucoup plus lentement qu'à l'avant et au centre du bain. Ceci confirme que l'écoulement à l'arrière est très faible et que cette zone peut être pratiquement décrite comme une zone stagnante.

La figure 4.3 (a et b) montre un détail de l'écoulement à l'arrière du bain dans le plan G qui se trouve à être la section entièrement liquide entre la paroi du bain et les bras des rouleaux. Le mouvement du fluide est très lent par rapport à celui qu'on observe à l'avant du bain. Cependant, on voit sur ces figures que le fluide effectue un mouvement de rotation horaire qui part du haut du bain et retourne vers le bas.

La figure 4.4 (plan E) illustre bien le mouvement du fluide qui entre dans la

section centrale lorsqu'il se trouve près de la courroie. Ici, le traceur contourne la courroie sur le bord. Cette figure montre aussi de quelle façon le traceur se mélange efficacement dans la section avant où il se disperse beaucoup et devient moins visible et moins concentré.

La figure 4.5 (a et b) est un plan horizontal (plan I) filmé de façon isométrique. Le traceur injecté sur la courroie se retrouve toujours à l'avant pour ensuite se diriger vers l'arrière du bain en passant par les deux côtés de la cuve, près de la paroi de plexiglass. Sur la figure 4.5 a, le déplacement semble assez symétrique des deux côtés du bain. Sur la figure 4.5 b, le traceur prend beaucoup de temps avant d'apparaître à l'arrière du bain car lorsqu'il est près de la courroie, il est entraîné par celle-ci vers l'avant du bain en passant sous le rouleau principal (en dehors du plan éclairé par le faisceau laser). La dernière image de cette figure montre clairement de quelle façon le traceur est bien dispersé pour toute la partie du bain où sont positionnés les rouleaux et la courroie, alors qu'à l'arrière, le traceur n'est pas encore mélangé.

La figure 4.6 (a et b) montre le plan 1 vue de l'arrière du bain. Sur cette figure, on voit le traceur apparaître de chaque côté de la paroi avec une prédominance vers le haut du bain. Tranquillement, le traceur qui arrive de chaque côté se rejoint en restant beaucoup plus dans le haut du bain que vers le bas. Il est probable que la zone stagnante se situe en bas à l'arrière.

Le plan suivant (figure 4.7 a et b) est aussi une vue de l'arrière du bain, mais plus près de la courroie (plan 2). Le même genre d'écoulement est observé sur cette figure, bien que le fluide coloré soit plus visible à gauche du bain qu'à droite. De plus, on observe une légère rotation horaire (plus visible par l'enregistrement vidéo que par les photos). Ceci suppose que l'écoulement est peut-être non symétrique.

Cette supposition a été confirmée par la visualisation du plan 3 se situant juste sous la cloche (figure 4.8 a et b). Le traceur apparaît simultanément en haut à gauche et en bas à droite. Ensuite, les deux sections de traceurs se rejoignent en un mouvement de rotation dans le sens horaire. Cette rotation peut être causée par un grand nombre de facteurs. Par exemple, on peut mentionner le glissement de la courroie de gauche à droite sur les rouleaux, parfois difficile à contrôler, par un désalignement des rouleaux ou par le positionnement de la cuve. Ceci sera discuté plus en profondeur dans une section ultérieure.

La visualisation du plan 4 est présentée à la figure 4.9 (a et b), mais avec une vue sur le côté gauche de la cloche seulement. Le traceur qui apparaît en haut du bain et à gauche à l'extérieur de la cloche a tendance à entrer dans celle-ci sur son côté. Le fluide qui entre dans la cloche disparaît de ce plan, soit pour rester pris dans le conduit, soit pour être entraîné par la feuille vers la zone centrale entre la courroie.

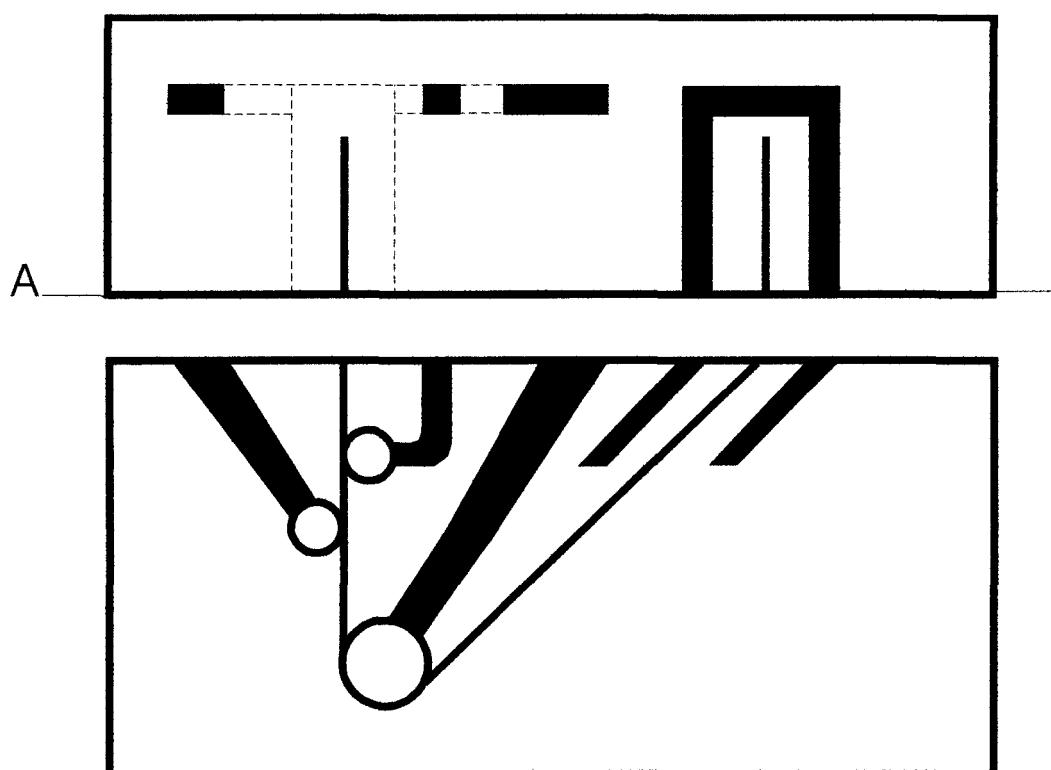
L'écoulement dans la section centrale est difficile à analyser à cause de la turbulence élevée dans cette section. De plus, les bras des rouleaux nuisent à l'observation et il a aussi été difficile d'ajuster le rayon du laser pour qu'il soit suffisamment intense pour assurer une bonne visibilité. L'injection à l'extérieur de la courroie a aussi été problématique car le traceur était trop dispersé et peu visible lorsqu'il arrivait dans la zone centrale. L'injection a alors été effectuée sur la courroie, à l'extérieur du bain, mais au centre de celle-ci, du côté de son entrée dans le bain. Ceci a permis une meilleure visibilité. Néanmoins, les figures 4.10 (a et b) et 4.11 (a et b) permettent de détailler quelque peu cet écoulement.

La figure 4.10 est une vue de l'ensemble de la section centrale dans le plan A. Le traceur entre dans le bain avec la courroie pour être ensuite projeté vers le haut (Figure 4.10 a). Le traceur est alors acheminé vers la gauche et plus vers le haut. La figure 4.11 illustre le détail de l'écoulement rencontré à droite dans le centre du bain. La vue montre le rouleau stabilisateur de l'intérieur en haut à gauche de la figure. Le traceur injecté est d'abord enrobé par le rouleau pour être ensuite projeté vers le bas où il est entraîné vers la droite dans le sens de rotation du rouleau principal (en bas, en dehors de cadre de l'image).

La figure 4.12 (a et b) montre le plan G situé entre les bras des rouleaux et la paroi liquide du bain. Comme vu à la figure 4.5, l'écoulement dans ce plan part de l'avant pour se diriger vers l'arrière du bain. À partir de la troisième image, le traceur

commence à se retirer dans la direction normale au plan pour amorcer son mouvement de rotation horaire tel que vu à la figure 4.8. Cependant, la plus grande partie du traceur est visible et se dirige vers l'arrière où il amorce une autre rotation horaire, cette fois dans le plan de la figure.

Bien que tous les plans indiqués à la figure 3.2 aient été enregistrés sur cassette vidéo, certains de ceux-ci ne sont pas présentés dans cette section. En effet, certains de ces plans étaient difficiles à analyser car le mélange était trop rapide (par exemple les plans 6 et 7). D'autres plans seront présentés pour les autres configurations du bain car l'écoulement de ces sections est peu affecté par les modifications apportées au bain. De la même façon, certains plans ne présentent pas de différences majeures avec les figures déjà présentées (par exemple les plans B, C et D où la seule différence notable est le temps d'apparition du traceur à l'arrière du bain).

POSITION DU PLAN A**DE LA FIGURE 4.1**

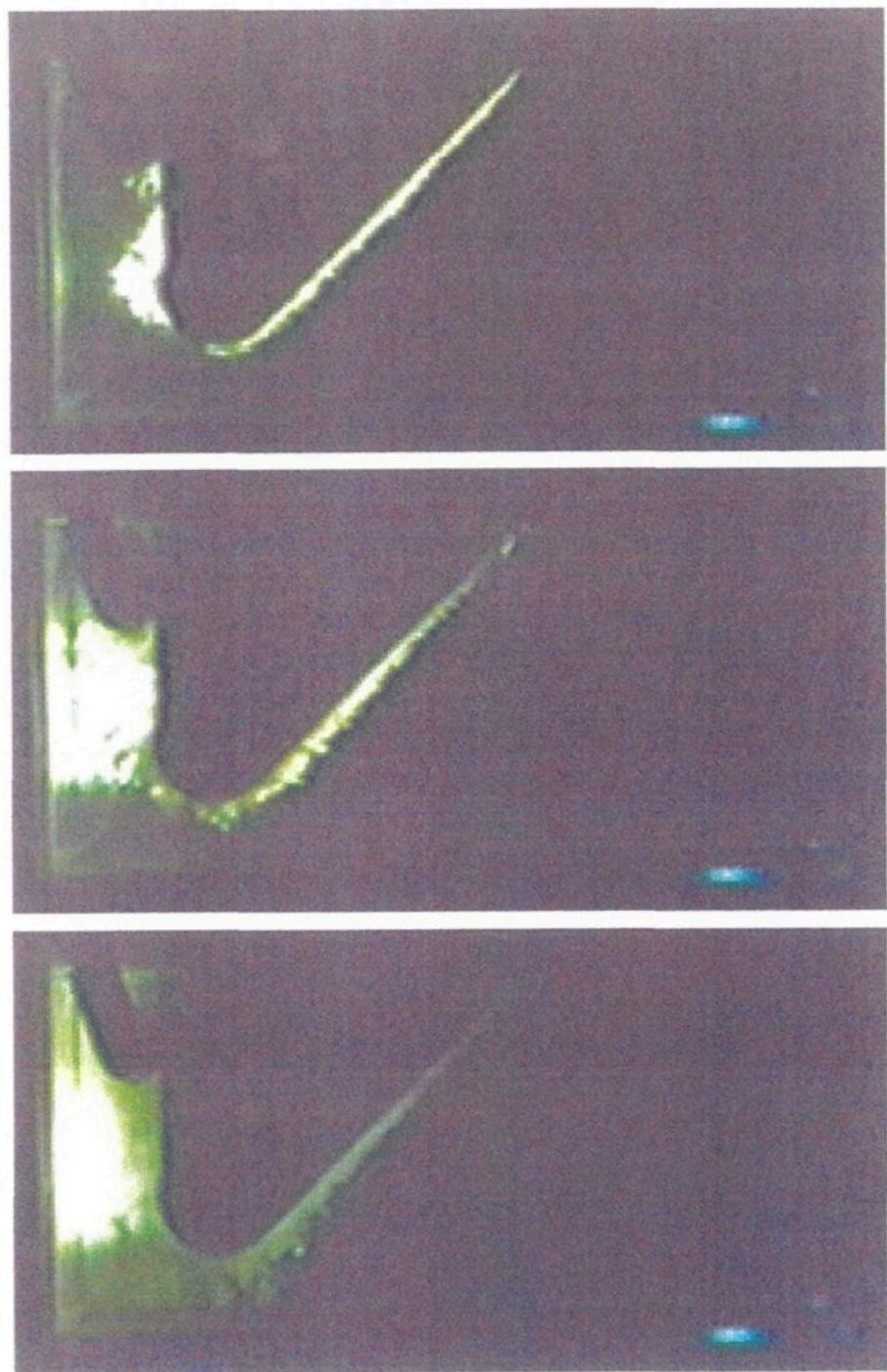
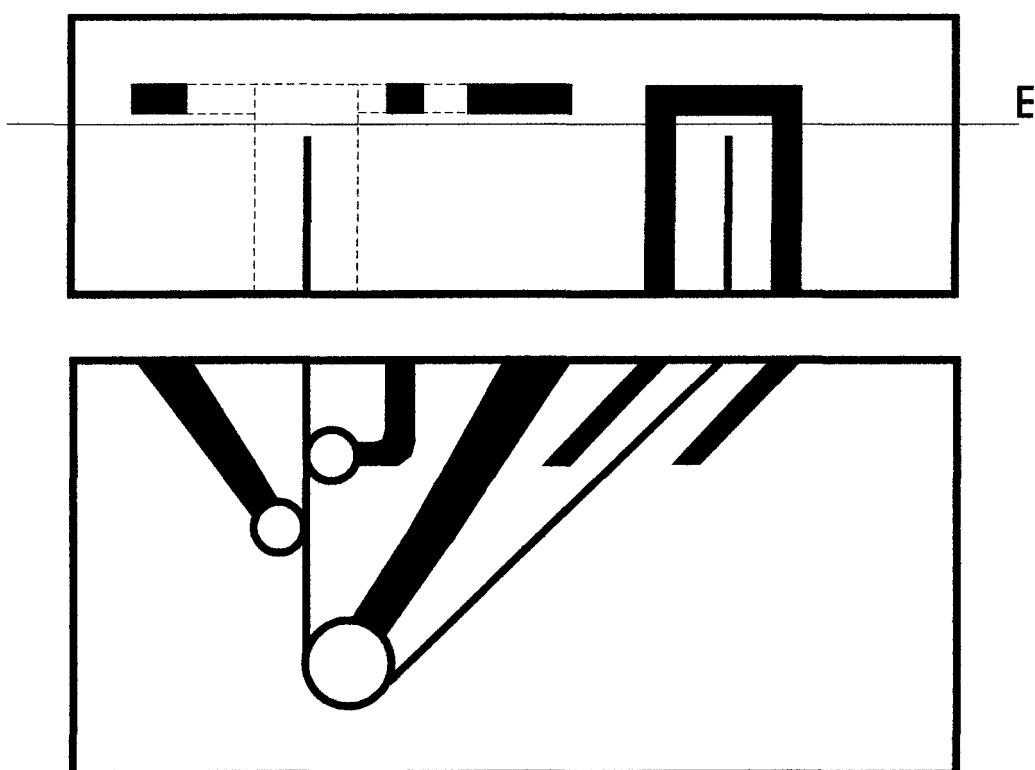


Figure 4.1 a) Visualisation au centre du bain (plan A) avec 2 rouleaux, sans plaque et un angle de courroie de 45° pour des temps de 1, 2 et 4 secondes après l'injection



Figure 4.1 b) Visualisation au centre du bain (plan A) avec 2 rouleaux, sans plaque et un angle de courroie de 45° pour des temps de 7, 24 et 29 secondes après l'injection

**POSITION DU PLAN E
DE LA FIGURE 4.2**



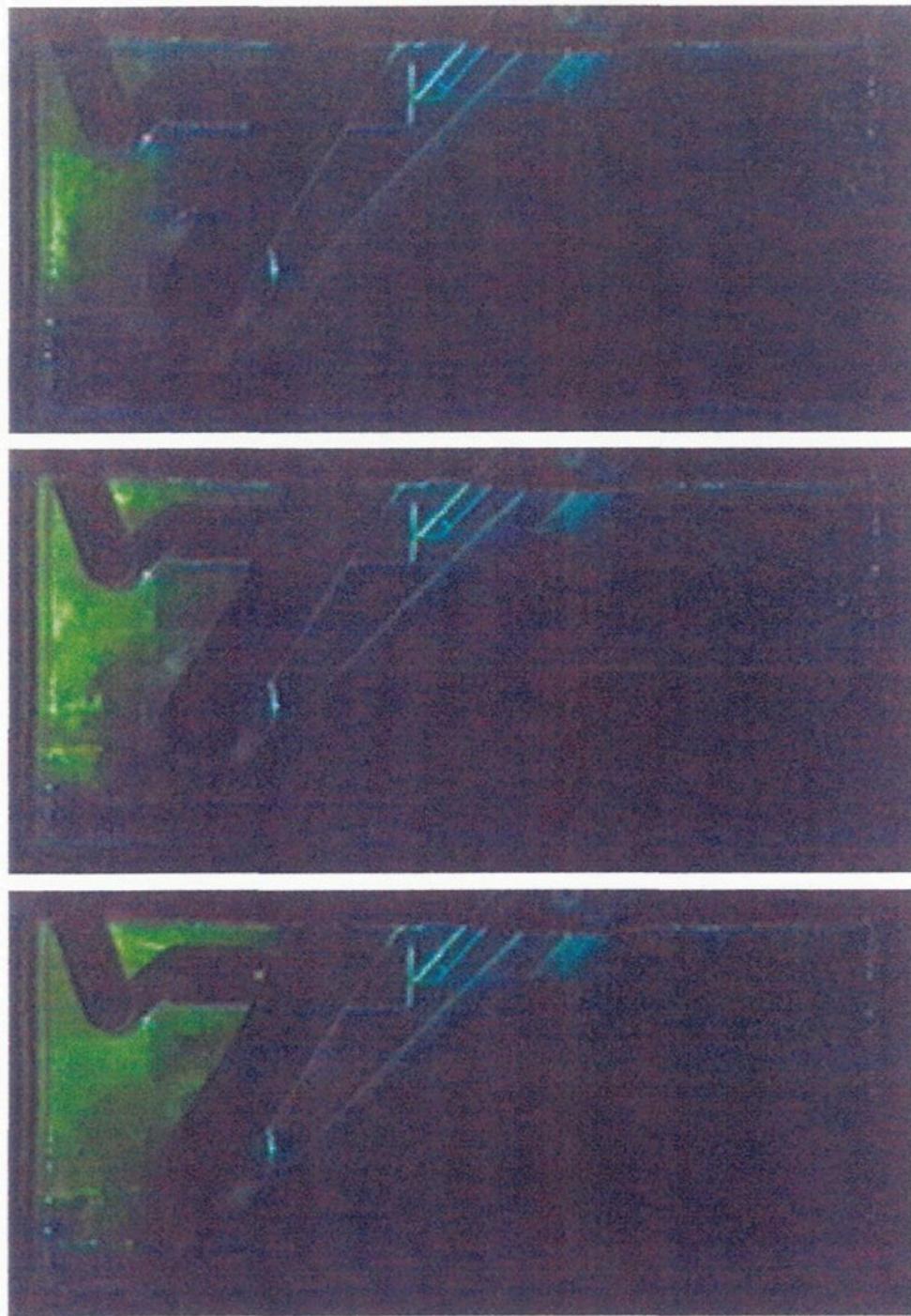


Figure 4.2 a) Visualisation entre la courroie et les bras (plan E) avec 2 rouleaux, sans plaque et un angle de 45° pour des temps de 3, 5 et 7 secondes après l'injection

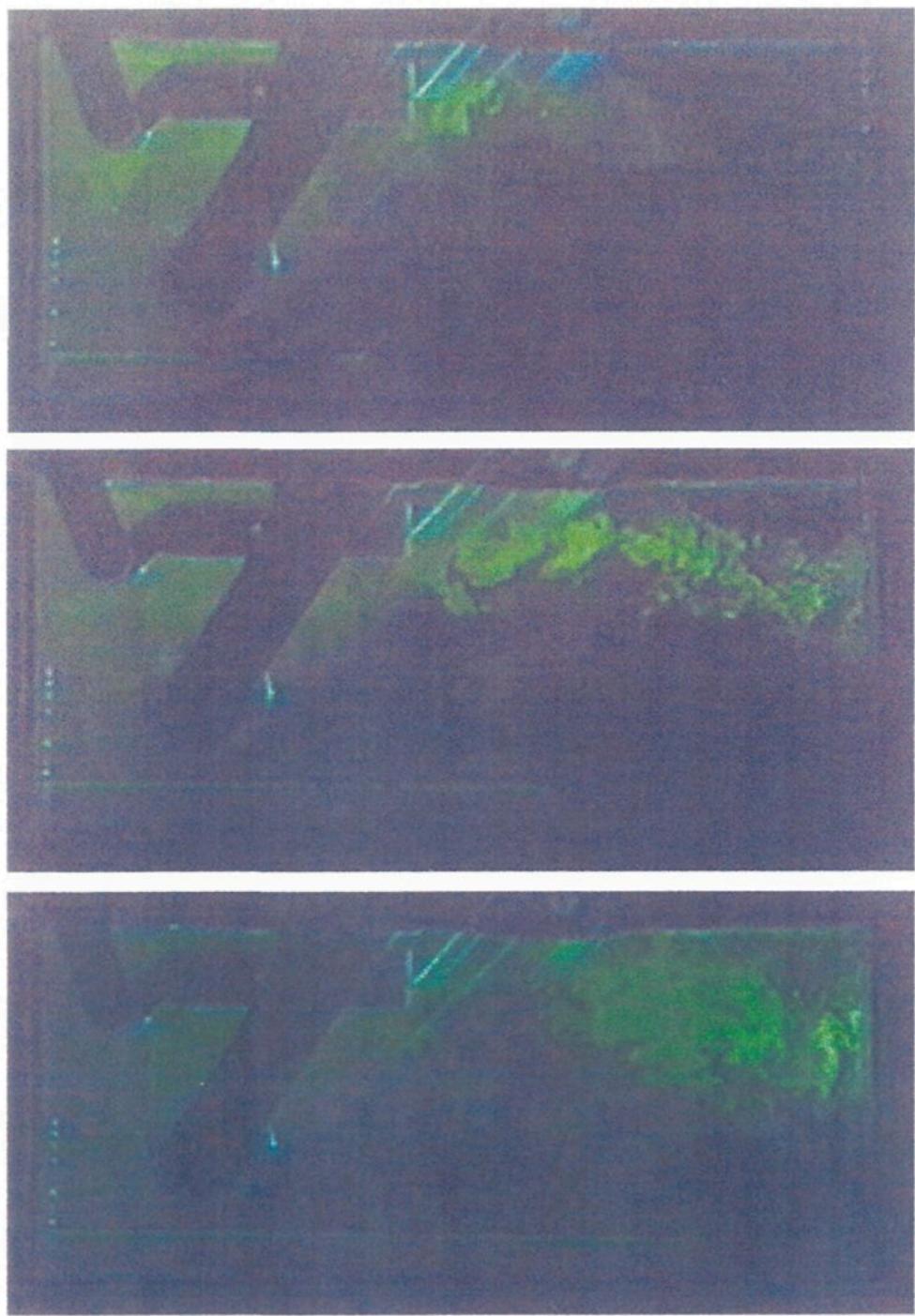
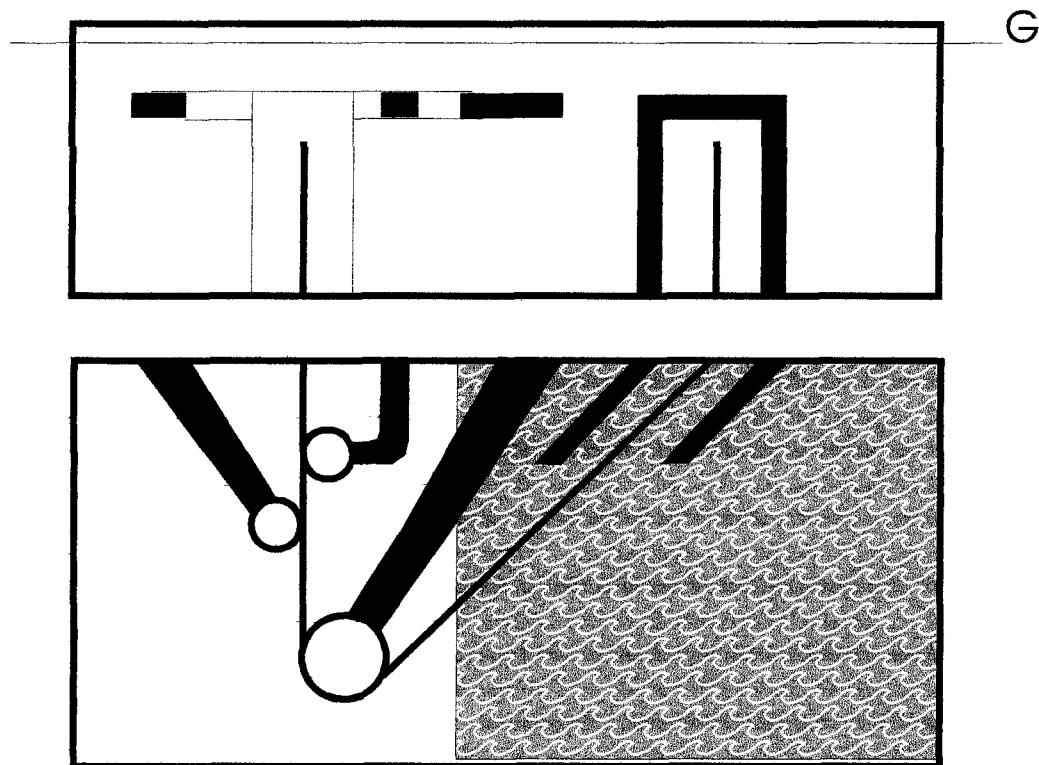


Figure 4.2 b) Visualisation entre la courroie et les bras (plan E) avec 2 rouleaux, sans plaque et un angle de 45° pour des temps de 11, 15 et 21 secondes après l'injection

POSITION DU PLAN G**DE LA FIGURE 4.3**

La zone hachurée correspond à la zone visualisée



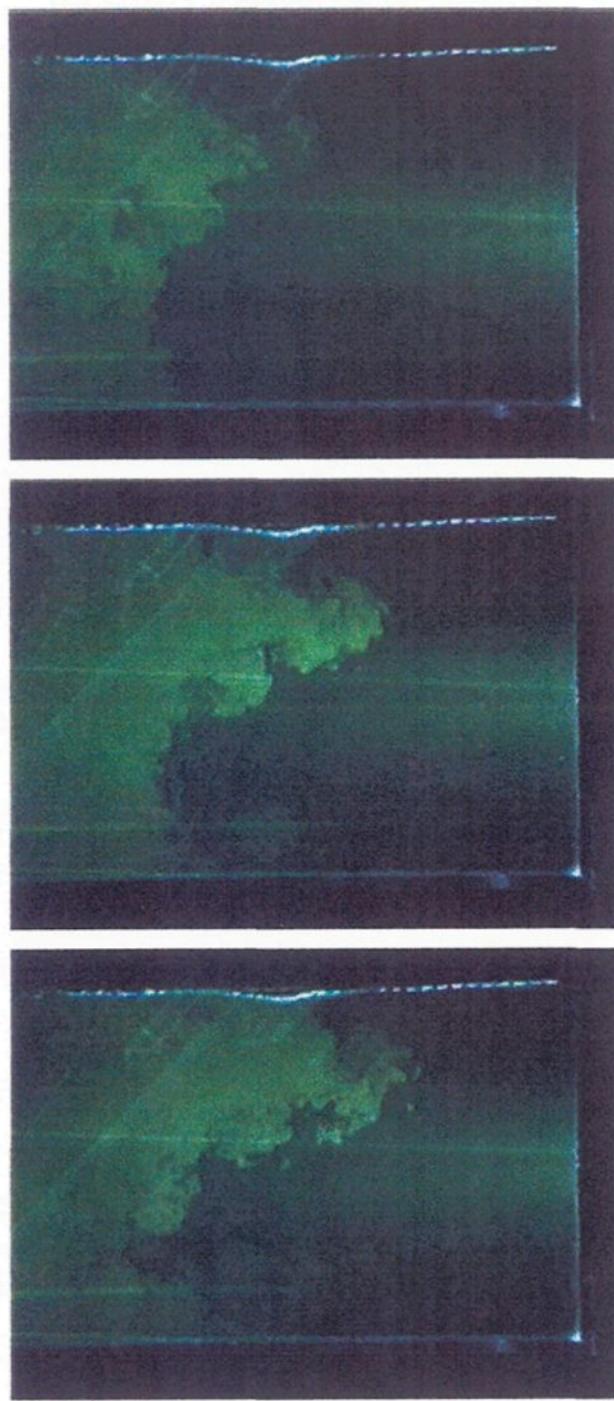


Figure 4.3 a) Visualisation près des parois, à l'arrière (plan G) avec 2 rouleaux, sans plaque et un angle de 45° pour des temps de 5, 11 et 14 secondes après l'injection

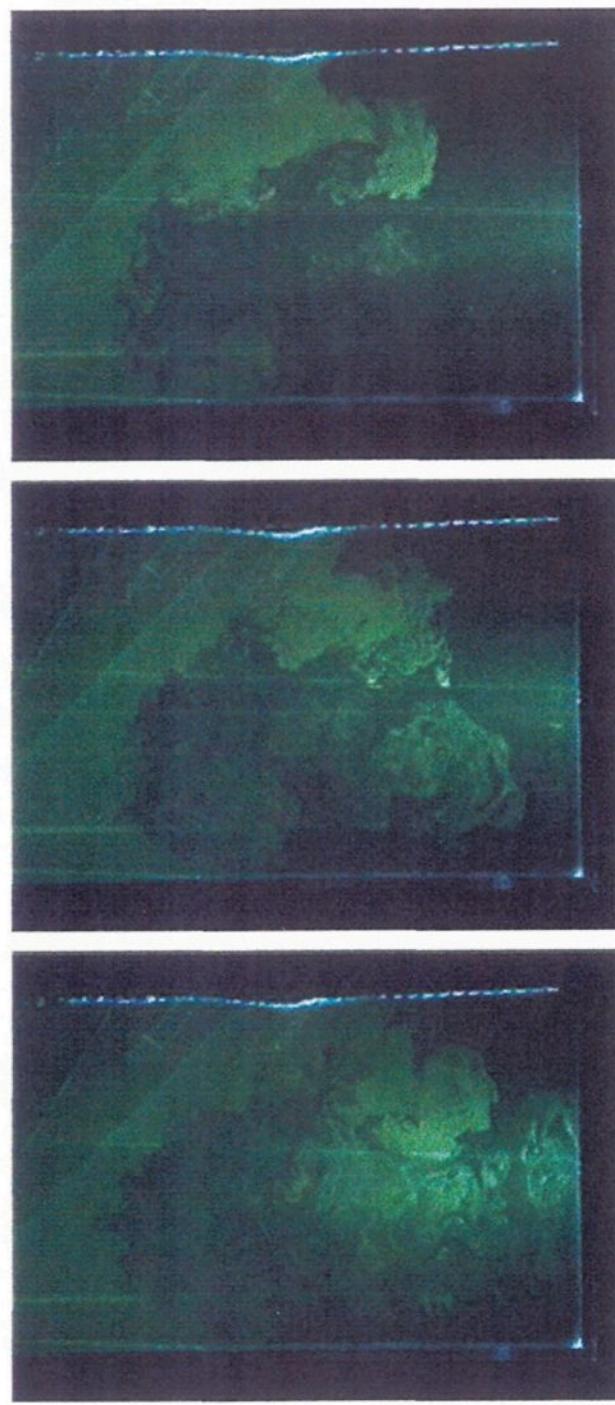
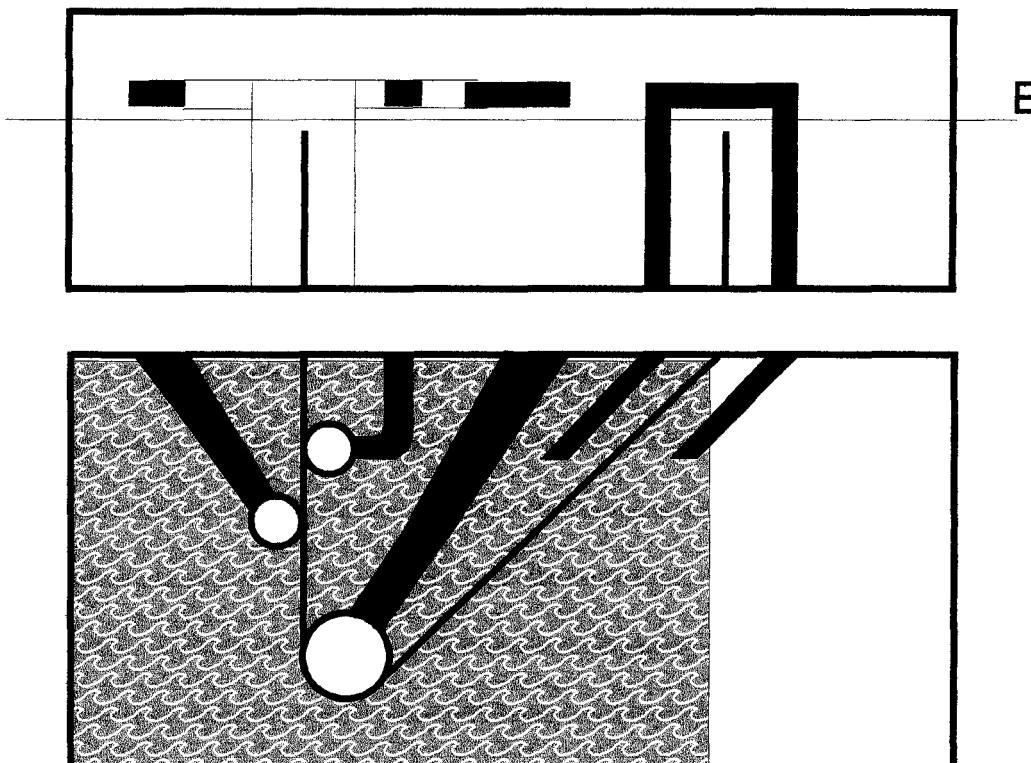


Figure 4.3 b) Visualisation près des parois, à l'arrière (plan G) avec 2 rouleaux, sans plaque et un angle de 45° pour des temps de 17, 20 et 24 secondes après l'injection

POSITION DU PLAN E**DE LA FIGURE 4.4**

La zone hachurée correspond à la zone visualisée



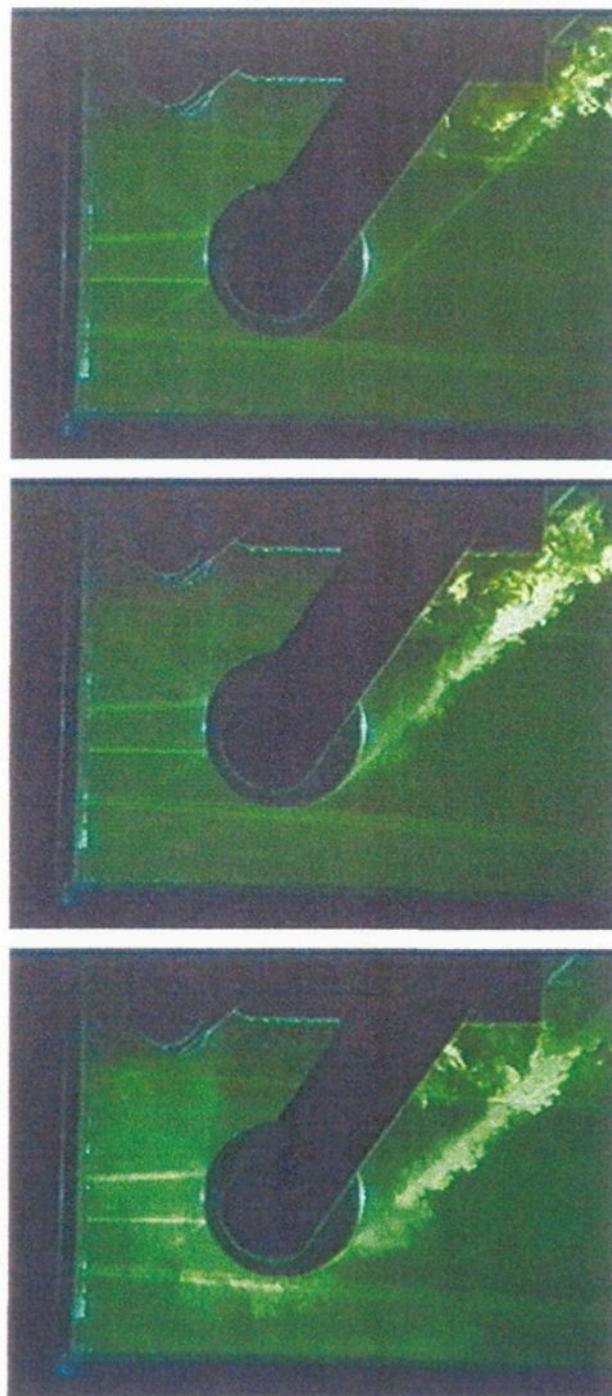
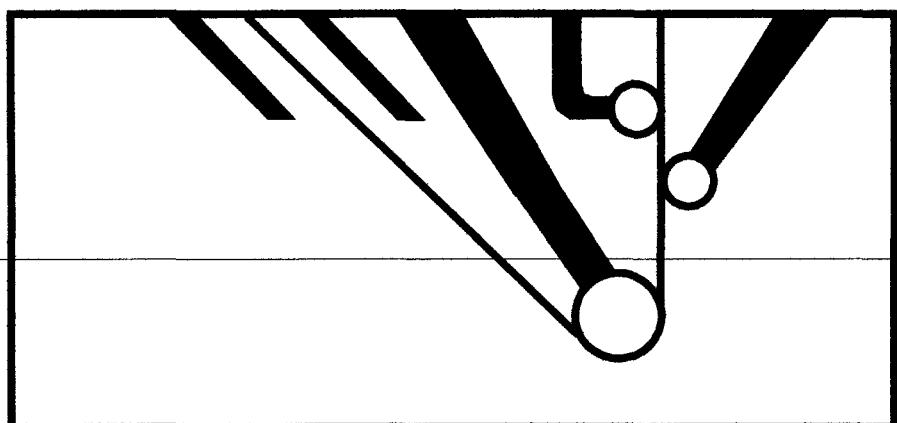
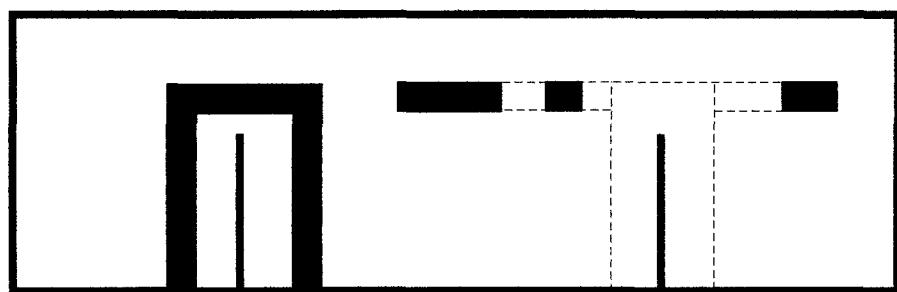


Figure 4.4 Visualisation entre la courroie et les bras, à l'avant (plan E) avec 2 rouleaux, sans plaque et un angle de 45° pour des temps de 3, 4 et 7 secondes après l'injection

POSITION DU PLAN I**DE LA FIGURE 4.5**

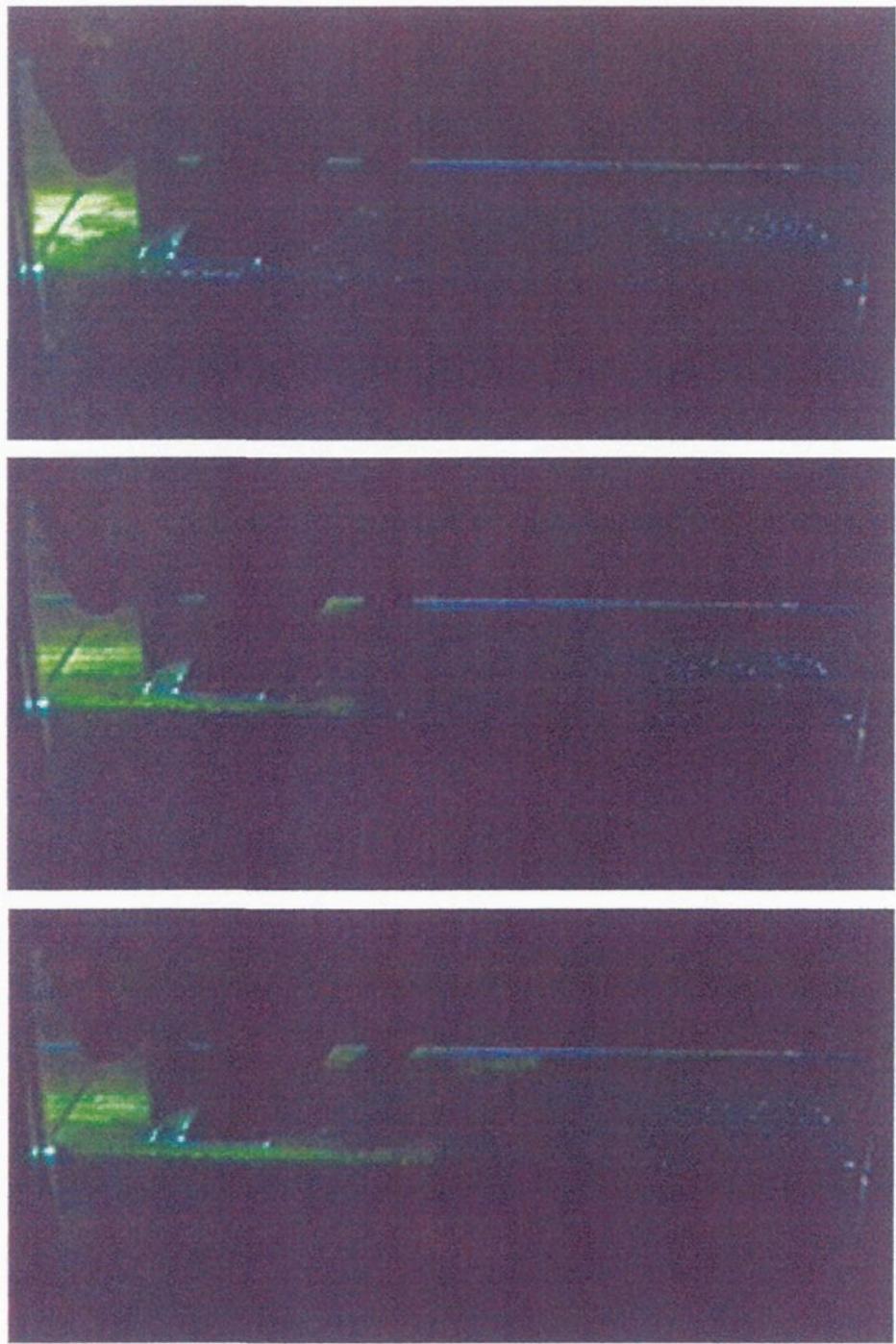


Figure 4.5 a) Visualisation d'un plan horizontal (plan I) avec 2 rouleaux, sans plaque et un angle de 45° pour des temps de 4, 6 et 12 secondes après l'injection

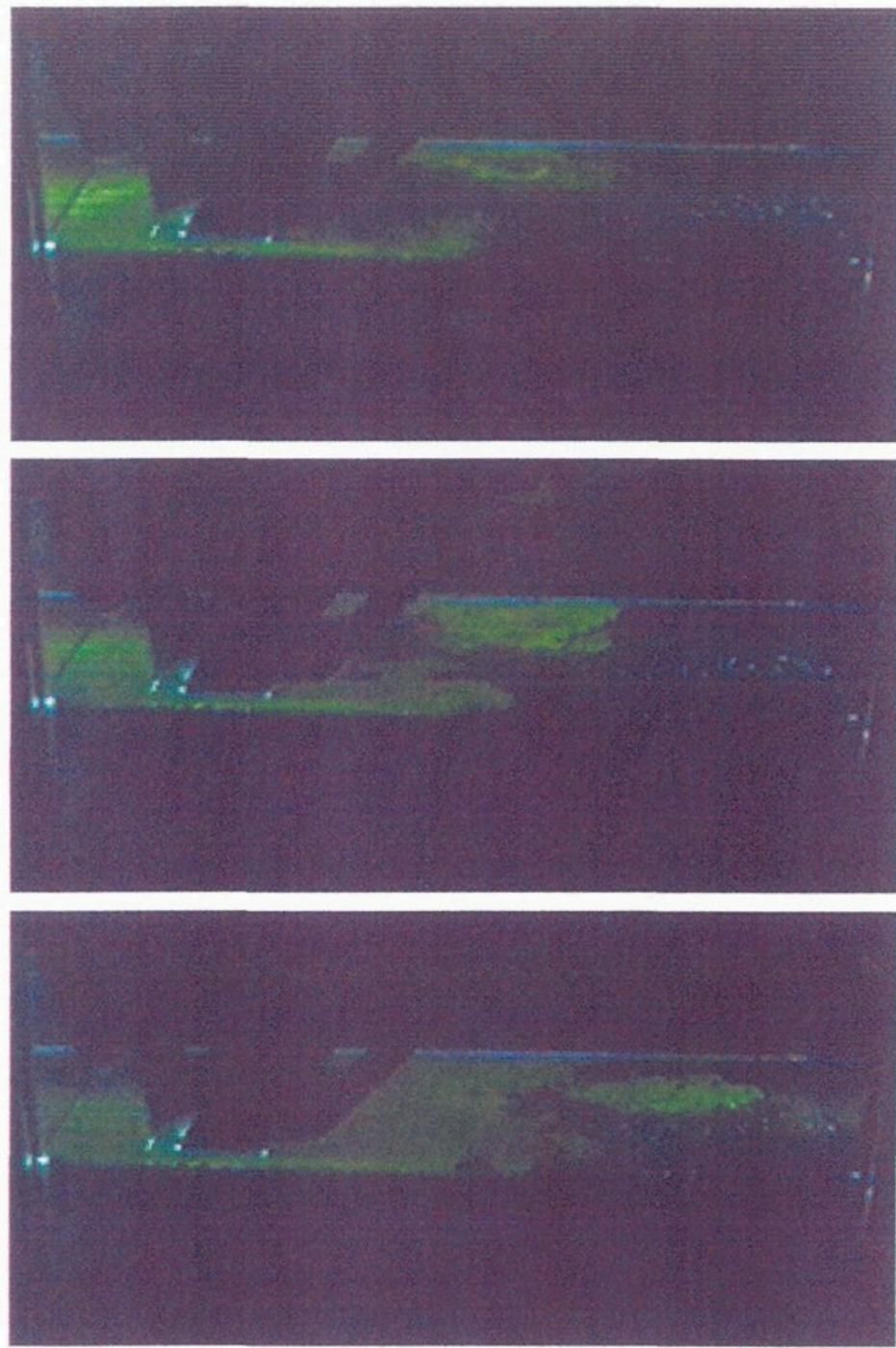
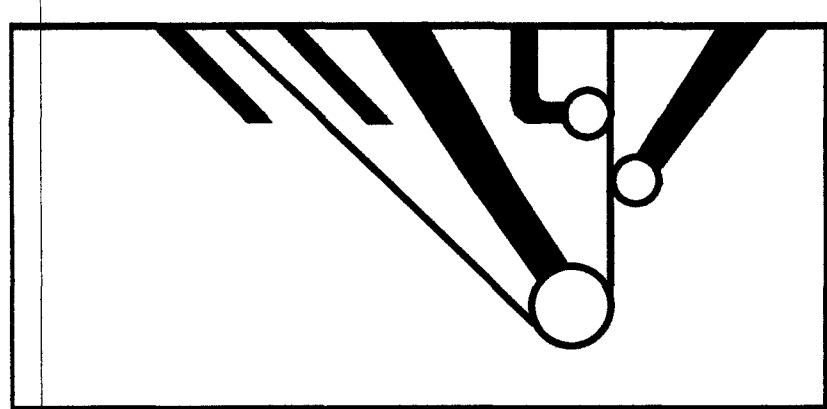
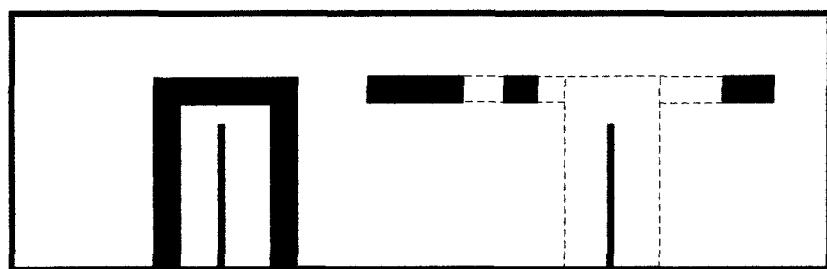


Figure 4.5 b) Visualisation d'un plan horizontal (plan I) avec 2 rouleaux, sans plaque et un angle de 45° pour des temps de 16, 24 et 30 secondes après l'injection

POSITION DU PLAN 1**DE LA FIGURE 4.6**

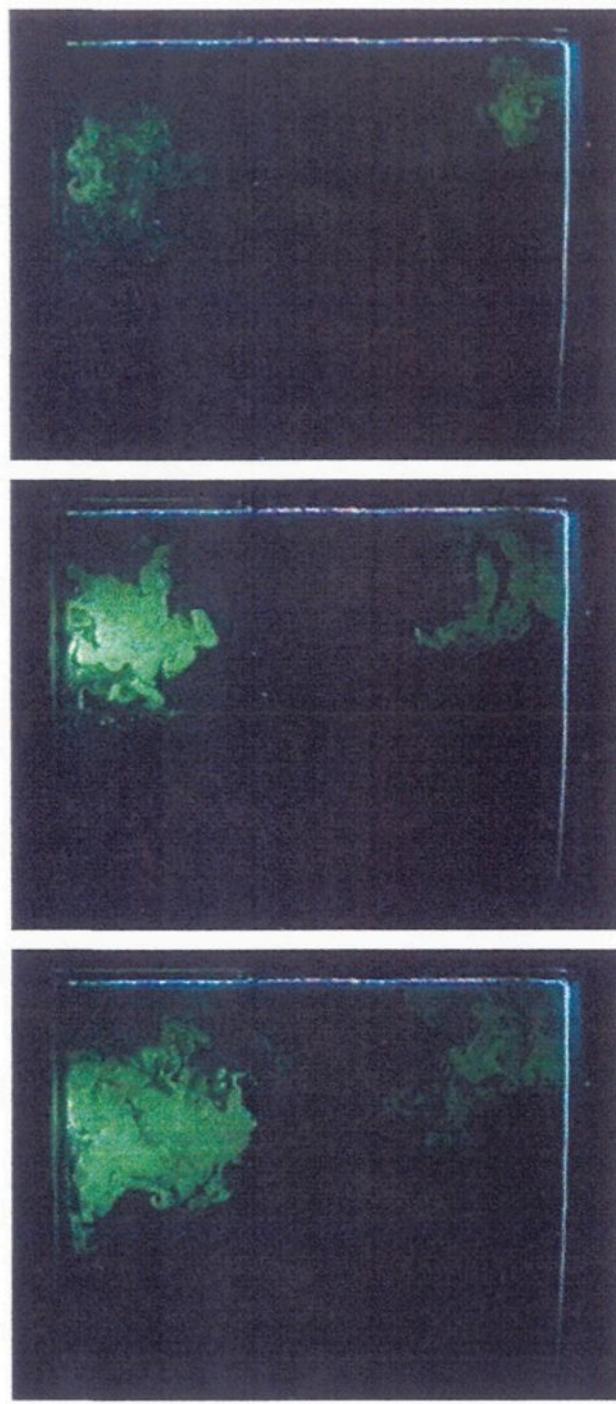


Figure 4.6 a) Visualisation d'un plan vu de l'arrière (plan 1) avec 2 rouleaux, sans plaque et un angle de 45° pour des temps de 24, 26 et 28 secondes après l'injection

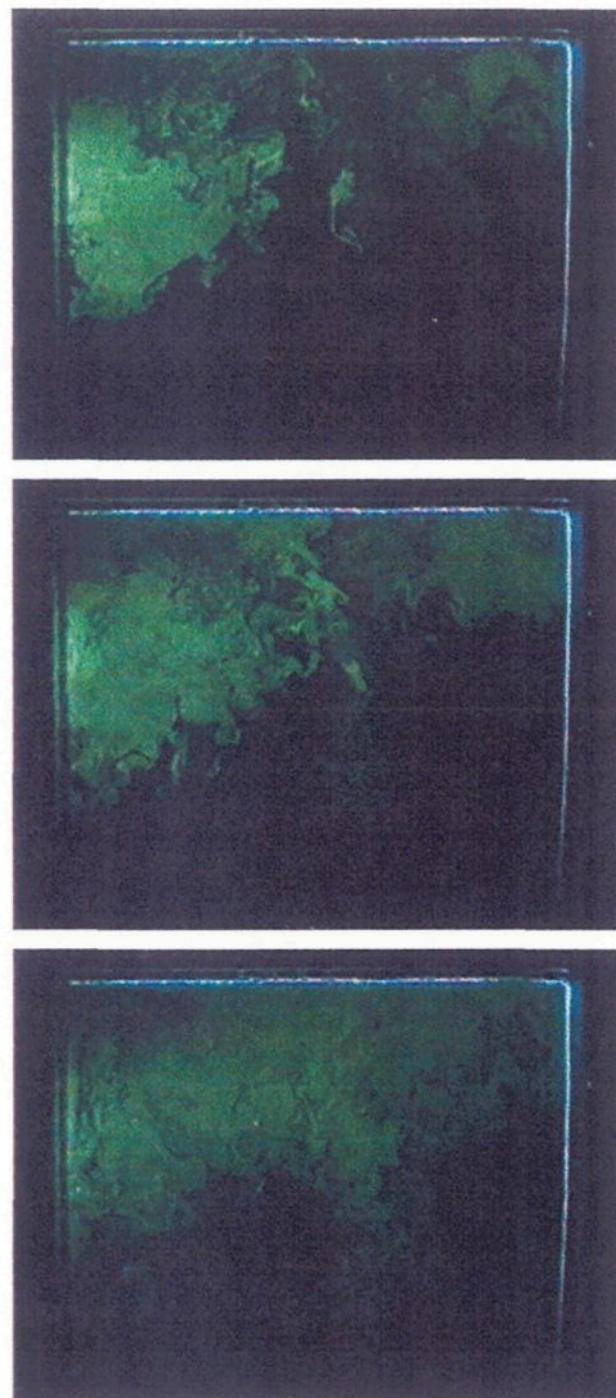
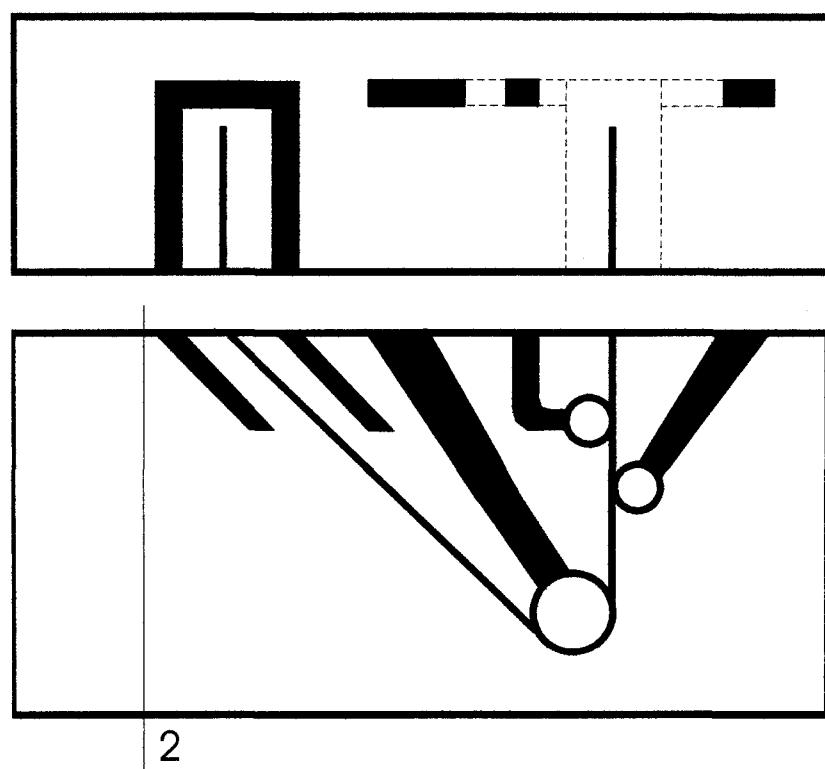


Figure 4.6 b) Visualisation d'un plan vu de l'arrière (plan 1) avec 2 rouleaux, sans plaque et un angle de 45° pour des temps de 30, 32 et 38 secondes après l'injection

POSITION DU PLAN 2**DE LA FIGURE 4.7**

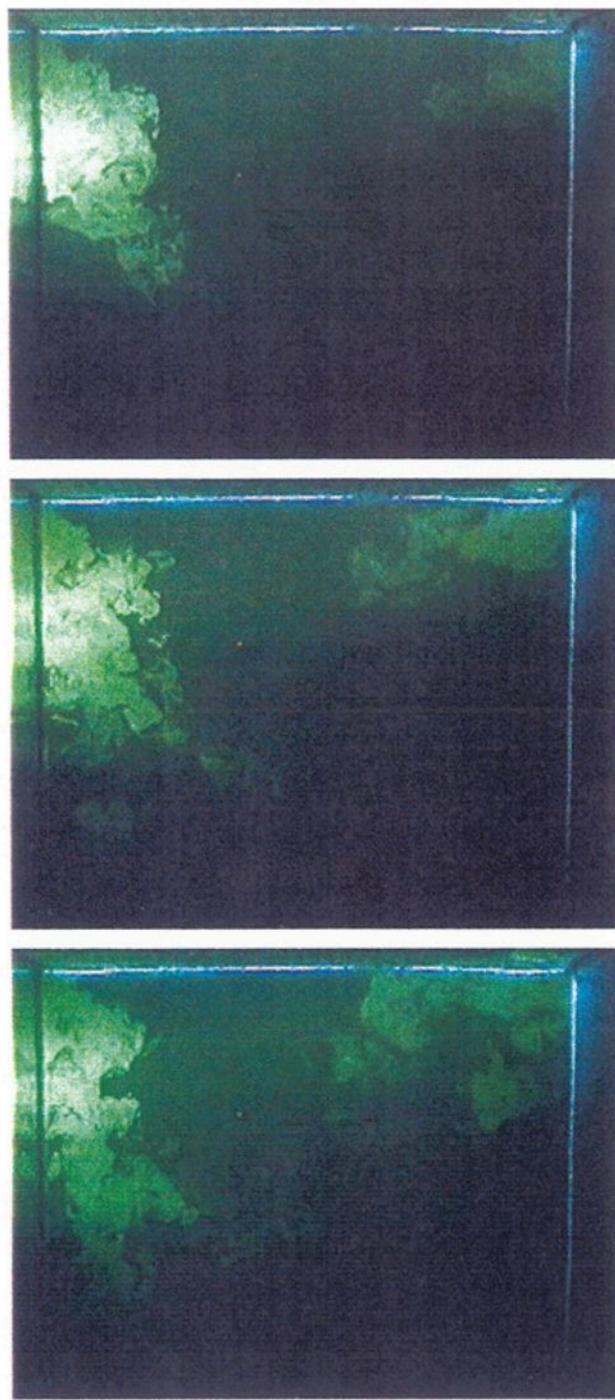


Figure 4.7 a) Visualisation d'un plan vu de l'arrière (plan 2) avec 2 rouleaux, sans plaque et un angle de 45° pour des temps de 15, 19 et 21 secondes après l'injection

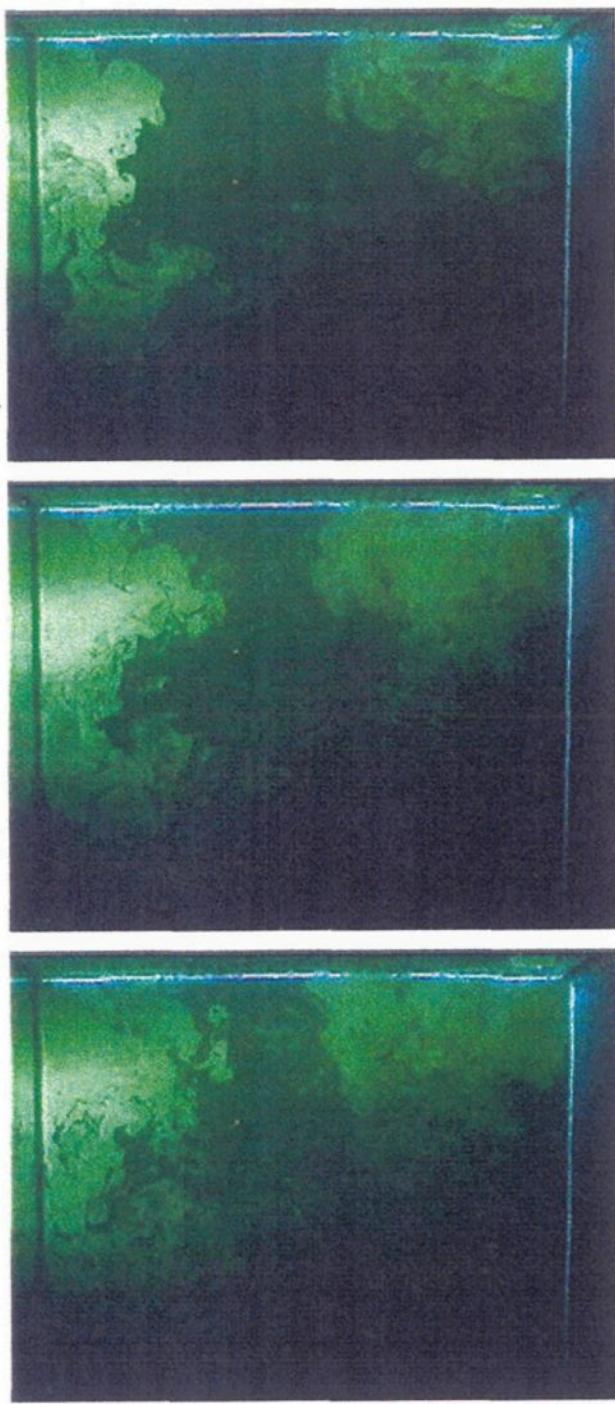
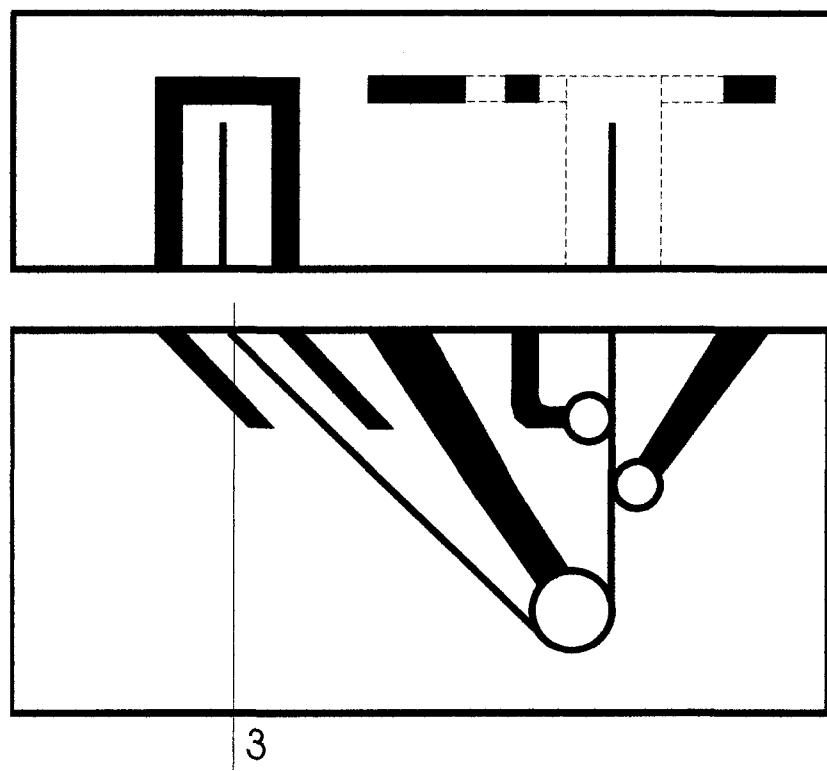


Figure 4.7 b) Visualisation d'un plan vu de l'arrière (plan 2) avec 2 rouleaux, sans plaque et un angle de 45° pour des temps de 23, 25 et 27 secondes après l'injection

POSITION DU PLAN 3**DE LA FIGURE 4.8**

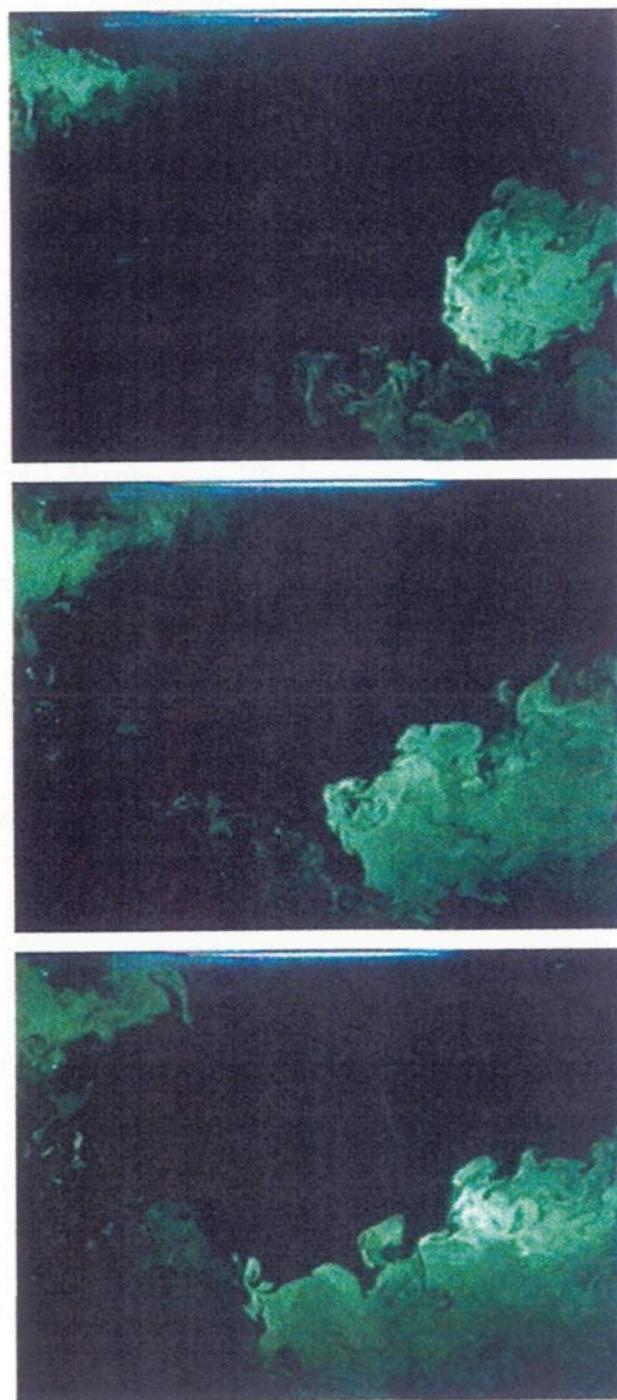


Figure 4.8 a) Visualisation d'un plan vu de l'arrière (plan 3) avec 2 rouleaux, sans plaque et un angle de 45° pour des temps de 13, 15 et 17 secondes après l'injection

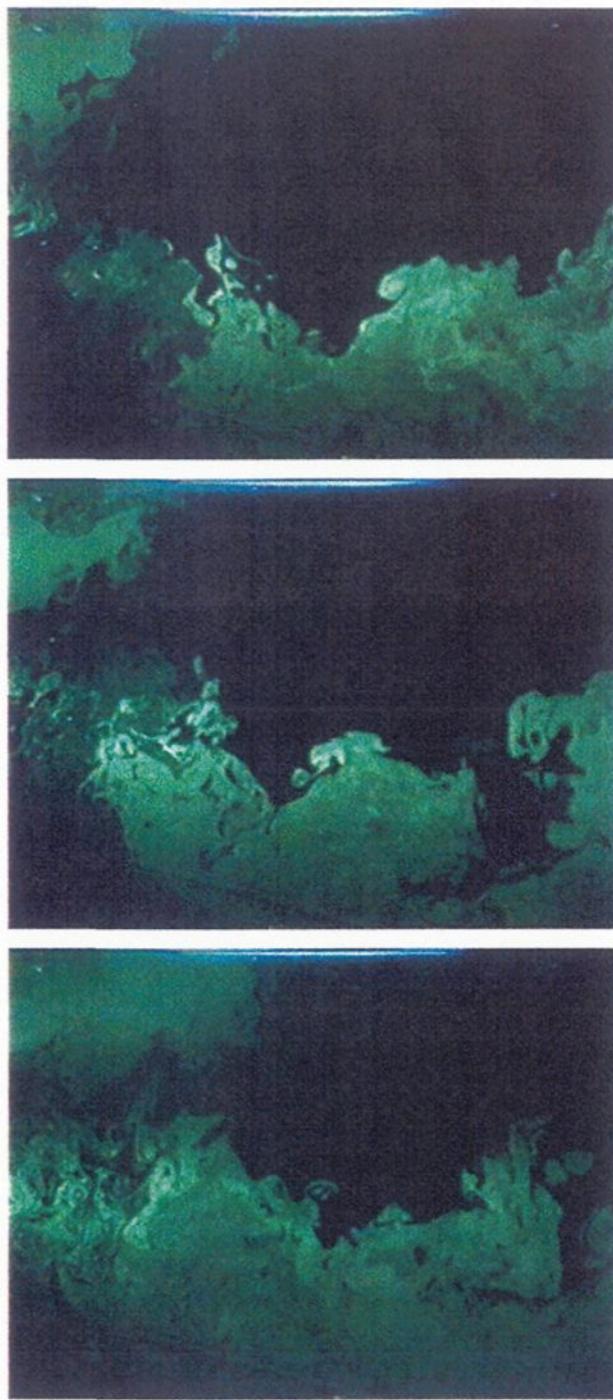
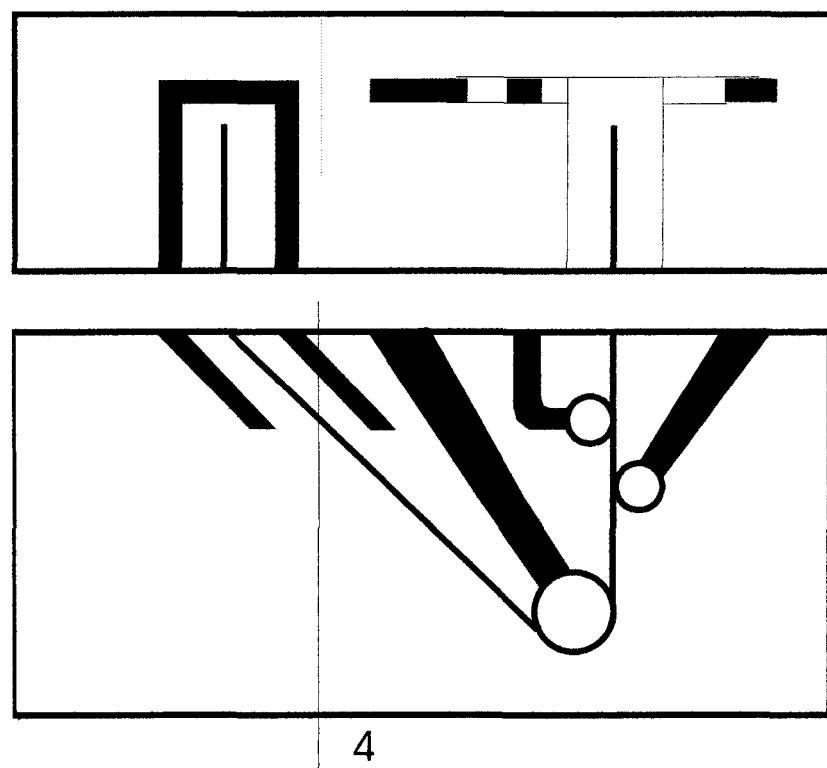


Figure 4.8 b) Visualisation d'un plan vu de l'arrière (plan 3) avec 2 rouleaux, sans plaque et un angle de 45° pour des temps de 19, 21 et 27 secondes après l'injection

POSITION DU PLAN 4**DE LA FIGURE 4.9**

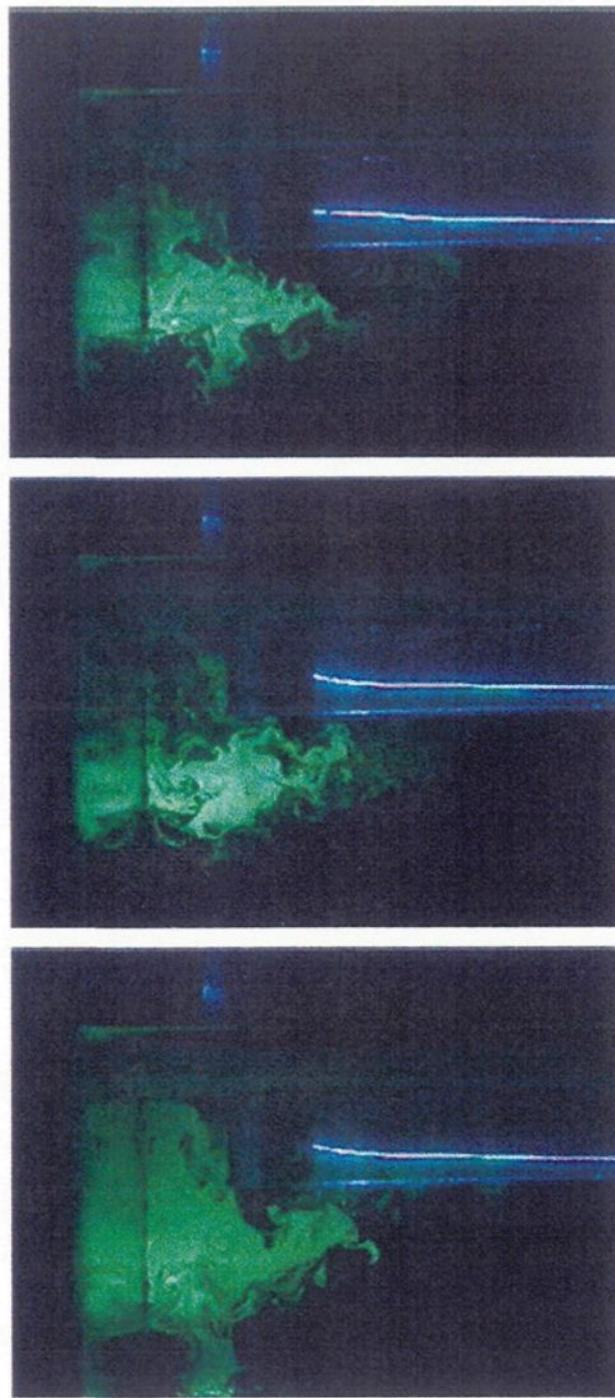


Figure 4.9 a) Visualisation d'un plan sur le côté de la cloche (plan 4) avec 2 rouleaux, sans plaque et un angle de 45° pour des temps de 12, 13 et 15 secondes après l'injection

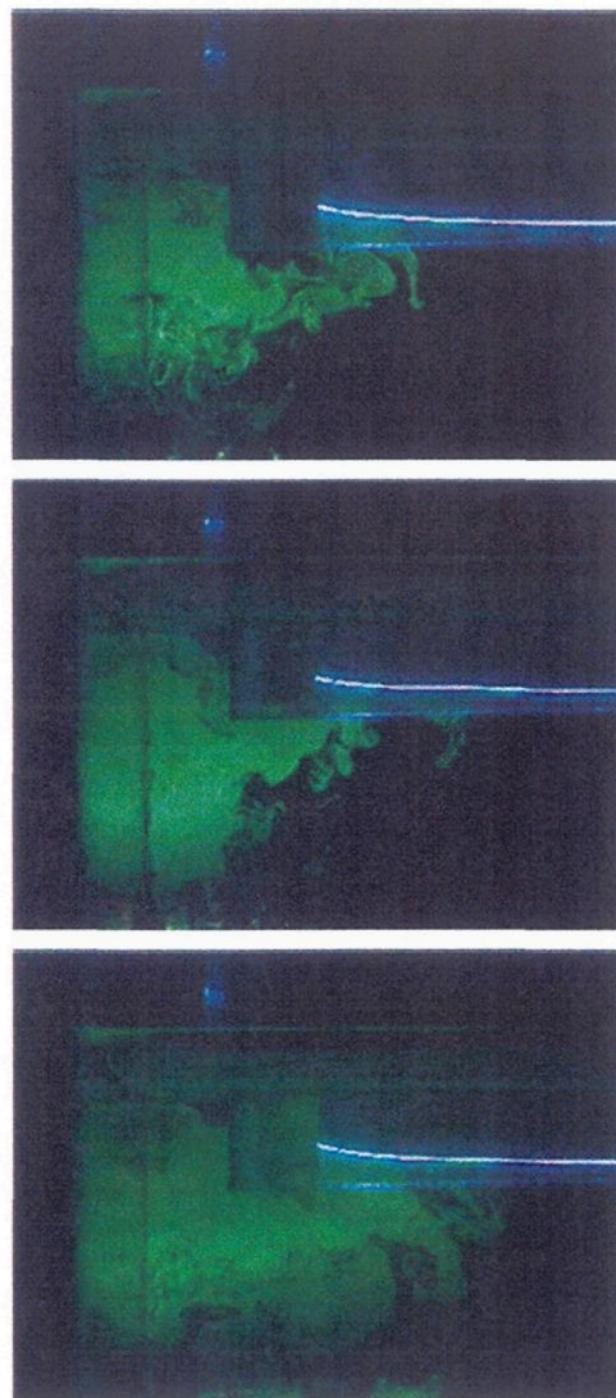
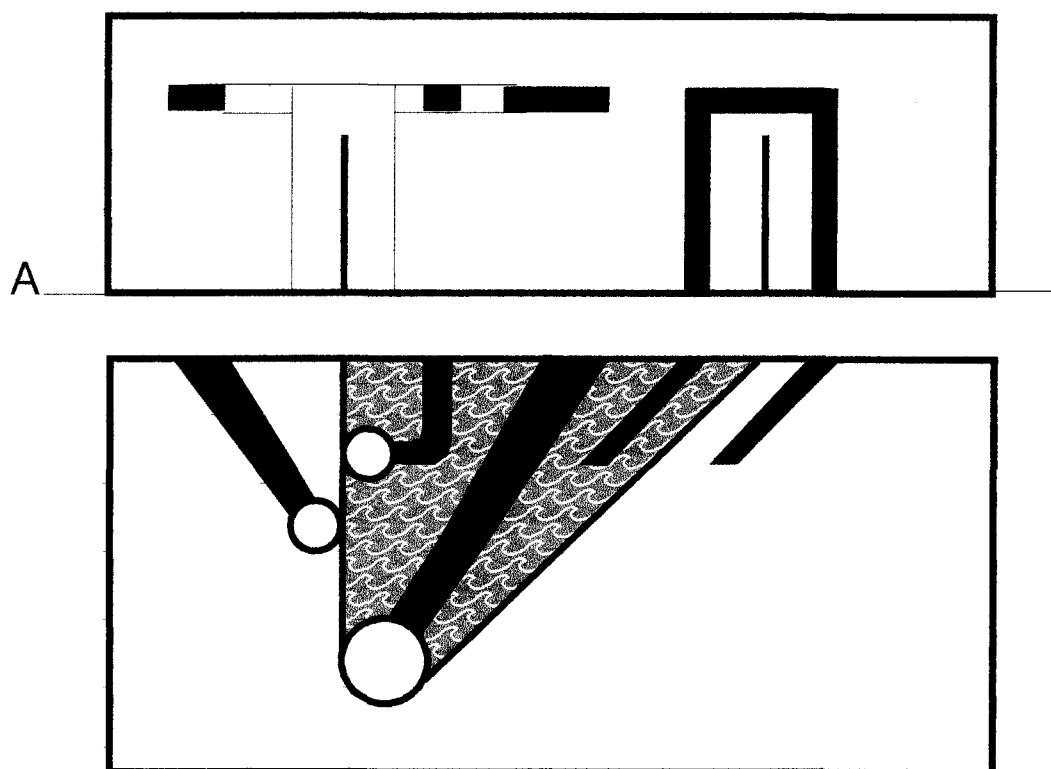


Figure 4.9 b) Visualisation d'un plan sur le côté de la cloche (plan 4) avec 2 rouleaux, sans plaque et un angle de 45° pour des temps de 16, 17 et 23 secondes après l'injection

POSITION DU PLAN A**DE LA FIGURE 4.10**

La zone hachurée correspond à la zone visualisée



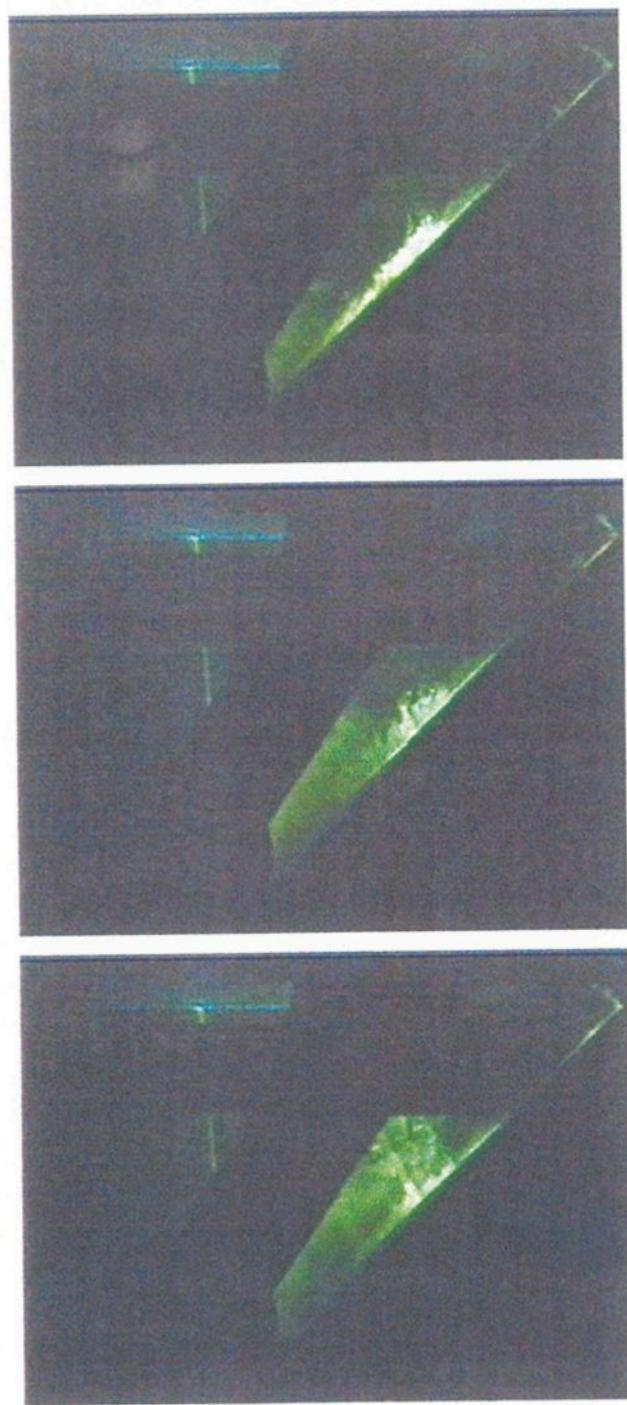


Figure 4.10 a) Visualisation au milieu du bain (plan A) avec 2 rouleaux, sans plaque et un angle de 45° pour des temps de 3, 3.5 et 4.5 secondes après l'injection

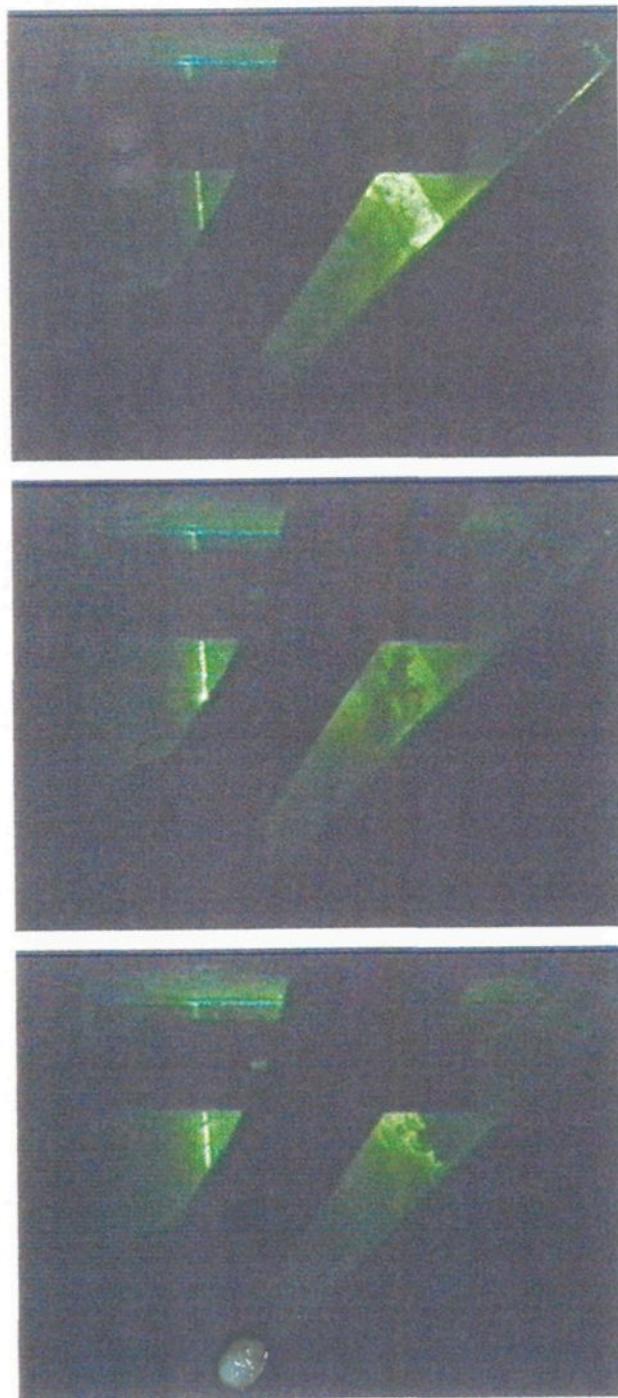
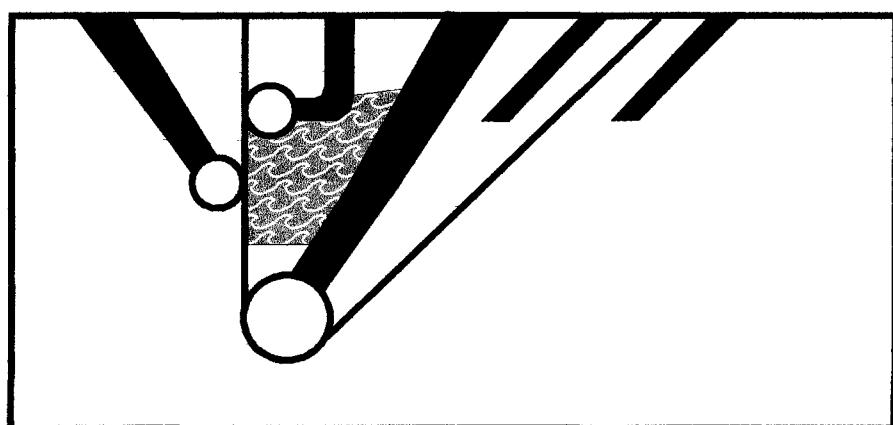
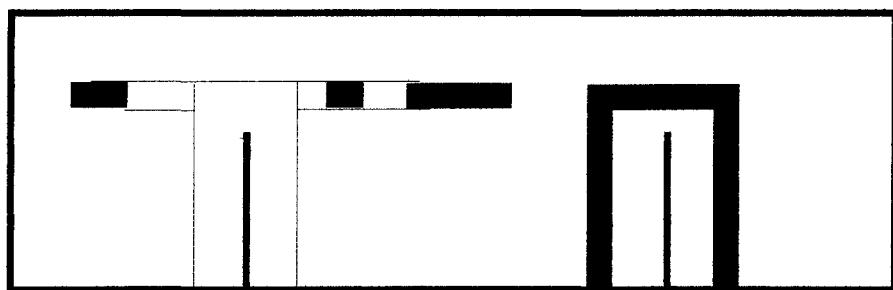


Figure 4.10 b) Visualisation au milieu du bain (plan A) avec 2 rouleaux, sans plaque et un angle de 45° pour des temps de 6.5, 10 et 12 secondes après l'injection

POSITION DE VUE**DE LA FIGURE 4.11**

La zone hachurée correspond à la zone visualisée



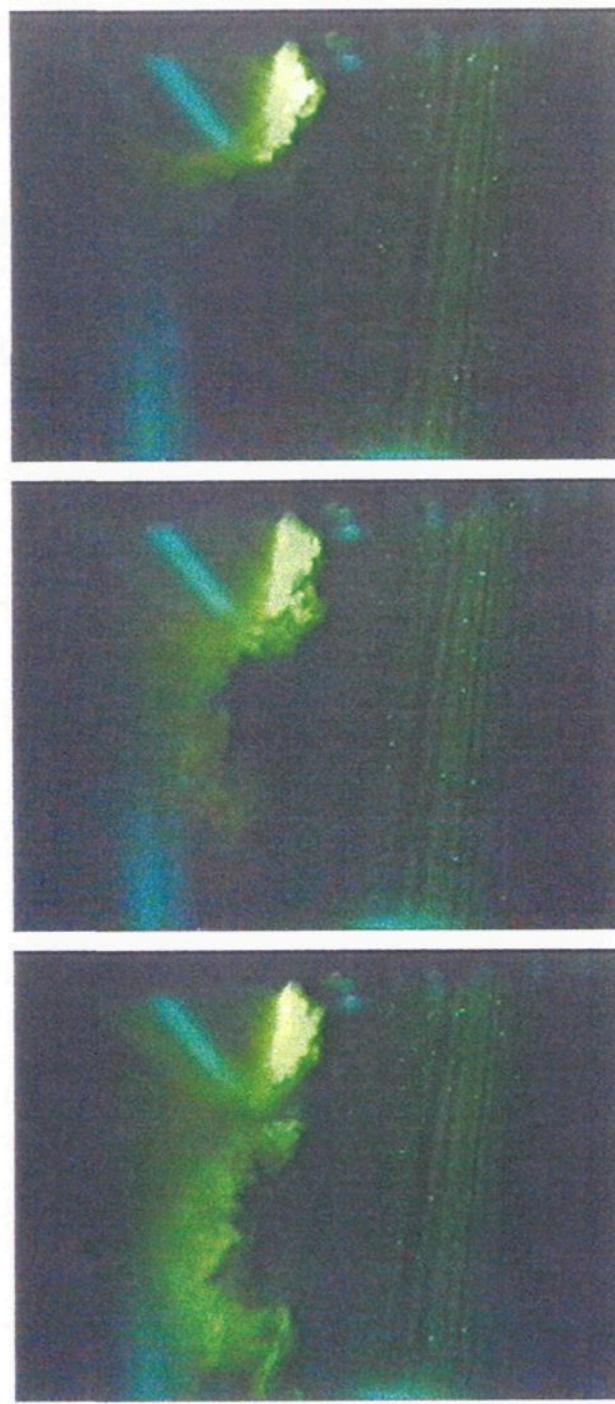


Figure 4.11 a) Visualisation au milieu du bain près du rouleau, avec 2 rouleaux, sans plaque et un angle de 45° pour des temps de 0.5, 0.77 et 1.13 secondes après l'injection

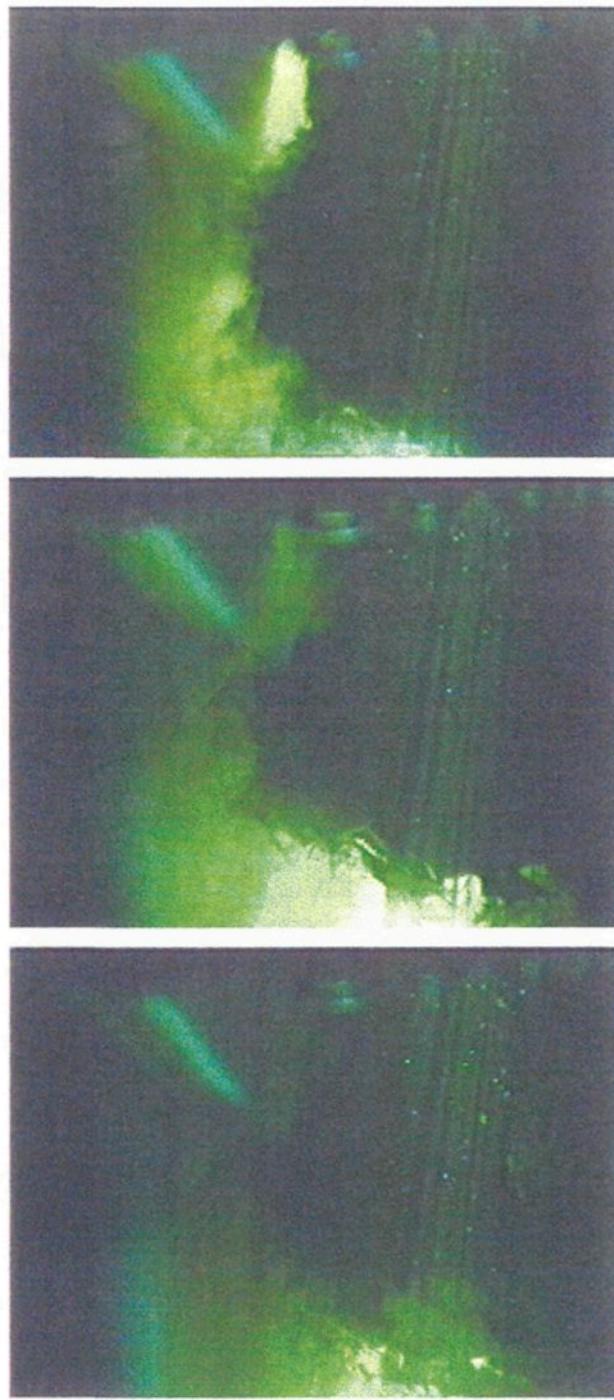
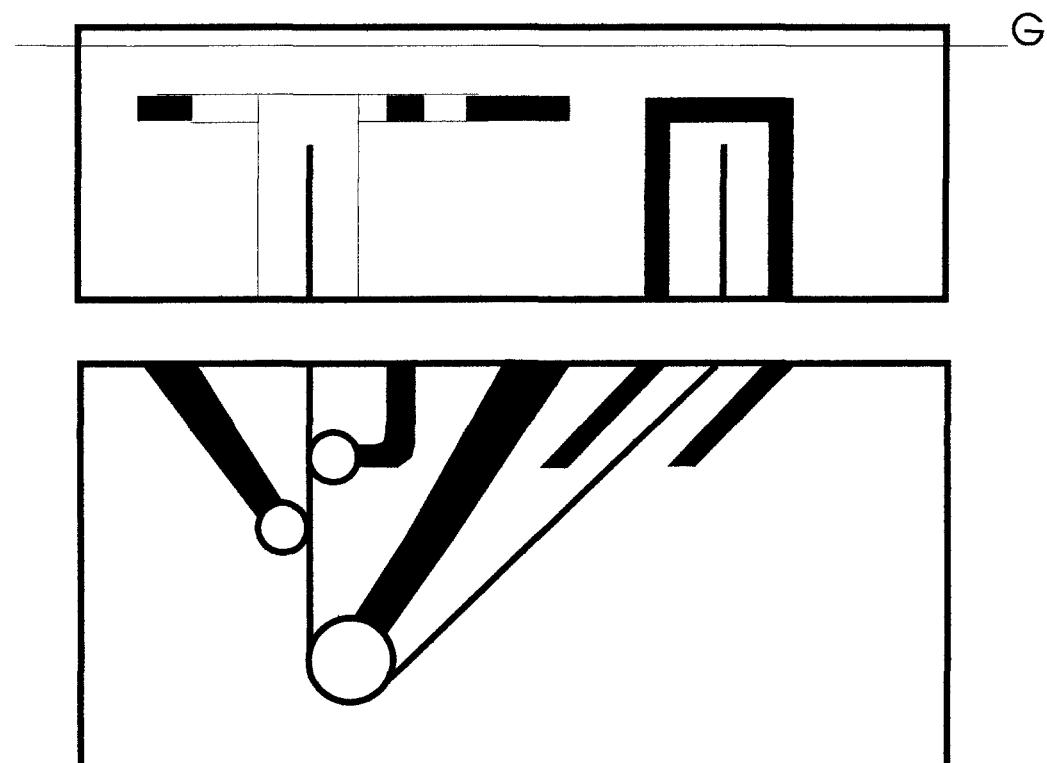


Figure 4.11 b) Visualisation au milieu du bain près du rouleau, avec 2 rouleaux, sans plaque et un angle de 45° pour des temps de 1.97, 4 et 6 secondes après l'injection

POSITION DU PLAN G**DE LA FIGURE 4.12**

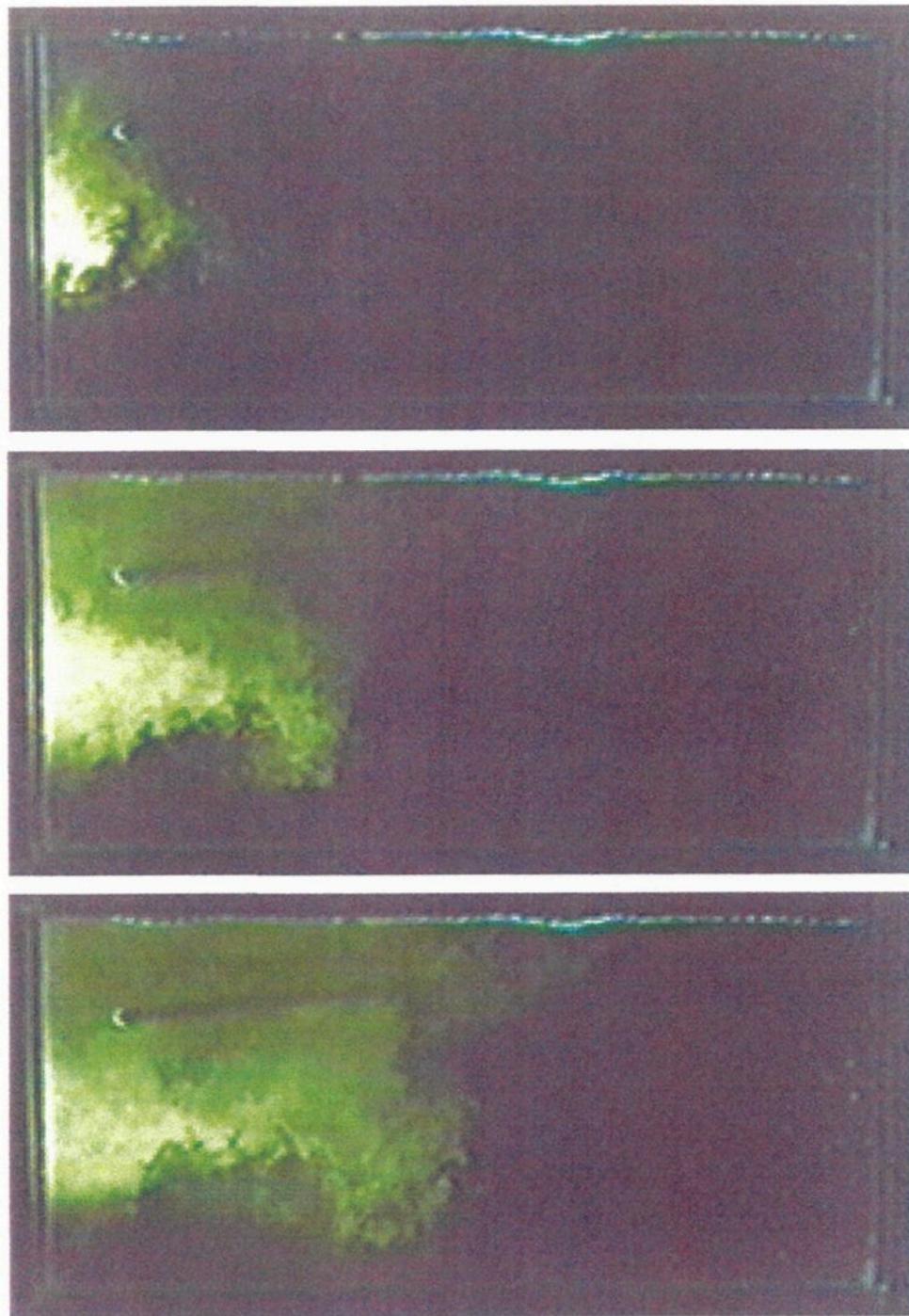


Figure 4.12 a) Visualisation près des parois (plan G), avec 2 rouleaux, sans plaque et un angle de 45° pour des temps de 4, 7 et 10 secondes après l'injection

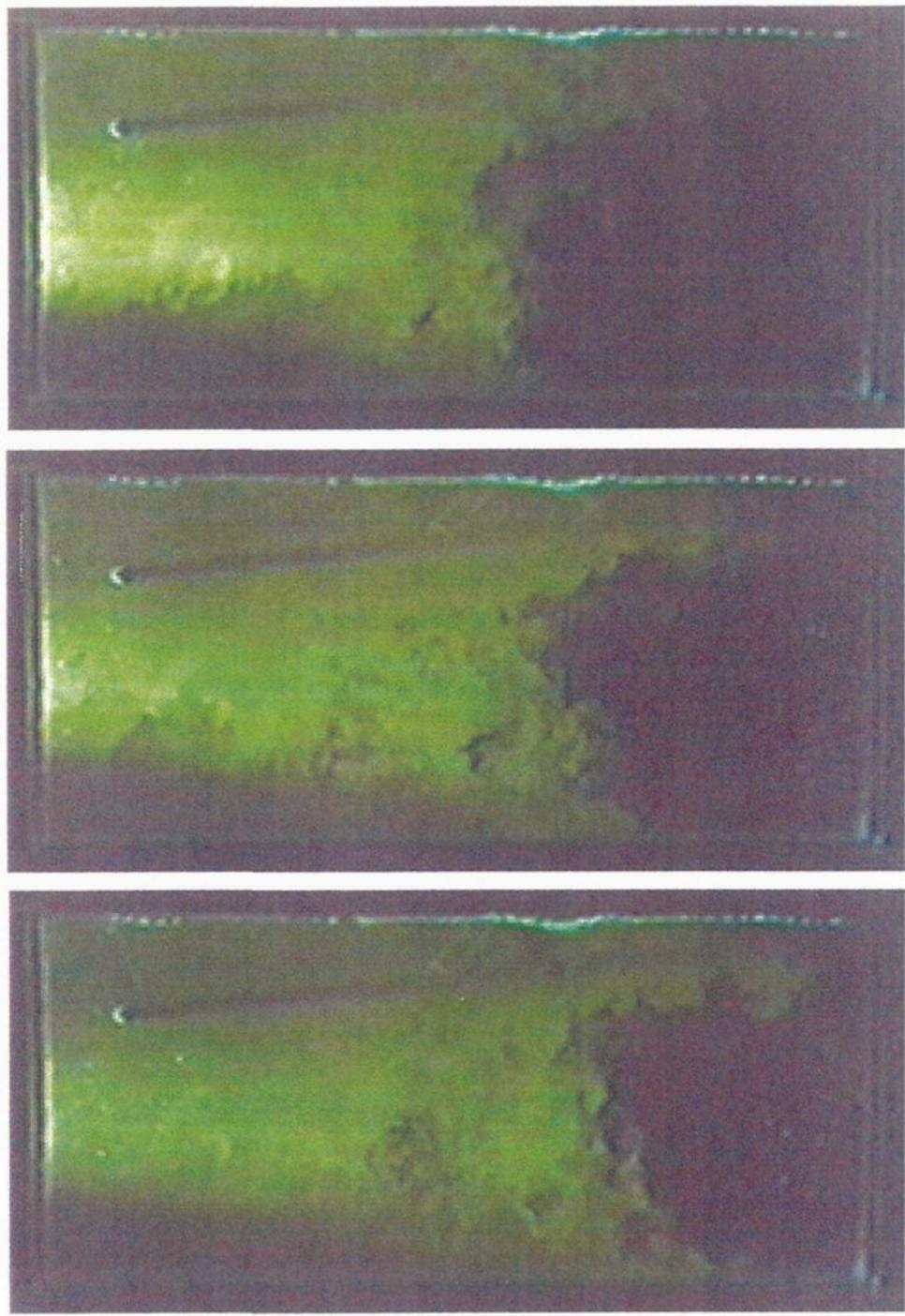


Figure 4.12 b) Visualisation près des parois (plan G), avec 2 rouleaux, sans plaque et un angle de 45° pour des temps de 13, 16 et 19 secondes après l'injection

4.1.1.1 Détails de l'écoulement dans la cloche

L'écoulement dans la cloche est certainement très important car les réactions qui forment la couche inhibitrice sont très rapides et la feuille touche le métal liquide de la cuve d'abord via le conduit de la cloche. Des images ont donc été prises près de la cloche pour tenter d'observer l'écoulement dans cette zone.

La figure 4.13 montre l'extérieur du conduit de la cloche dans le plan A. Une injection faite à l'arrière du conduit, directement dans l'eau, montre que le traceur a tendance à entrer dans le conduit en passant par le dessous. Sur la dernière image de cette série de photos, on voit le traceur qui se dirige vers la courroie, par le haut, pour ensuite être entraîné par celle-ci (non visible sur ces photos). La figure 4.14 montre cette fois l'intérieur droit de la cloche pour une injection de traceur faite à l'intérieur même de la cloche. La fluorescéine est restée emprisonnée dans le coin supérieur droit pour toute la période de l'enregistrement, soit d'au moins 1 min 30 sec. Par contre, lorsque le traceur descend en bas à droite du conduit, il est aspiré vers le haut, à droite, pour être entraîné par la feuille tel que vu sur la figure 4.13. Selon ces observations, il semble exister une petite zone stagnante dans le coin supérieur droit de la cloche.

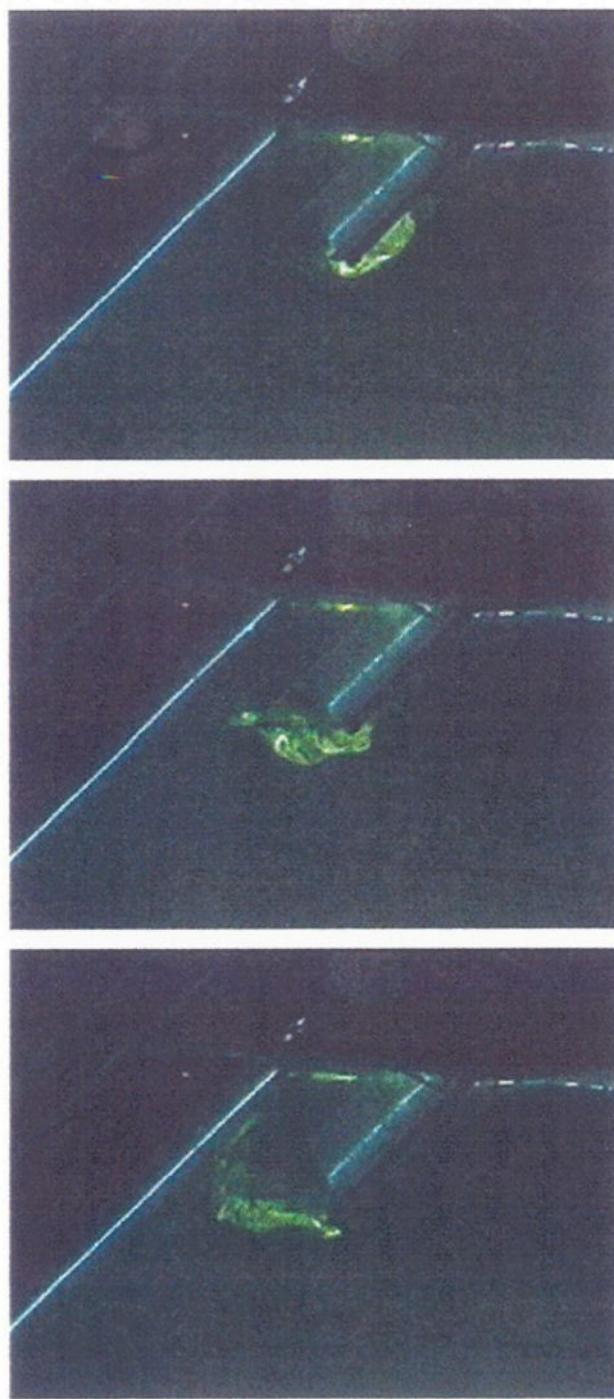


Figure 4.13 Visualisation du côté arrière de la cloche (plan A), avec 2 rouleaux, sans plaque et un angle de 45°

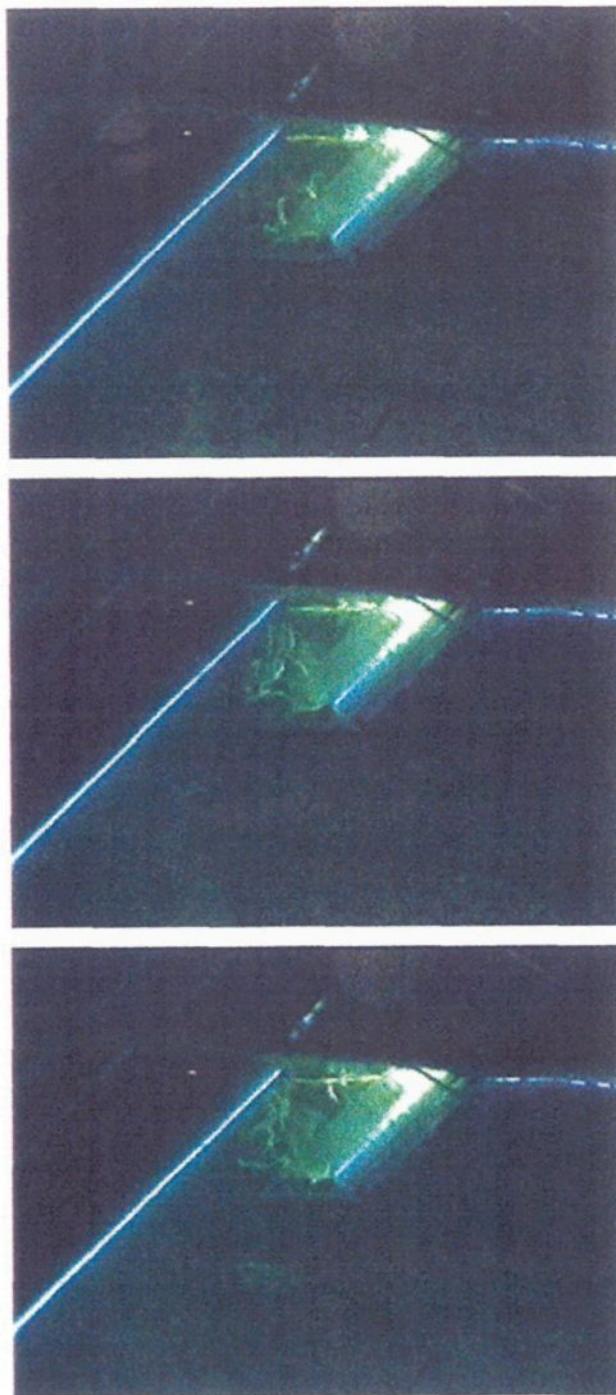


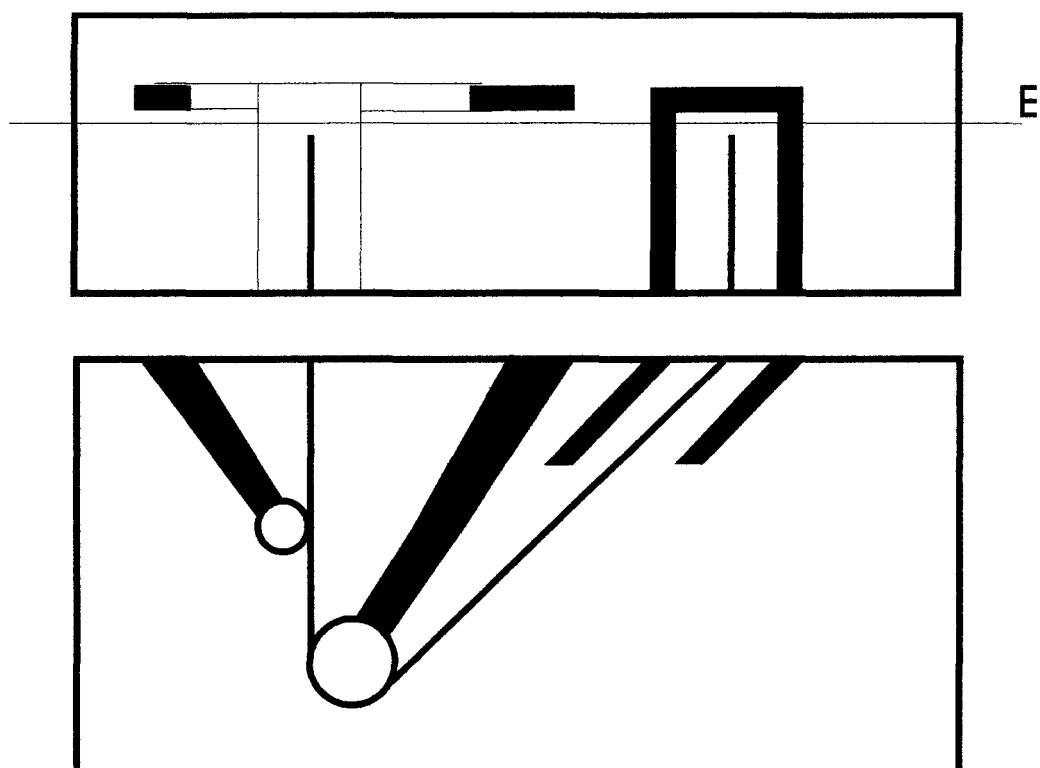
Figure 4.14 Visualisation du côté arrière de la cloche (plan A) avec 2 rouleaux, sans plaque et un angle de 45°

4.1.1.2 Écoulement avec un rouleau, angle de 45° sans plaque

L'écoulement avec un seul rouleau stabilisateur (positionné à l'avant du bain) affecte l'écoulement dans le bain. Cependant, la différence entre l'absence des rouleaux stabilisateurs et la présence d'un seul rouleau à l'avant est mince. C'est pourquoi une seule figure avec un seul rouleau sera présentée ici. Comme les autres plans d'observation montrent un écoulement très semblable à l'écoulement sans rouleau, ils seront présentés à la section suivante.

Une des différences observées se retrouve à l'intérieur de la feuille et au mouvement qu'on retrouve dans les plans G, F et E. La figure 4.15 (a et b) montre l'écoulement avec un seul rouleau pour le plan E. Sur cette figure la différence à observer est la position du fluide lorsqu'il retourne à l'arrière. Avec deux rouleaux, le traceur a tendance à effectuer son déplacement vers l'arrière par le haut du bain. Ici, par contre, le traceur qui se déplace toujours vers l'arrière du bain se situe plus uniformément sur toute la surface du plan. Le rouleau stabilisateur intérieur qui est absent ici détournait probablement le fluide vers le haut avec son sens de rotation horaire. Par contre, le mouvement de rotation antihoraire du rouleau extérieur présent a pour effet de projeter le fluide plus au centre, vers le rouleau principal en plus de projeter le traceur vers le bas du bain lorsque celui-ci rencontre la section où le rouleau touche la courroie.

La visualisation de l'écoulement au centre du bain pour cette configuration s'est avérée très mauvaise malgré plusieurs reprises du vidéo. Cependant, cet écoulement a été observé à l'oeil et il est semblable à celui qu'on retrouve sans rouleau, même avec modification de l'angle de la feuille, ces images seront présentées dans la section 4.1.1.4.

POSITION DU PLAN E**DE LA FIGURE 4.15**

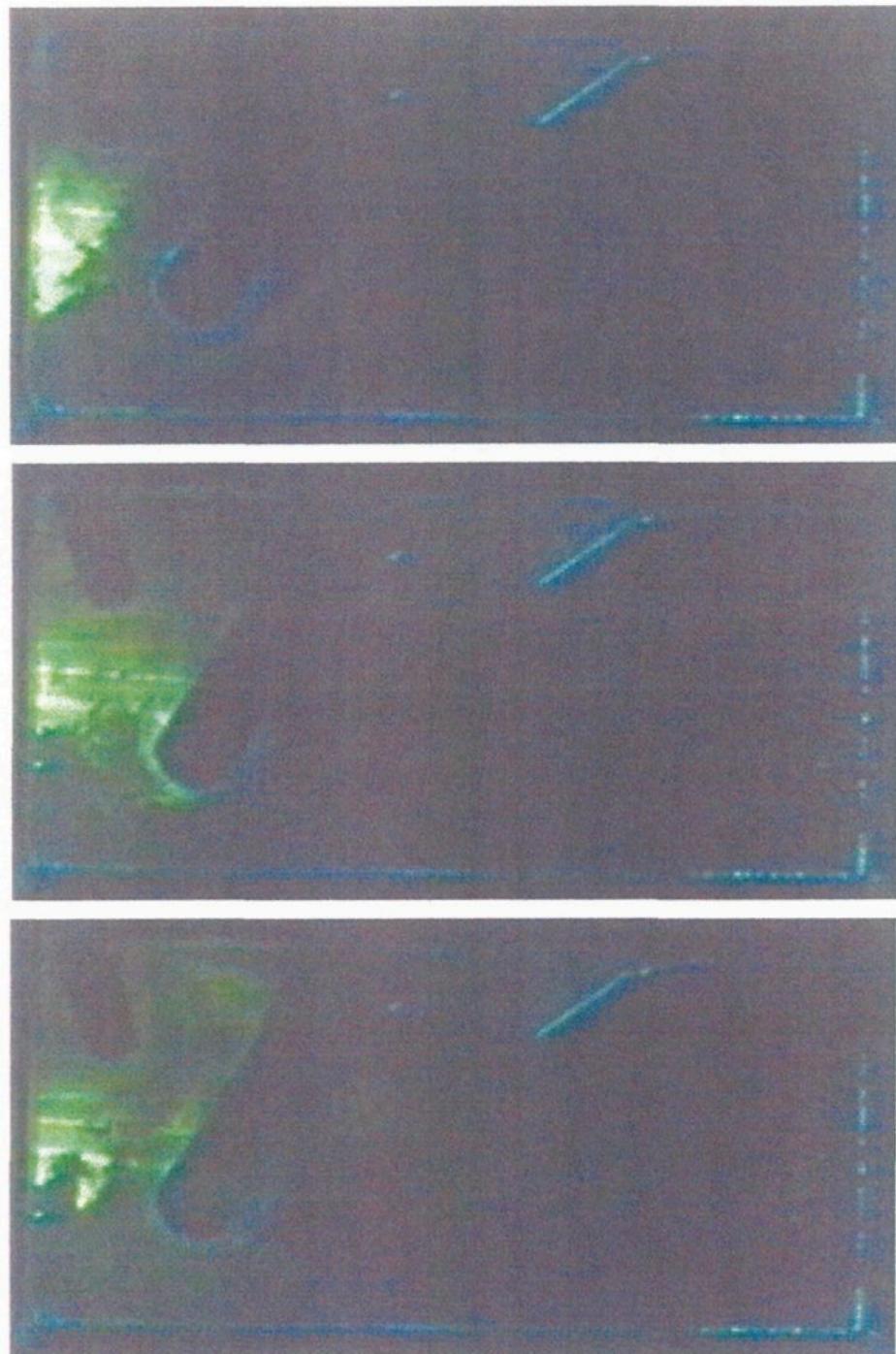


Figure 4.15 a) Visualisation entre la courroie et les bras (plan E) avec 1 rouleau, sans plaque et un angle de 45° pour des temps de 3, 5 et 7 secondes après l'injection

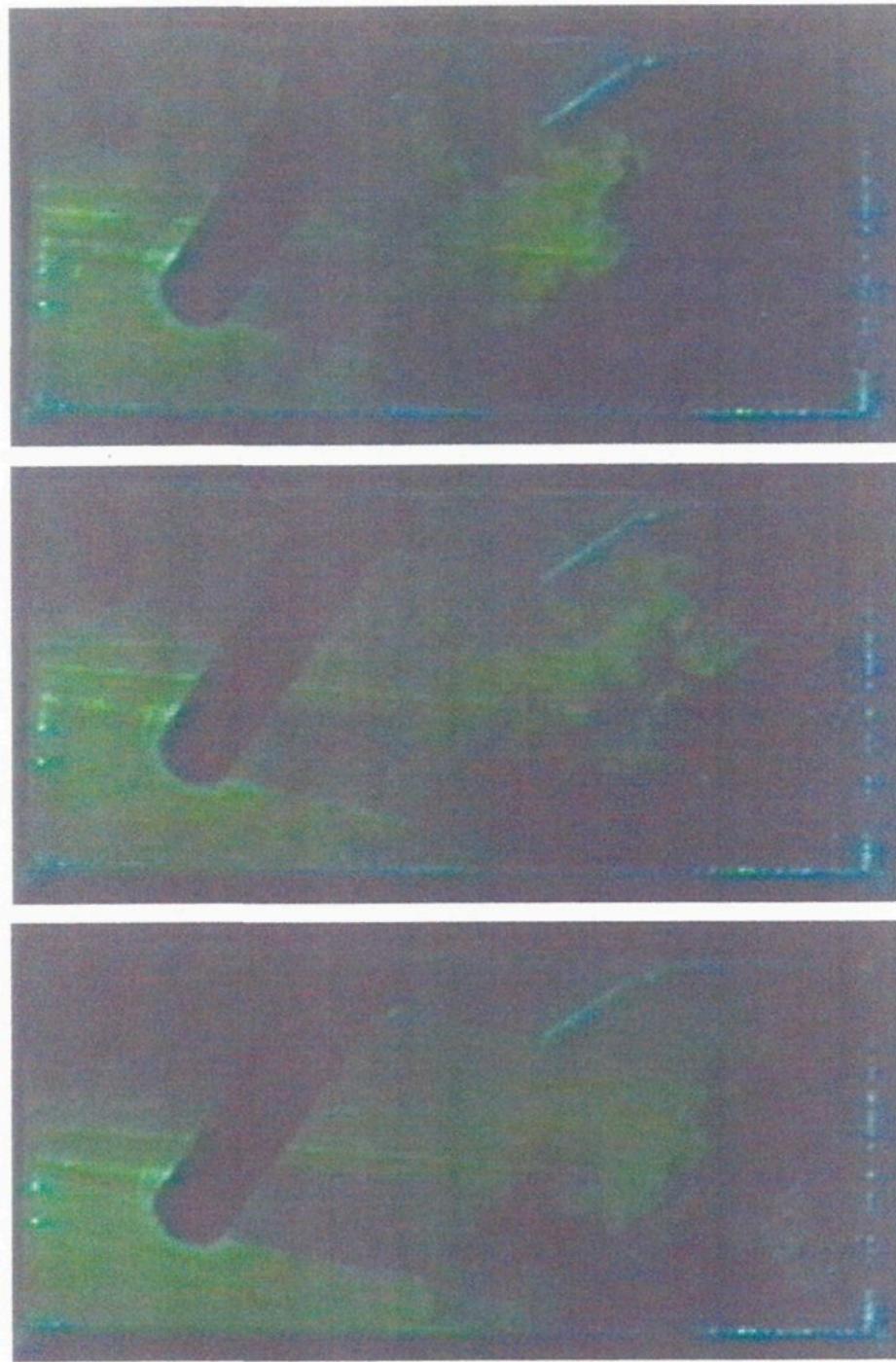
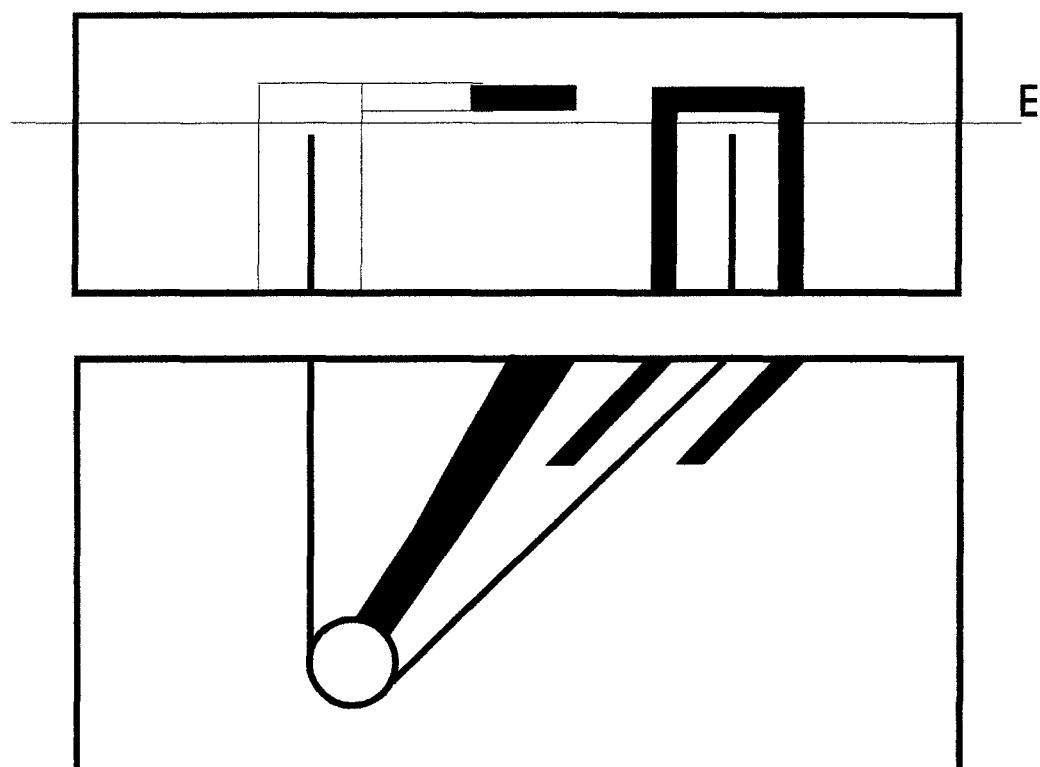


Figure 4.15 b) Visualisation entre la courroie et les bras (plan E) avec 1 rouleau, sans plaque et un angle de 45° pour des temps de 11, 15 et 22 secondes après l'injection

4.1.1.3 Écoulement sans rouleau, angle de 45° sans plaque

L'écoulement observé dans le bain sans rouleau affecte particulièrement la section avant du bain. Par contre, pour les mêmes raisons qu'à la section 4.1.1.2, seulement une seule série de photos sera présentée ici.

La figure 4.16 (a et b) montre le plan E. Les différences par rapport aux figures 4.2 et 4.15 est la manière dont le traceur se mélange à l'avant. Ici, l'absence des rouleaux fait de sorte que le brassage est moins efficace et le traceur se disperse moins que dans les deux autres cas. La luminosité du traceur est plus marquée pour la même concentration et quantité de fluorescéine injectée.

POSITION DU PLAN E**DE LA FIGURE 4.16**

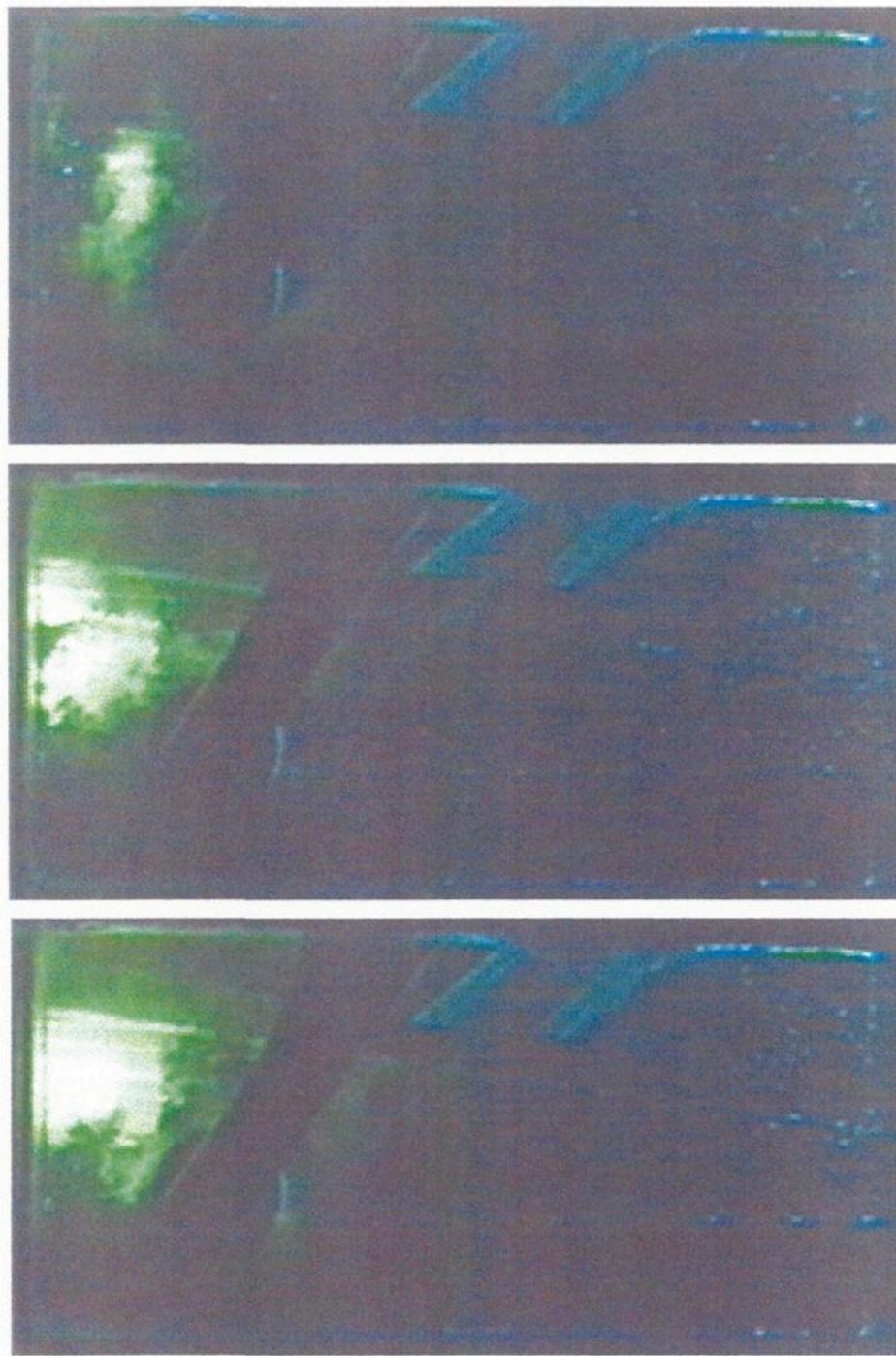


Figure 4.16 a) Visualisation entre la courroie et les bras (plan E) sans rouleau, sans plaque et un angle de 45° pour des temps de 3, 5 et 7 secondes après l'injection

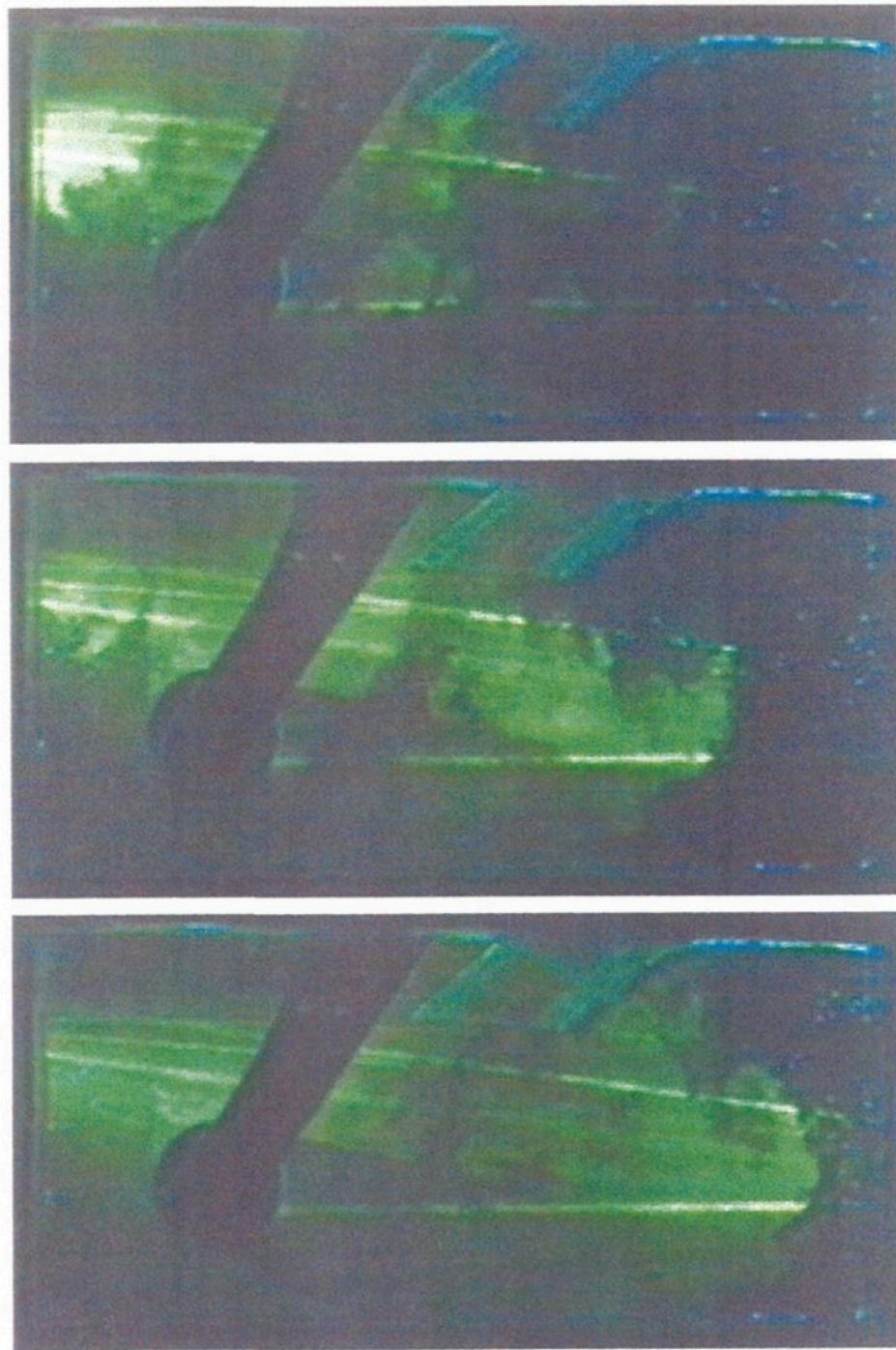


Figure 4.16 b) Visualisation entre la courroie et les bras (plan E) sans rouleau, sans plaque et un angle de 45° pour des temps de 11, 15 et 21 secondes après l'injection

4.1.1.4 Écoulement sans rouleau, angle de 32° sans plaque

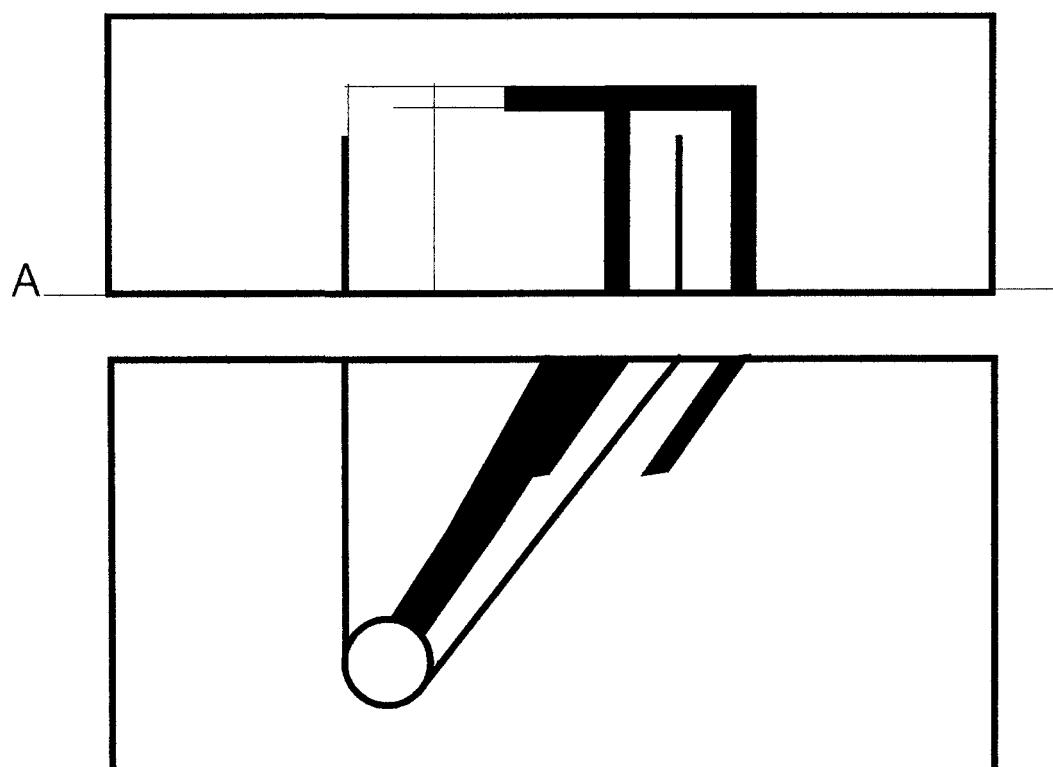
La modification de l'angle de courroie a pour principal effet d'agrandir la zone stagnante à l'arrière et d'allonger le temps de mélange complet de la cuve. Le patron de l'écoulement, malgré la modification de l'angle, est sensiblement le même que pour la configuration sans rouleau.

La figure 4.17 (a et b) montre le plan A au centre du bain pour cette configuration. Le traceur monte directement vers le haut du bain, lorsqu'il arrive à l'avant, en suivant le mouvement de la feuille. Il se replie ensuite sur lui même pour descendre en bas à l'avant et pour se disperser de chaque côté de la paroi tel que vu précédemment. La modification de l'angle entraîne en mouvement rotatif dans le sens antihoraire juste à droite du rouleau principal (figure 4.17 b, deuxième image). Finalement, le traceur apparaît à l'arrière.

La figure 4.18 (a et b) montre le plan E entre les bras des rouleaux et le bord de la feuille. Le mouvement est encore le même dans ce plan, i.e. que le traceur se déplace de l'avant vers l'arrière, mais sa position dans ce déplacement est très différente. En fait, le traceur est plus concentré vers le bas du bain que vu dans les figures 4.2, 4.15 et 4.16. C'est à la fois l'effet de la présence des rouleaux et de l'angle d'inclinaison de la courroie qui cause ce phénomène.

La figure 4.19 (a et b) montre le plan G entre la paroi de plexiglass et les bras des rouleaux. Le traceur reste beaucoup plus longtemps à l'avant du bain où se trouve la courroie et les rouleaux que ce même plan avec rouleaux et angle de 45°. Ceci appuie l'hypothèse que la zone stagnante arrière est accentuée par la diminution de l'angle d'inclinaison.

La visualisation dans la section centrale du plan A est présentée à la figure 4.20 (a et b). L'injection a été faite à l'intérieur de la courroie, de la même façon que précédemment. Le colorant injecté suit d'abord la courroie pour ensuite réapparaître en haut et à gauche. Ensuite, le traceur se disperse très rapidement en augmentant en apparence à la fois à partir de la droite et de la gauche. Ceci laisse supposer que cette section montre plusieurs boucles d'écoulement.

POSITION DU PLAN A**DE LA FIGURE 4.17**

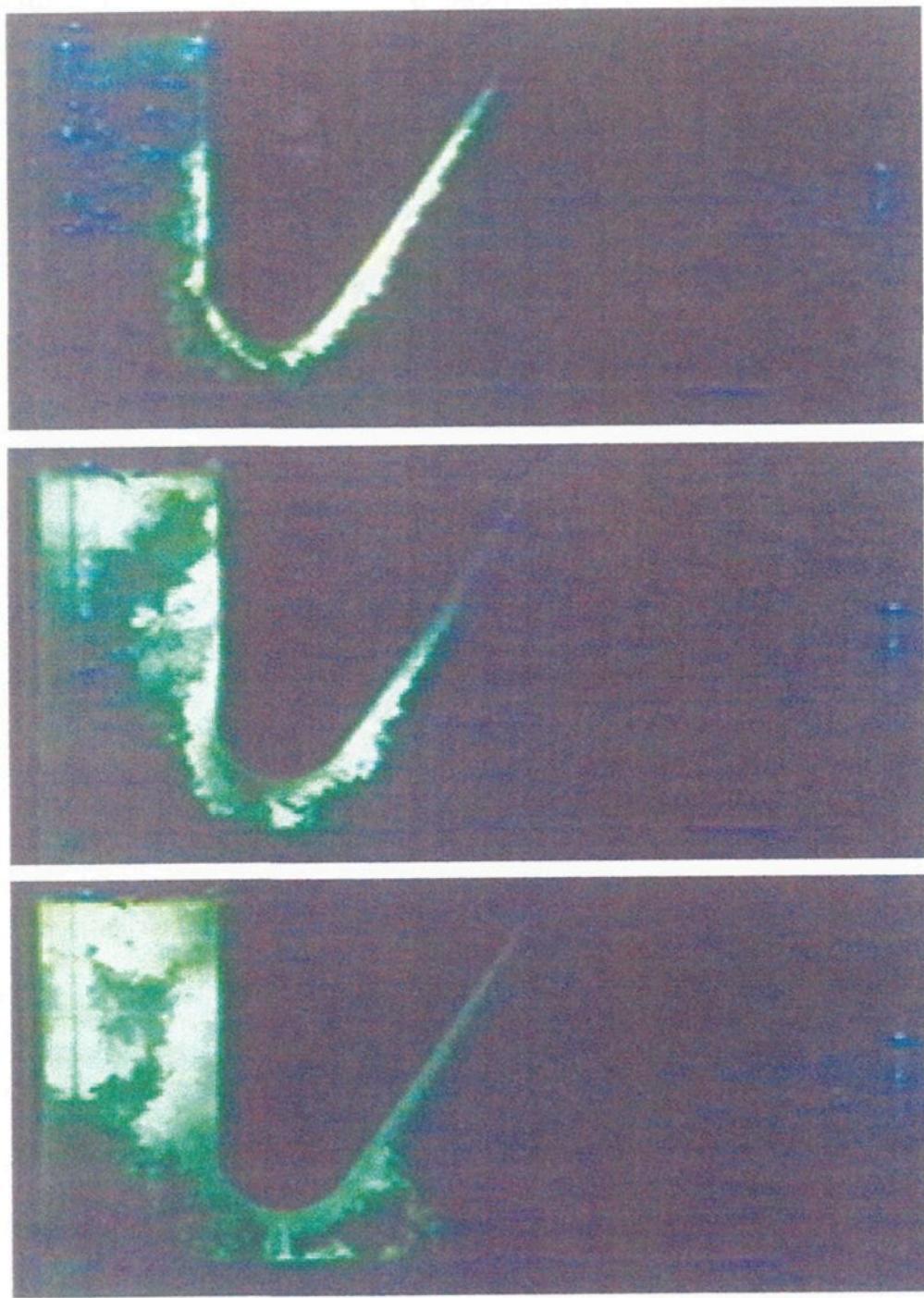


Figure 4.17 a) Visualisation au centre du bain (plan A) sans rouleau, sans plaque et un angle de courroie de 32° pour des temps de 2, 3 et 4 secondes après l'injection

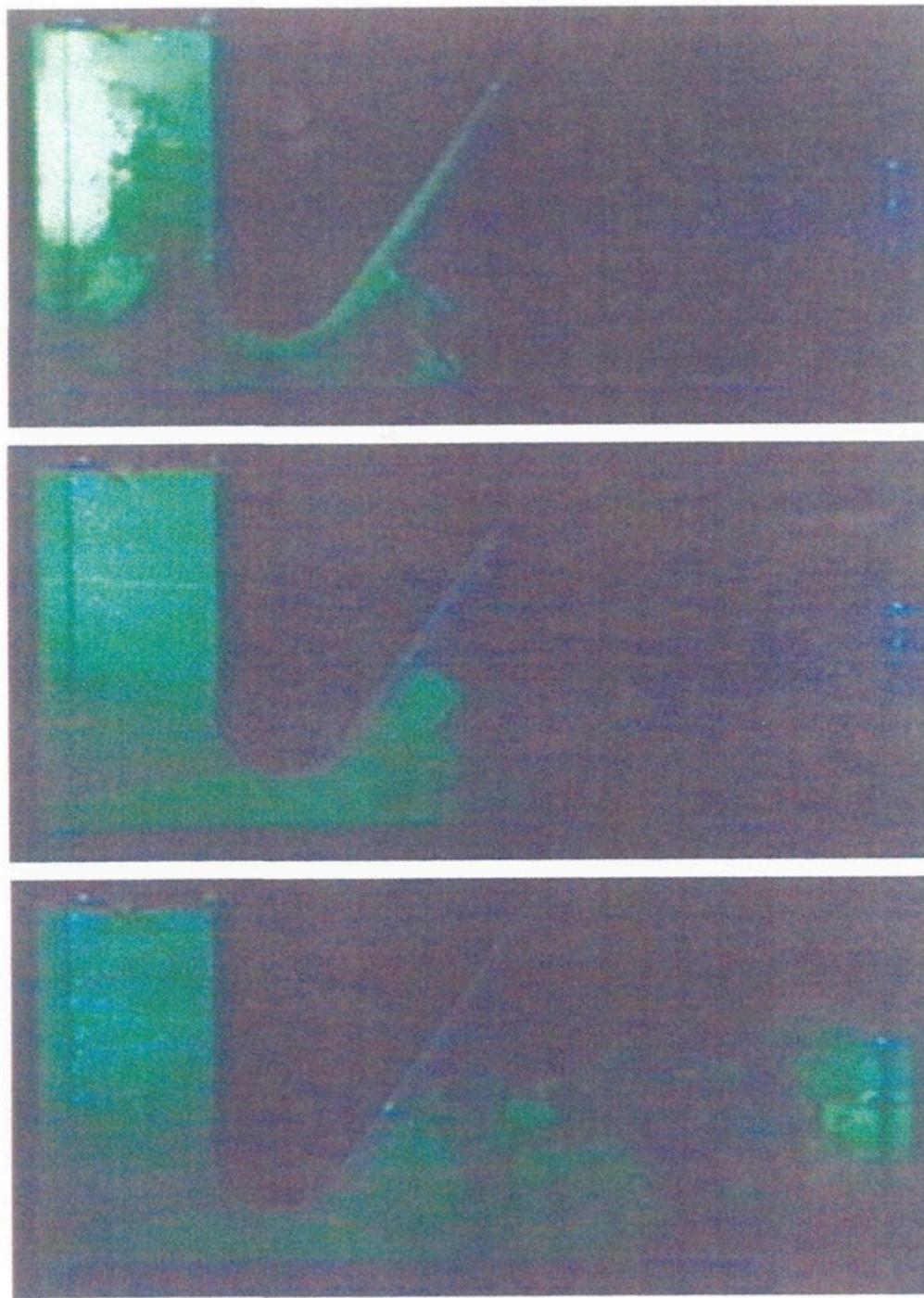
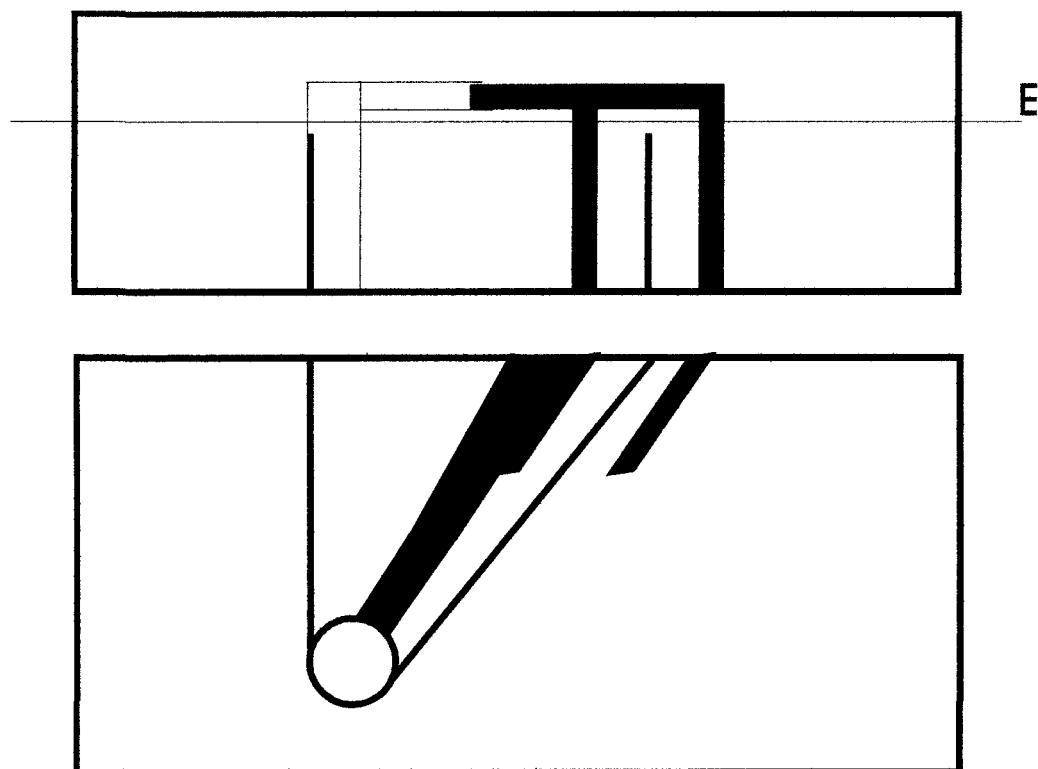


Figure 4.17 b) Visualisation au centre du bain (plan A) sans rouleau, sans plaque et un angle de courroie de 32° pour des temps de 6, 14 et 26 secondes après l'injection

POSITION DU PLAN E**DE LA FIGURE 4.18**

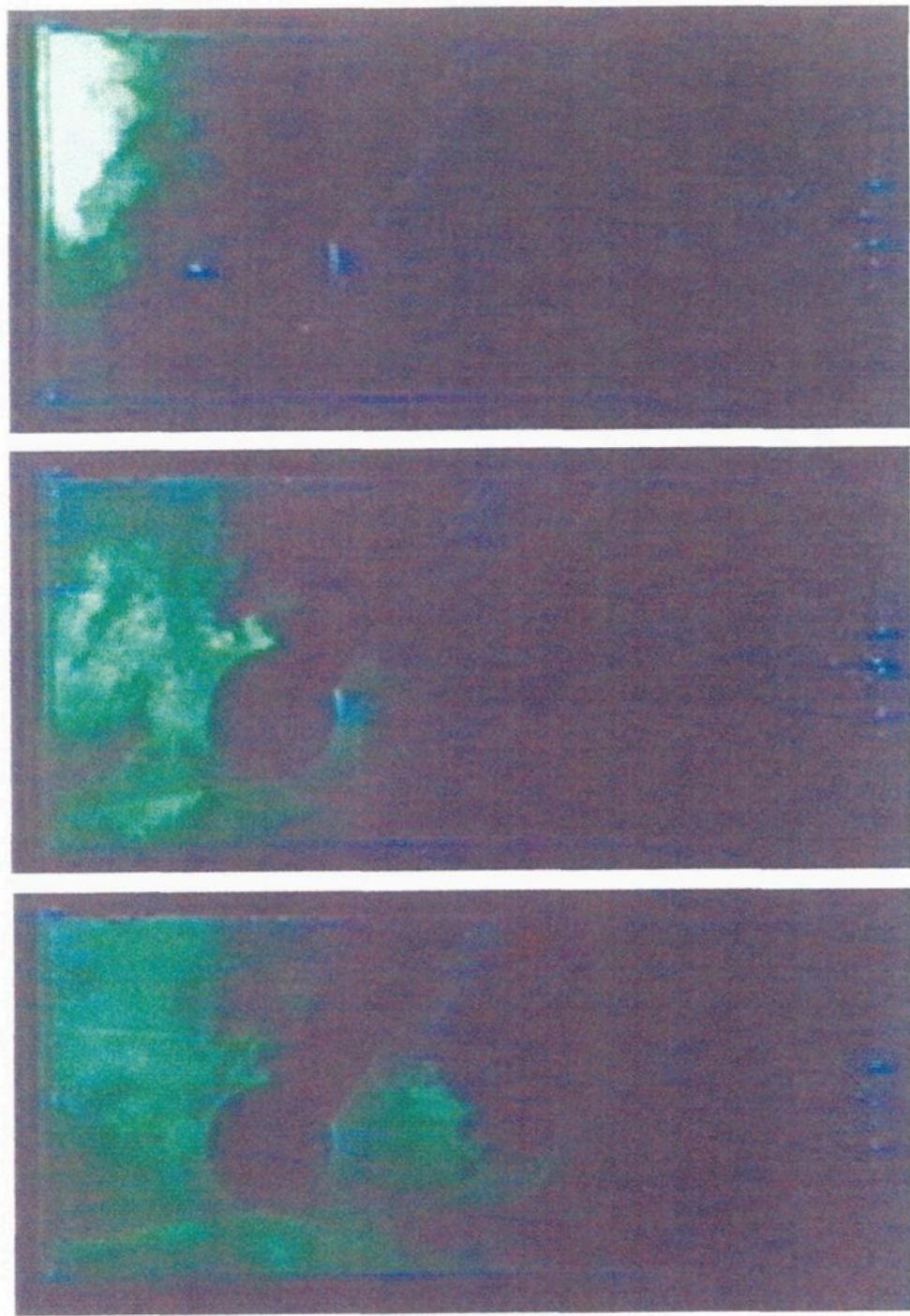


Figure 4.18 a) Visualisation entre la courroie et les bras (plan E) sans rouleau, sans plaque et un angle de 32° pour des temps de 5, 7 et 10 secondes après l'injection

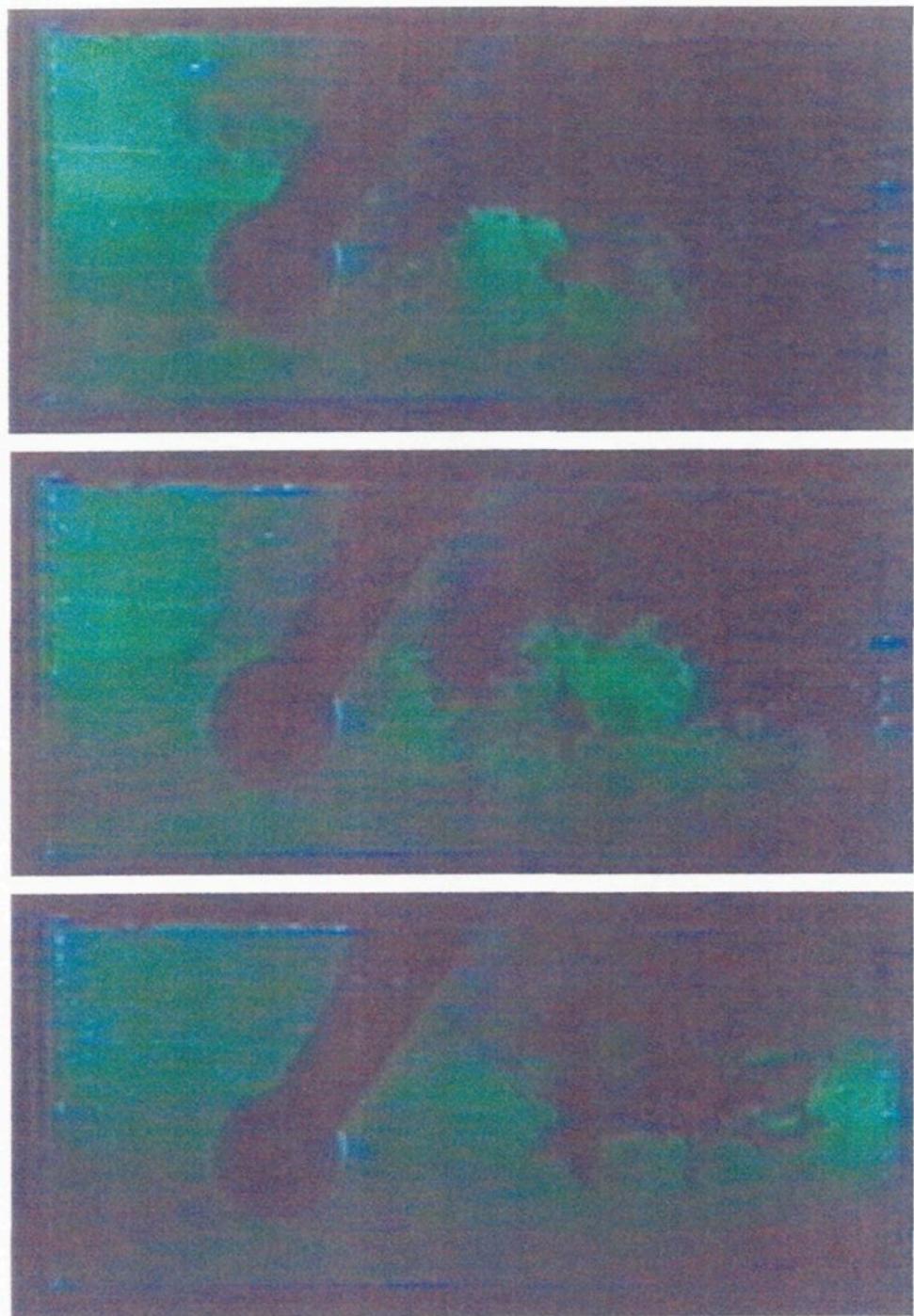
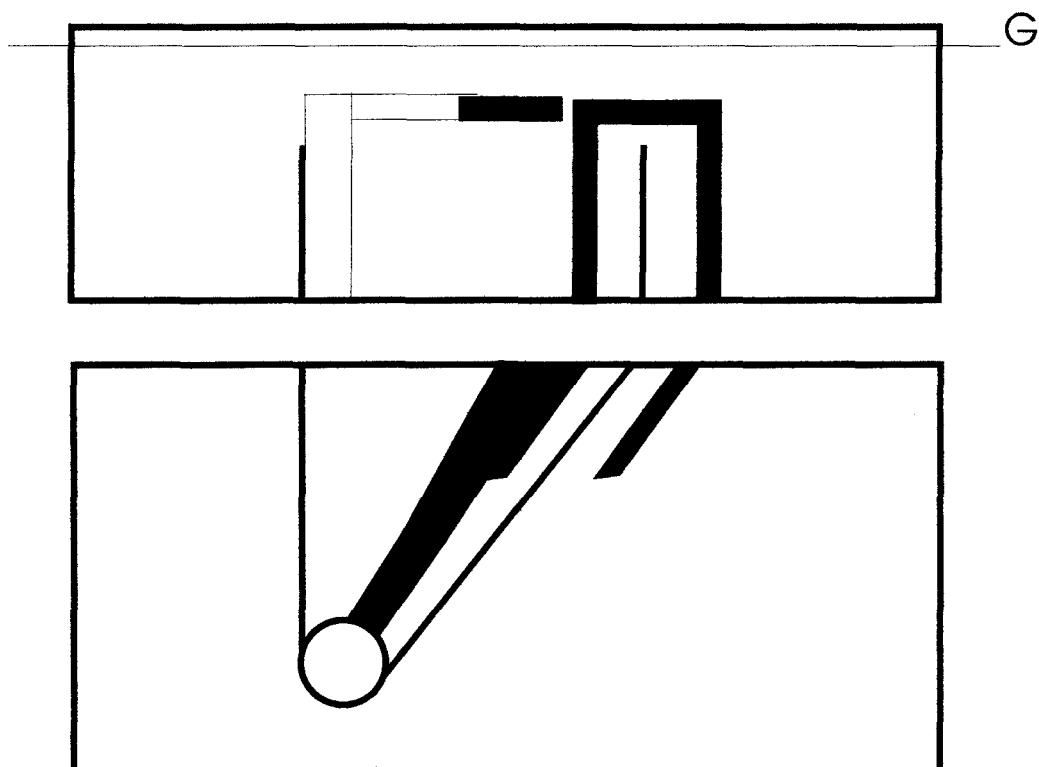


Figure 4.18 b) Visualisation entre la courroie et les bras (plan E) sans rouleau, sans plaque et un angle de 32° pour des temps de 14, 20 et 31 secondes après l'injection

POSITION DU PLAN G**DE LA FIGURE 4.19**

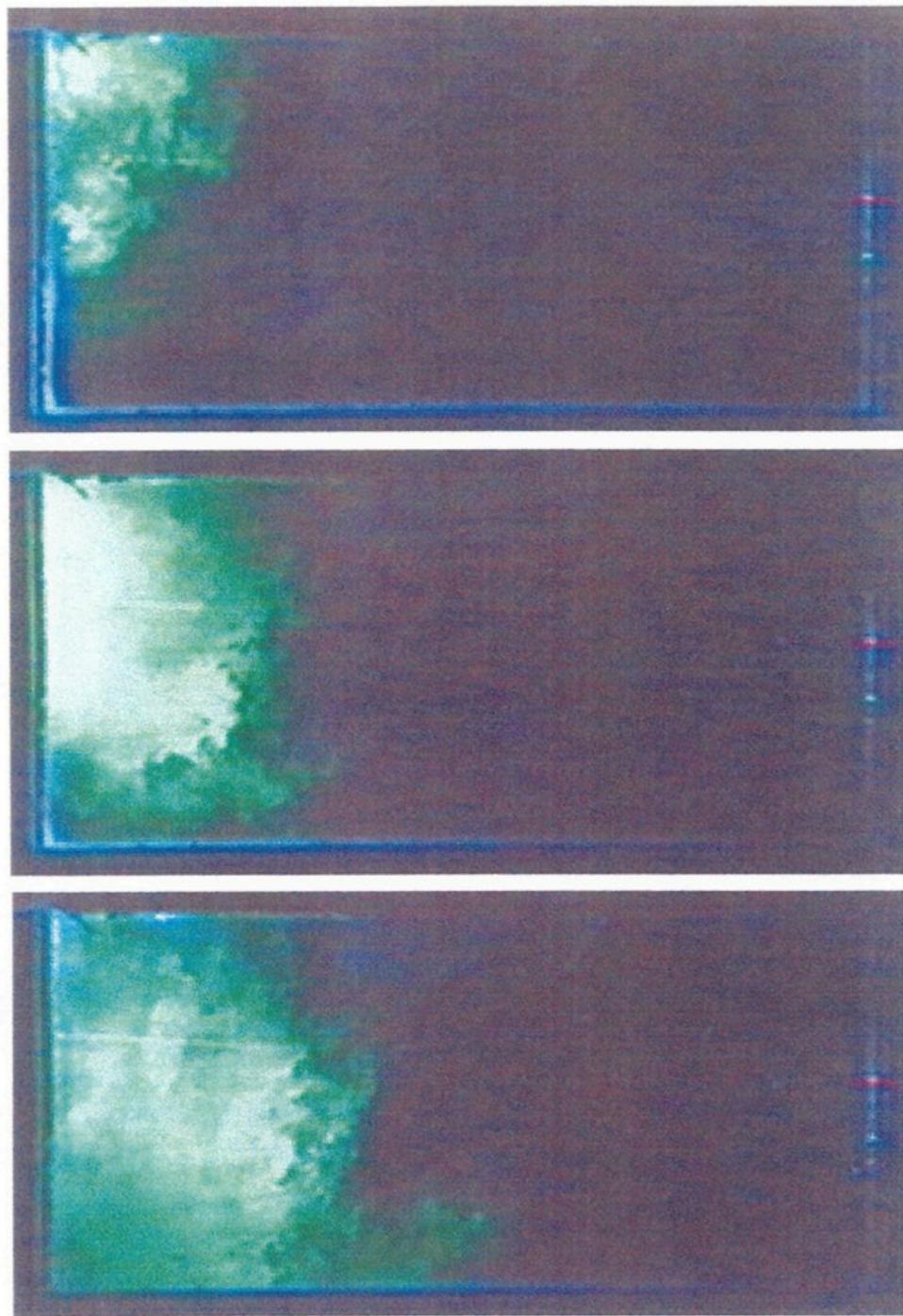


Figure 4.19 a) Visualisation près des parois (plan G), sans rouleau, sans plaque et un angle de 32° pour des temps de 6, 9 et 12 secondes après l'injection

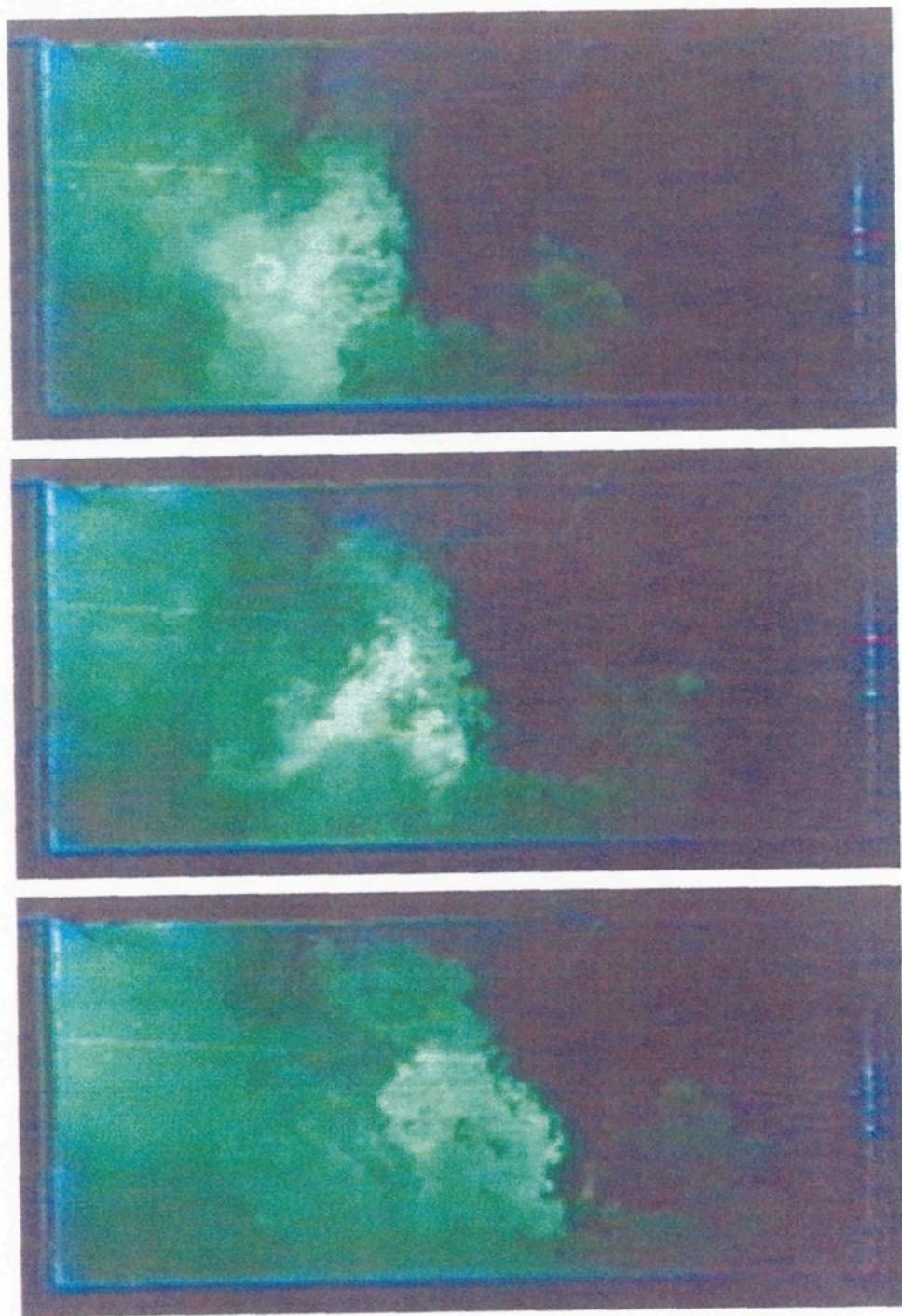
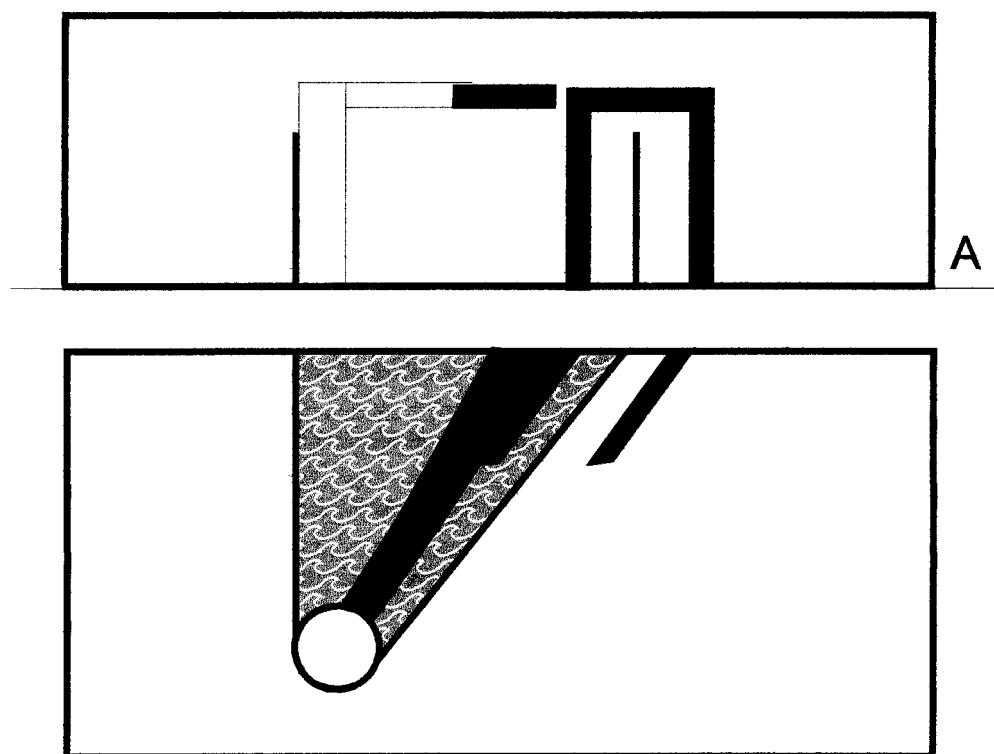


Figure 4.19 b) Visualisation près des parois (plan G), sans rouleau, sans plaque et un angle de 32° pour des temps de 15, 18 et 21 secondes après l'injection

POSITION DU PLAN A**DE LA FIGURE 4.20**

La zone hachurée correspond à la zone visualisée



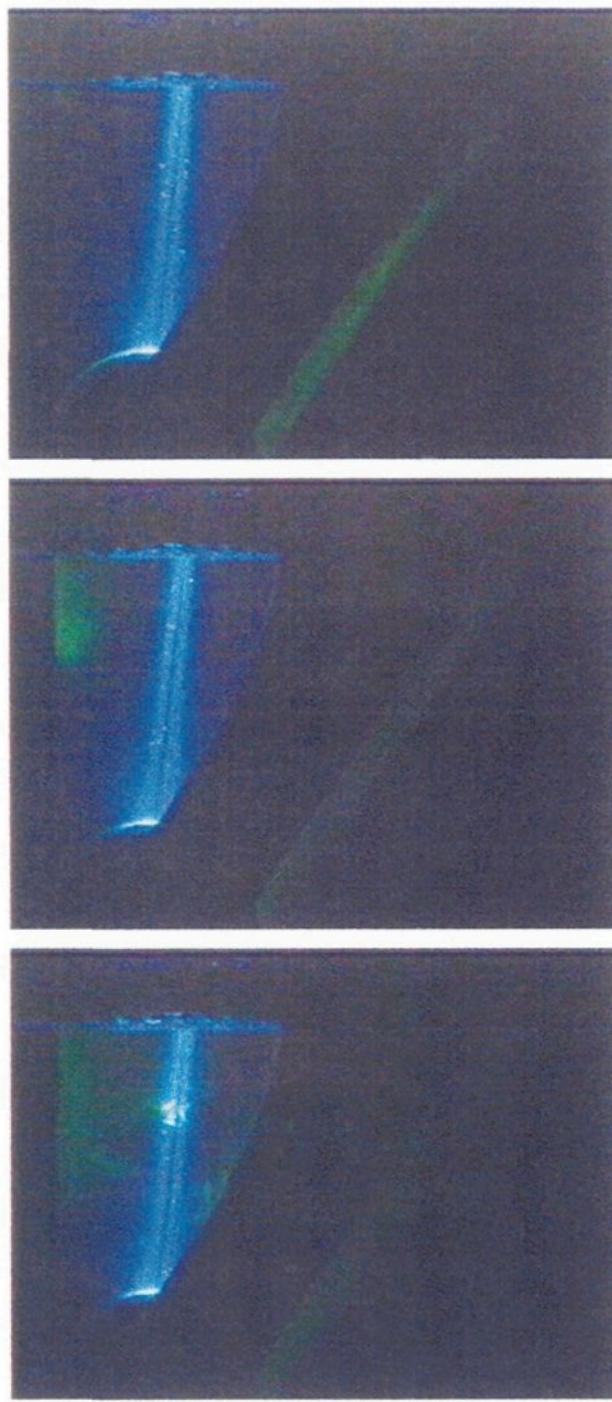


Figure 4.20 a) Visualisation au milieu du bain, (plan A) sans rouleau, sans plaque et un angle de 32° pour des temps de 2, 3 et 4 secondes après l'injection

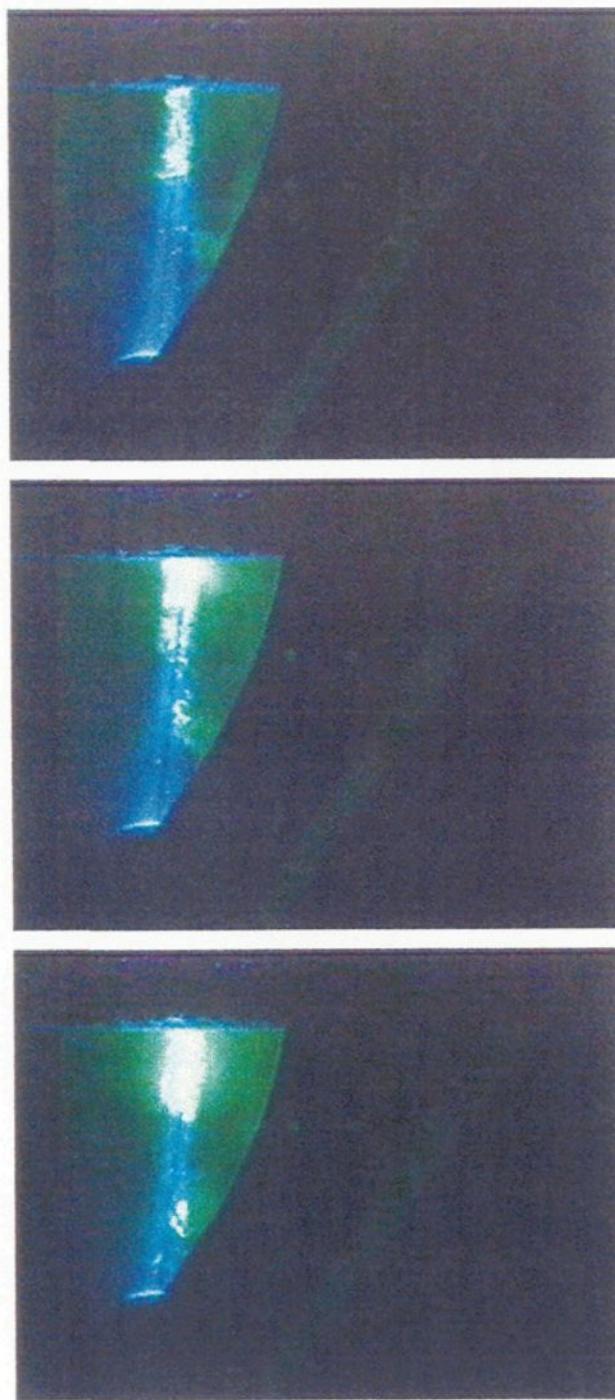
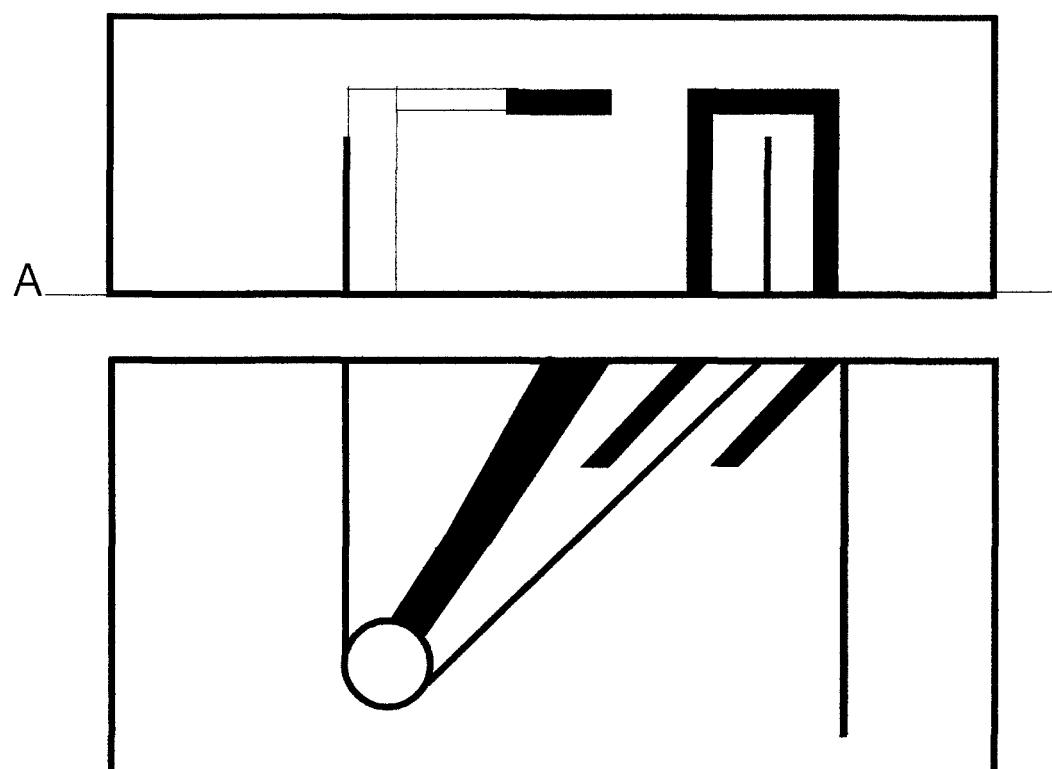


Figure 4.20 b) Visualisation au milieu du bain (plan A), sans rouleau, sans plaque et un angle de 32° pour des temps de 5, 6 et 7 secondes après l'injection

4.1.1.5 Écoulement sans rouleau, angle de 45° avec plaque

La présence d'une plaque déflectrice a pour effet d'isoler la partie arrière de la cuve. La figure 4.21 (a et b) montre l'écoulement au centre du bain (plan A). Le traceur suit le même parcours qu'on retrouve dans une cuve sans plaque et sans rouleau, mais avec la différence que la zone de gauche sur la figure 4.21 est mélangée plus rapidement et que le temps pris par le traceur pour arriver à l'arrière, dans la zone isolée par la plaque, est très long. À noter qu'à l'avant du bain, le traceur suit pratiquement le même trajet qu'à la figure 4.18.

Dans le plan E, on observe de quelle manière le traceur se rend dans la zone isolée par la plaque (figure 4.22 b). Le fluide entre dans la section arrière par la zone libre en dessous de la plaque, bien après que le reste du bain a été mélangé. De la même façon, le plan G (figure 4.23) montre que le traceur entre aussi dans la section arrière par les côtés du bain, mais de façon très diffuse. Ces deux dernières figures illustrent aussi l'écoulement sans rouleaux stabilisateurs.

POSITION DU PLAN A**DE LA FIGURE 4.21**

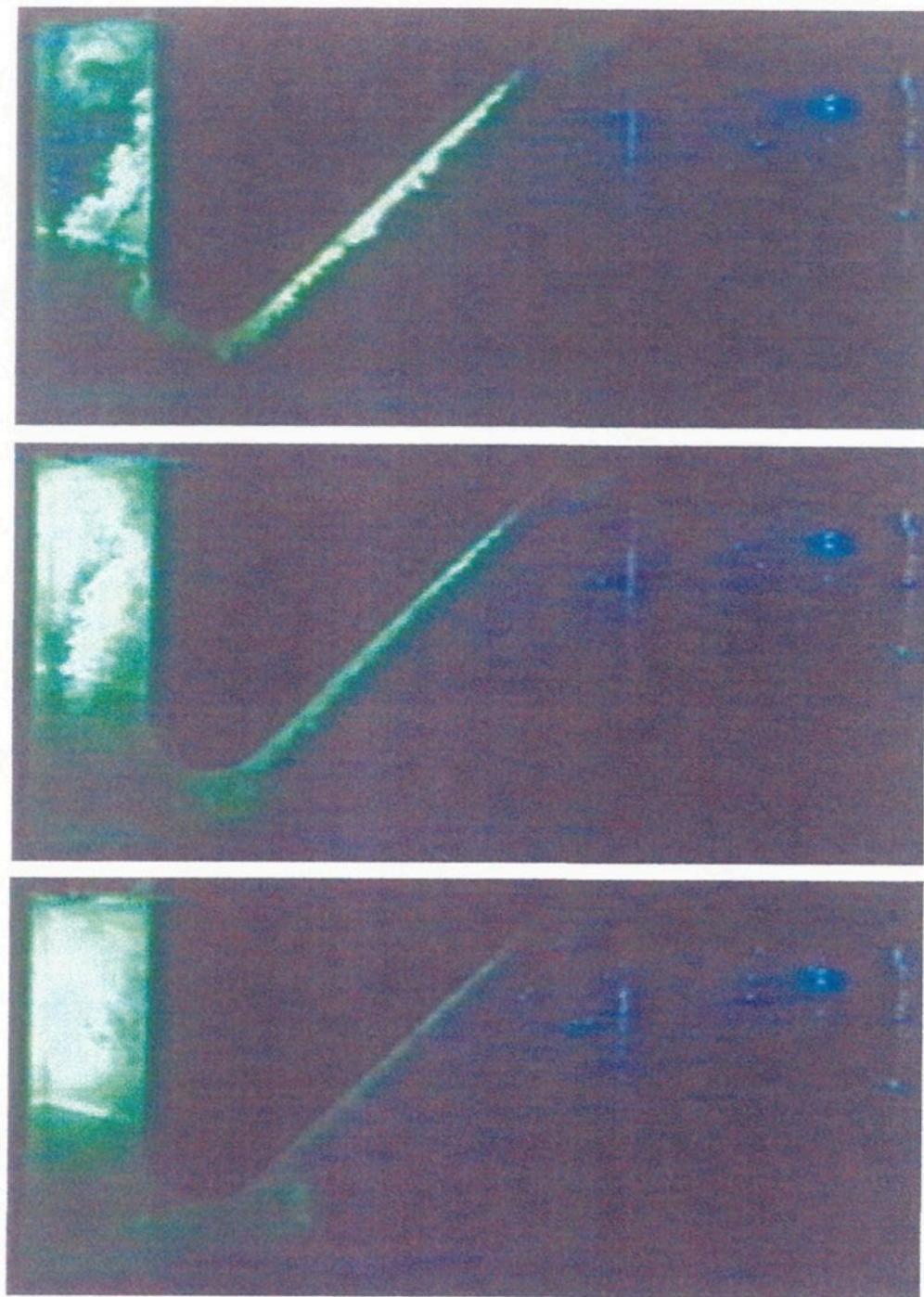


Figure 4.21 a) Visualisation au centre du bain (plan A) sans rouleau, avec plaque et un angle de courroie de 45° pour des temps de 2, 3 et 5 secondes après l'injection

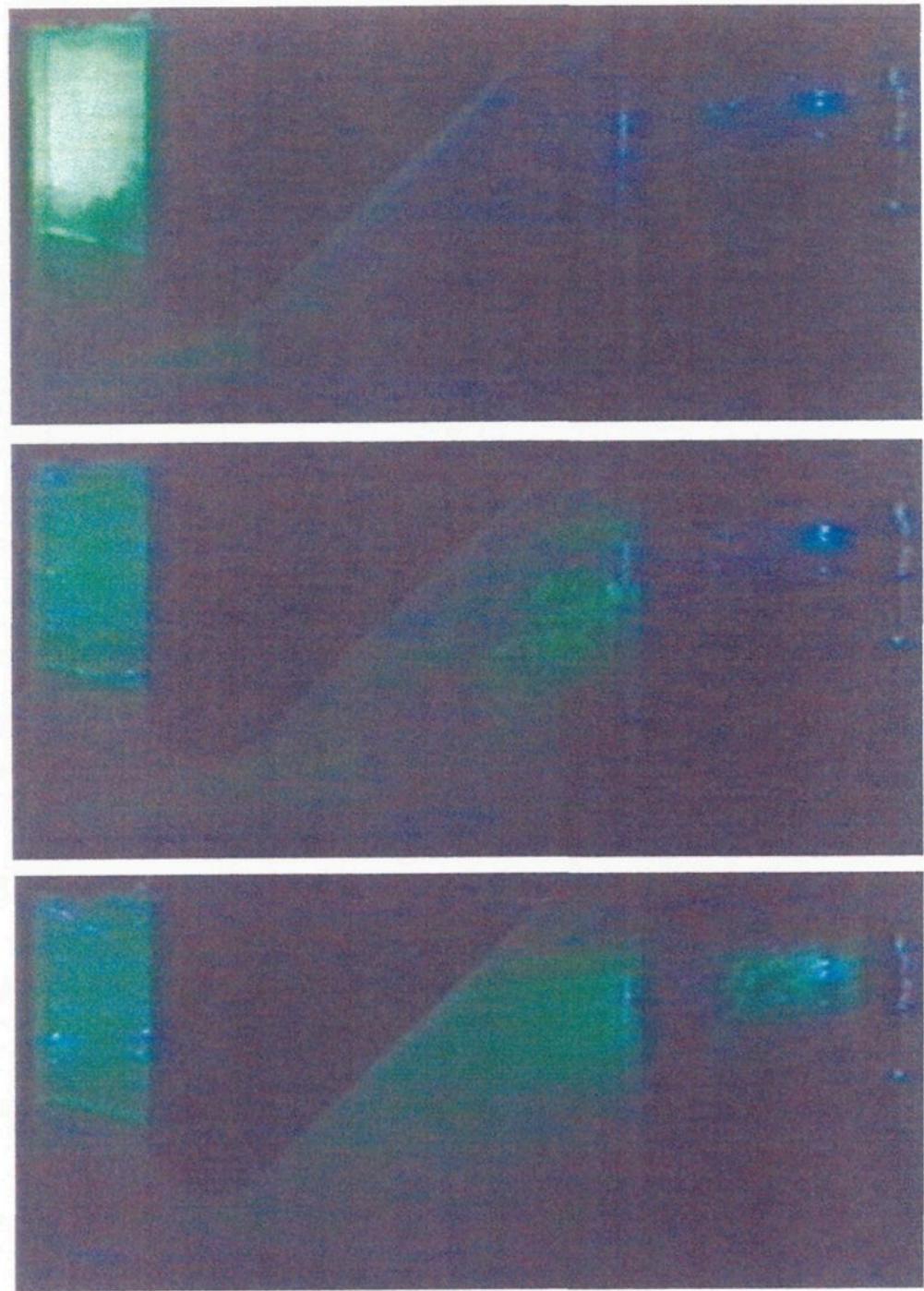
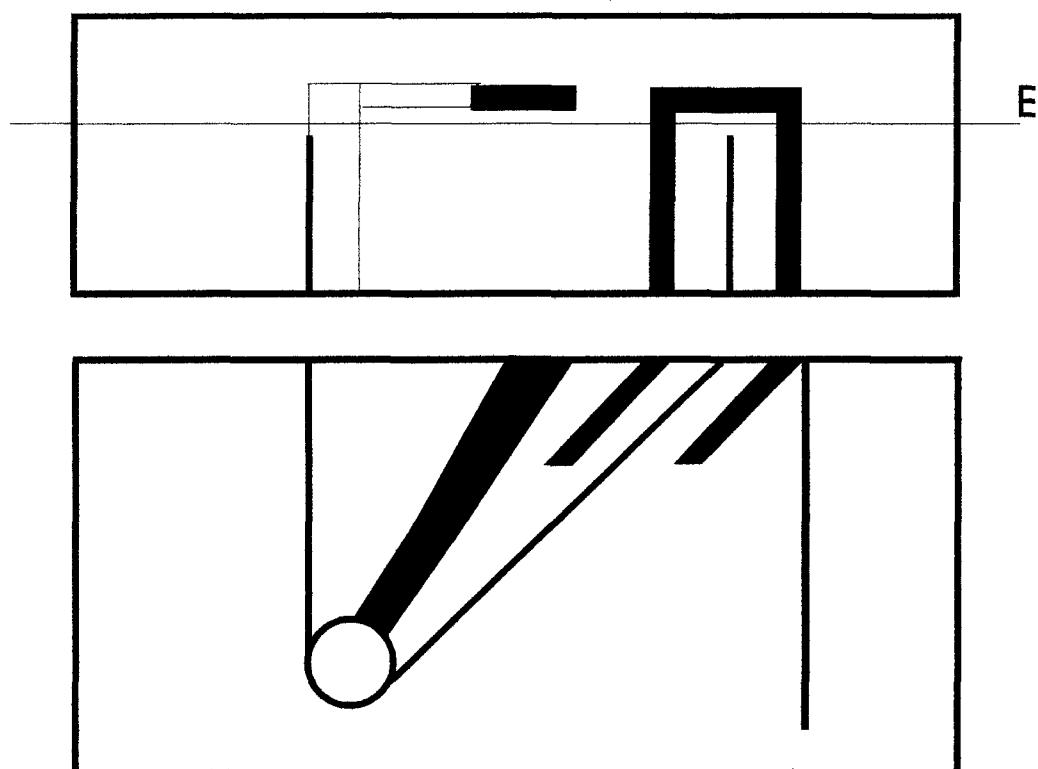


Figure 4.21 b) Visualisation au centre du bain (plan A) sans rouleau, avec plaque et un angle de courroie de 45° pour des temps de 8, 16 et 26 secondes après l'injection

POSITION DU PLAN E**DE LA FIGURE 4.22**

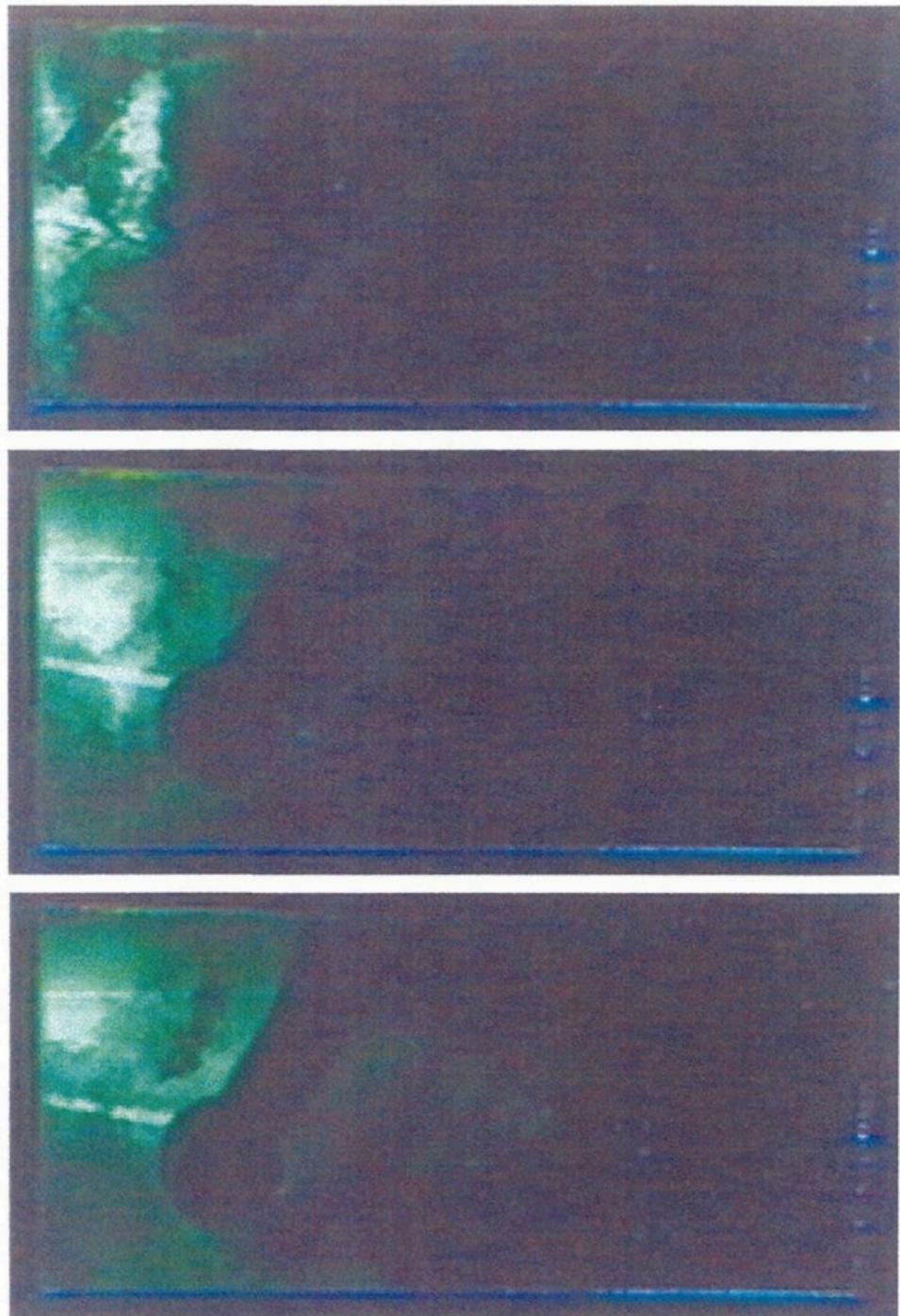


Figure 4.22 a) Visualisation entre la courroie et les bras (plan E) sans rouleau, avec plaque et un angle de 45° pour des temps de 3, 5 et 7 secondes après l'injection

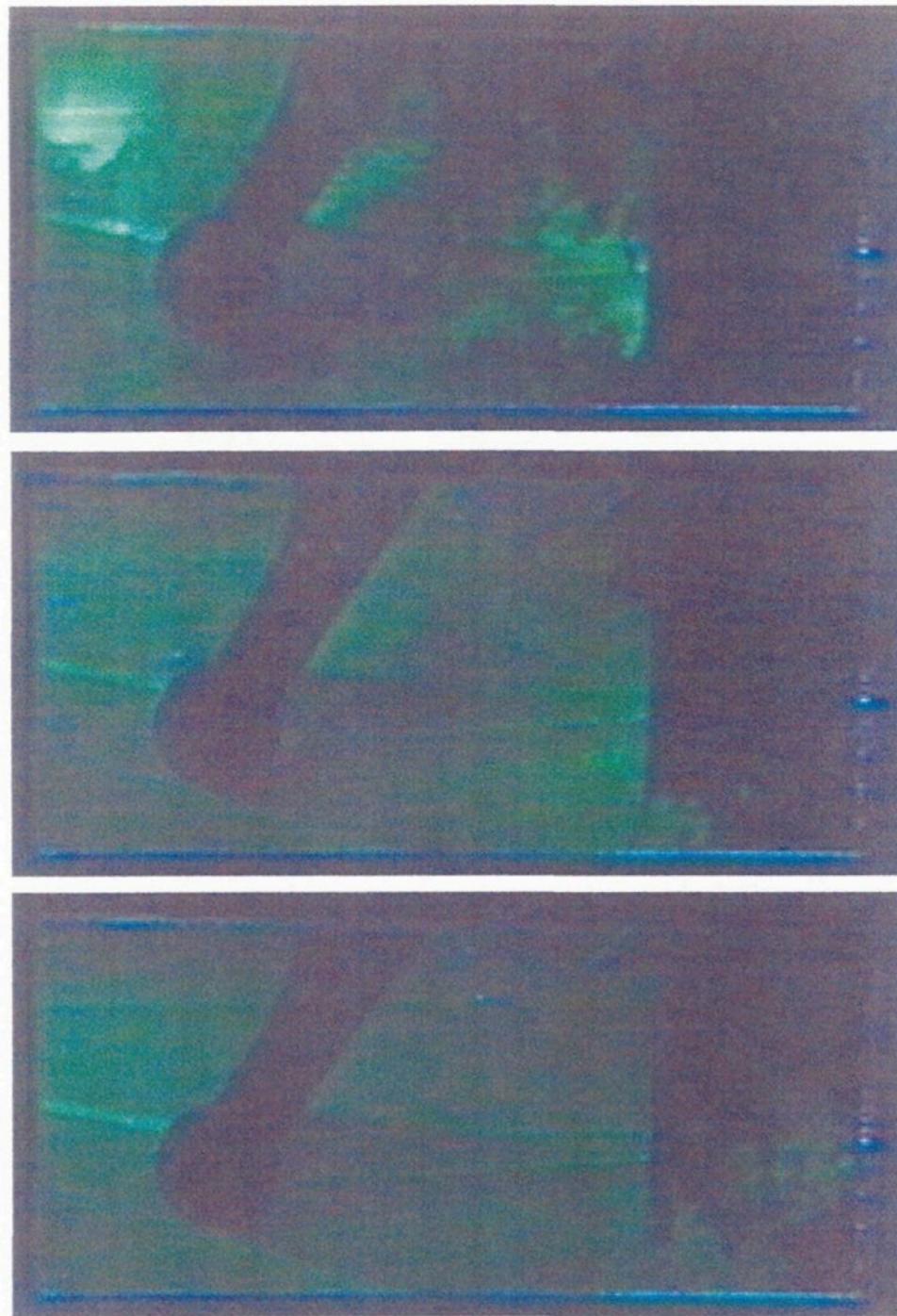
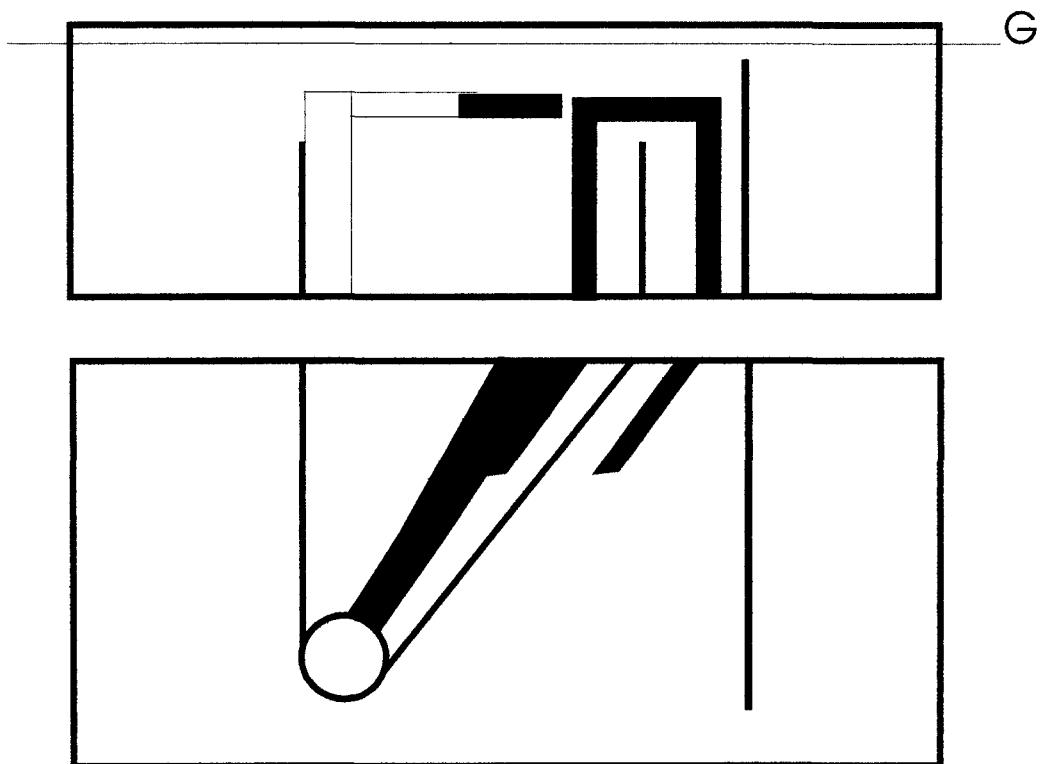


Figure 4.22 b) Visualisation entre la courroie et les bras (plan E) sans rouleau, avec plaque et un angle de 45° pour des temps de 10, 17 et 23 secondes après l'injection

**POSITION DU PLAN G
DE LA FIGURE 4.23**



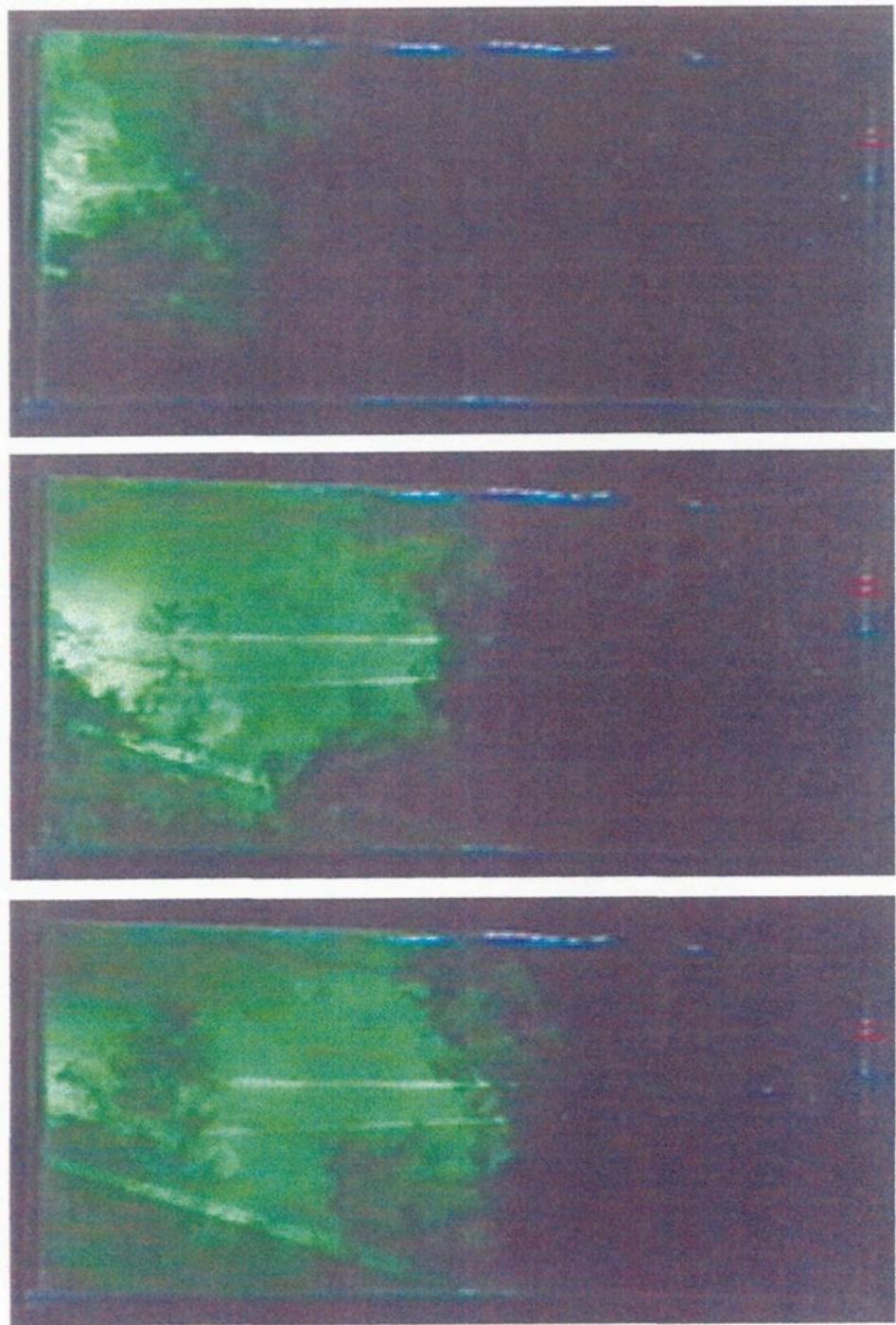


Figure 4.23 a) Visualisation près des parois (plan G), sans rouleau, avec plaque et un angle de 32° pour des temps de 4, 8 et 10 secondes après l'injection

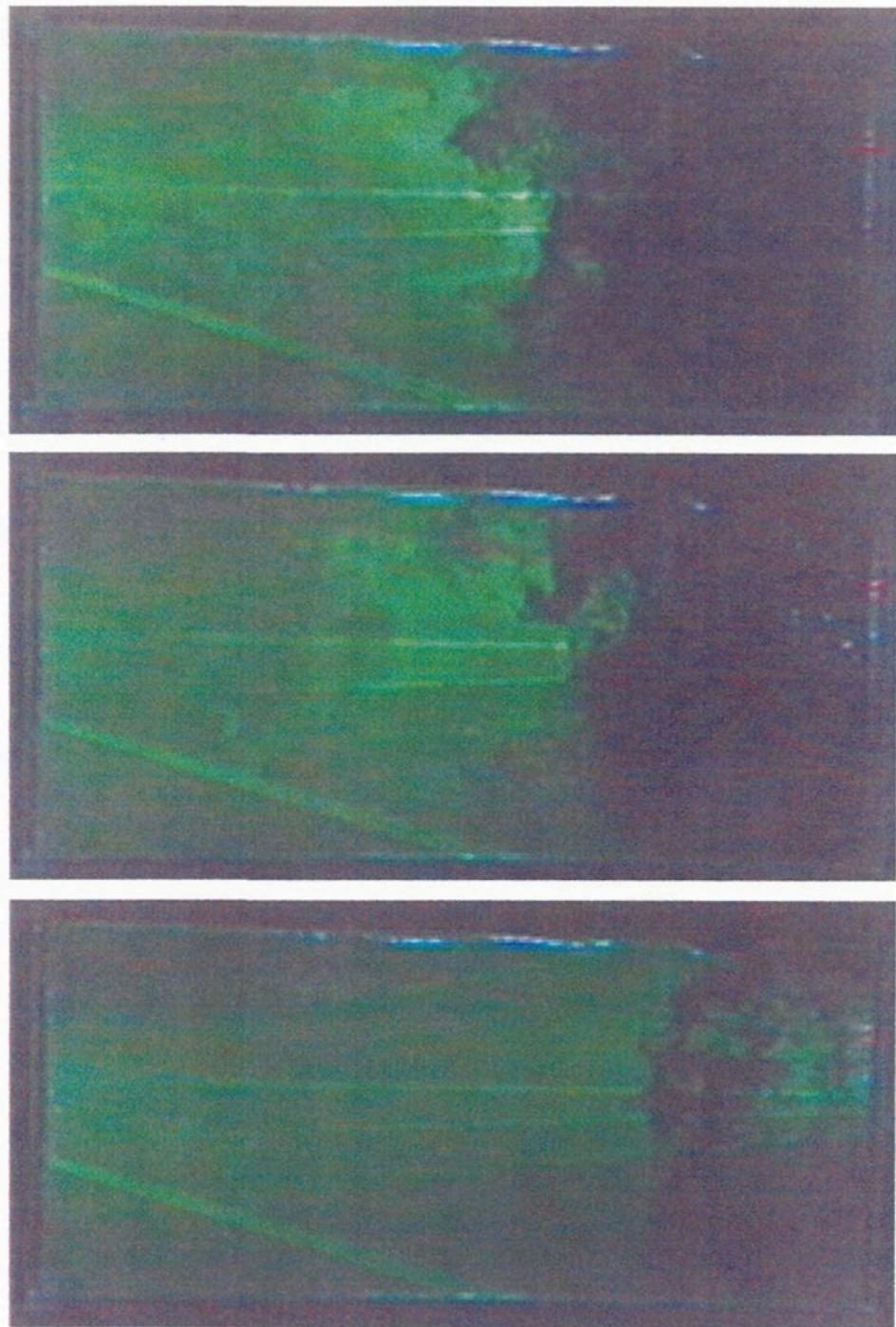
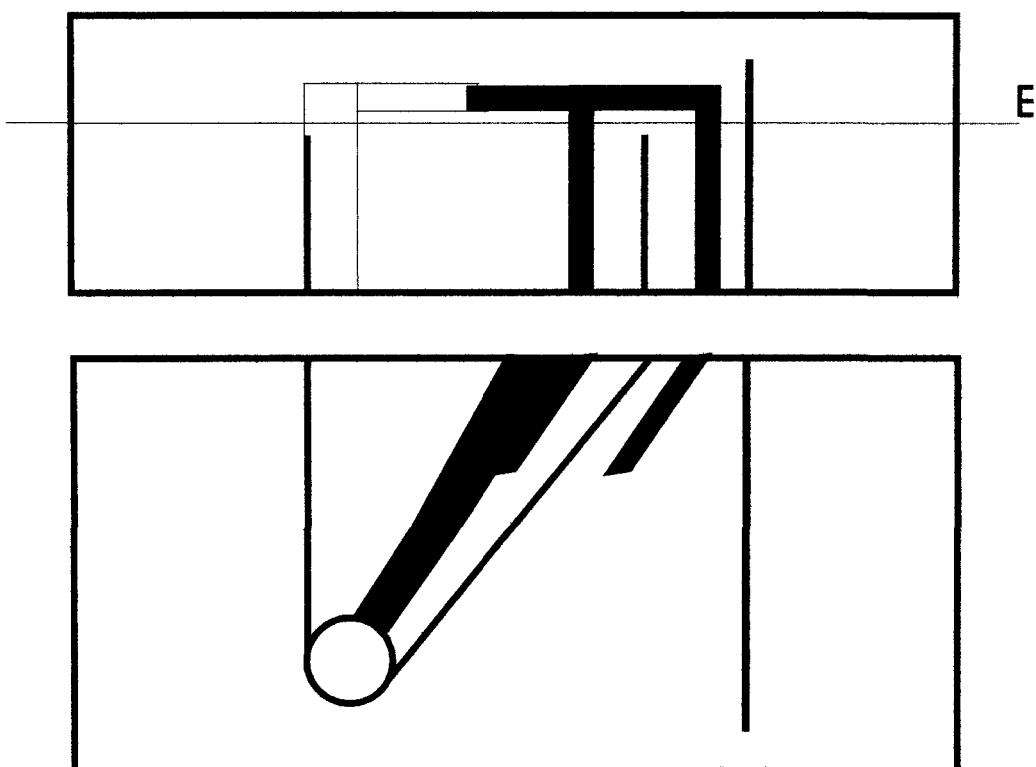


Figure 4.23 b) Visualisation près des parois (plan G), sans rouleau, avec plaque et un angle de 32° pour des temps de 13, 16 et 47 secondes après l'injection

4.1.1.6 Écoulement sans rouleau, angle de 32° avec plaque

L'écoulement avec plaque déflectrice, sans rouleau stabilisateur et avec un angle de courroie est un mélange de ceux qu'on observe sans rouleau / sans plaque / angle de 32° avec sans rouleau / avec plaque / angle de 45°. La figure 4.24 illustre cet écoulement. La zone arrière est isolée, et le traceur y apparaît en passant par le dessous de la plaque. Fait intéressant: le mouvement de rotation du fluide dans la zone arrière, à gauche de la plaque est bien perçu sur la première image de la figure 4.24 b. Un autre phénomène peut être observé sur la toute première image de la figure 4.24 a: le traceur a été injecté plus sur un des côtés de la courroie, ce qui entraîne cet effet de mouvement vers l'observateur.

POSITION DU PLAN E**DE LA FIGURE 4.24**

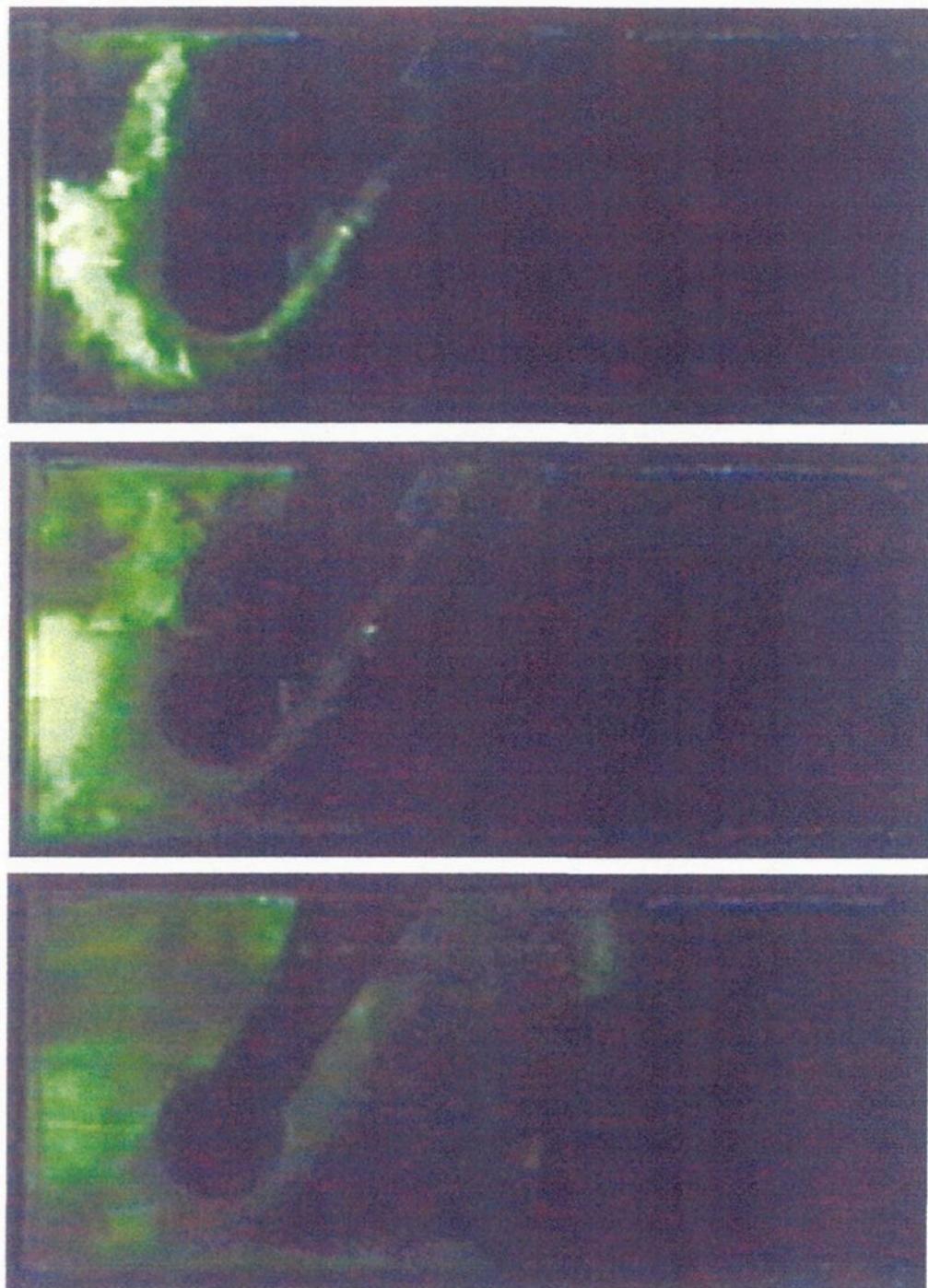


Figure 4.24 a) Visualisation entre la courroie et les bras (plan E) sans rouleau, avec plaque et un angle de 32° pour des temps de 3, 5 et 7 secondes après l'injection

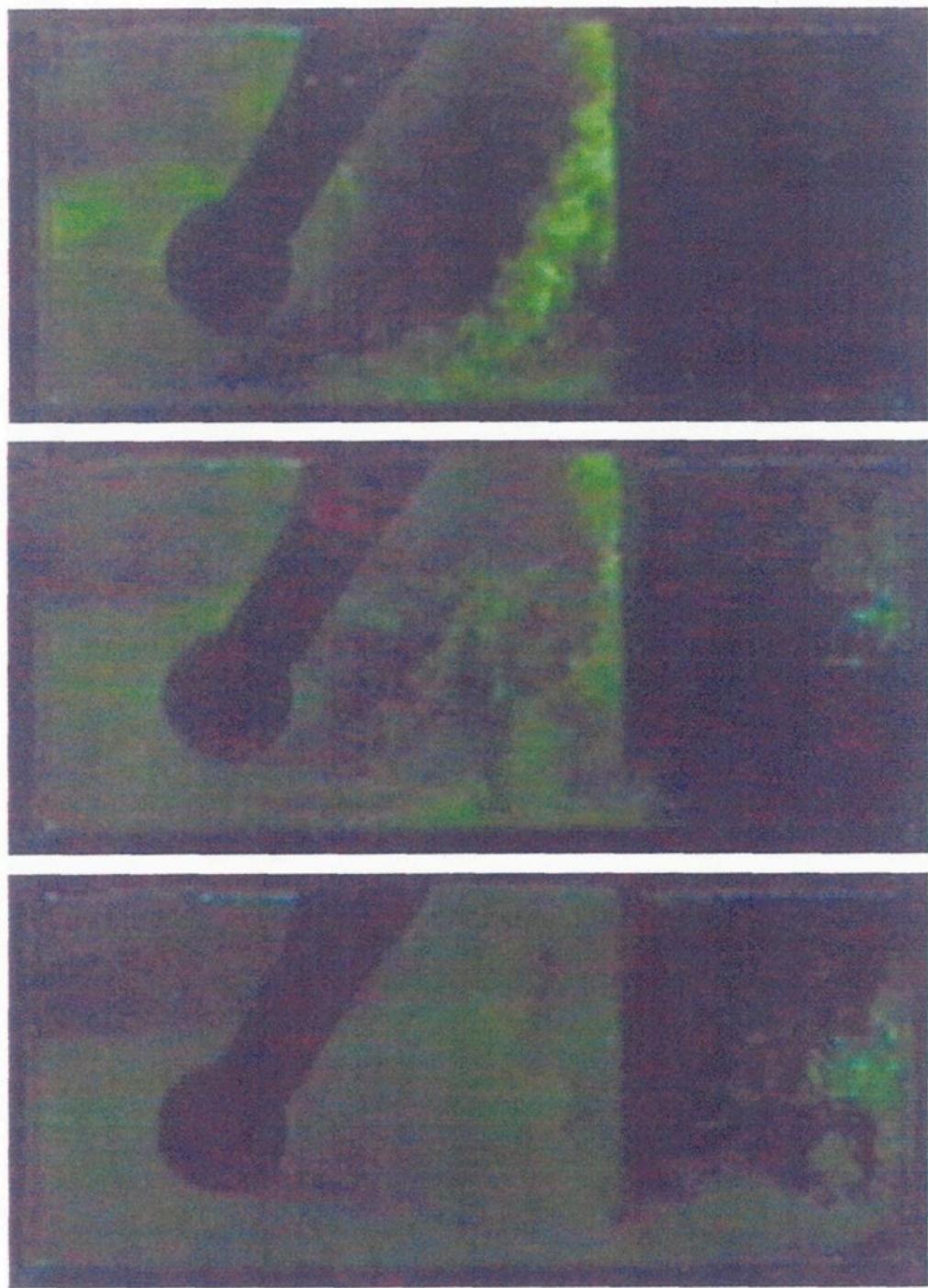


Figure 4.24 b) Visualisation entre la courroie et les bras (plan E) sans rouleau, avec plaque et un angle de 32° pour des temps de 10, 17 et 30 secondes après l'injection

4.1.1.7 Visualisation du retour de fluide au niveau des couteaux à air

La visualisation de la zone sous les couteaux à air a pour but de connaître l'effet de l'essuyage sur l'écoulement dans la cuve. Tout d'abord, si on étudie les équations 9 à 33 et la figure 2.39, on se rend compte assez rapidement que le flux de fluide retourné au bain est minuscule par rapport au volume total de fluide dans une cuve de galvanisation. En général, la comparaison des observations dans cette zone avec et sans couteau confirme l'absence de contribution significative de cet élément sur l'écoulement dans la cuve. Sans couteau, par contre, une vitesse de la feuille plus élevée entraîne une plus grande quantité d'eau avec la feuille et le ménisque qui se forme à la sortie de la feuille est plus grand à plus grande vitesse (figure 4.25).

Ainsi le fluide qui retourne dans la cuve ne devrait pas affecter l'ensemble de l'écoulement dans celle-ci. Cependant, l'air projeté à haute vitesse par les couteaux provoque une perturbation de la surface du bain. Cette perturbation est fonction de la position du couteau par rapport à la feuille sortante et à la surface du bain ainsi qu'à la vitesse de la feuille. La figure 4.26 montre la zone sous le couteau du montage, dans la section avant du bain, pour trois différentes hauteurs de couteau par rapport à la surface du bain. Pour une vitesse de 1.42 m/s de feuille, lorsque le couteau est le plus éloigné du bain (première image), la courbure de la surface est plus faible que lorsque le couteau est plus près de la surface (troisième image).

La figure 4.27 montre la zone de l'avant éclairée au laser et à la fluorescéine pour trois différentes distances du couteau par rapport à la feuille. Sur ces figures, la vitesse de la feuille est de 0.95 m/s. Il n'est pas possible, dans ce cas, d'observer une différence réelle quant à l'effet de la distance du couteau par rapport à la feuille. Cependant, pour des hauteurs de couteau plus réduites, une distance plus élevée entraîne plus d'éclaboussement d'eau.

La figure 4.28 montre encore la même section pour trois différentes vitesses de feuille. L'image du haut est celle prise pour la plus petite vitesse de feuille (0.54 m/s), et on voit que la courbure de la surface est prononcée et qu'il y a même de l'éclaboussement en haut à gauche. La même observation est faite pour la deuxième image, prise pour une vitesse de 0.95 m/s. La dernière image montre aussi une courbure de surface prononcée mais lors de ce test, il y avait moins d'éclaboussement.

Selon ces observations, la position du couteau par rapport au bain et à la feuille ainsi que la vitesse de celle-ci sont des paramètres qui affectent la courbure de la surface lorsqu'ils sont combinés sous certaines configurations et peuvent entraîner l'éclaboussement de l'eau à la sortie de la feuille. Ce fait est connu et en industrie, la position des couteaux, leur pression à l'entrée et l'ouverture du bec de ceux-ci (paramètres non étudié ici) sont ajustées par contrôle informatisé pour éviter l'éclaboussement en fonction de la vitesse de la feuille. Comme dans ce projet on

cherche à savoir si la présence des couteaux affecte l'écoulement sous la surface du bain, nous nous limiterons au cas où on ne rencontre pas d'éclaboussement. Ainsi, en observant la formation d'un ménisque à la surface pour un cas où il n'y a pas d'éclaboussement, il est possible de voir si l'écoulement est modifié sous la surface. Les figures 4.29 et 4.30 (a et b) montrent l'écoulement éclairé au laser avec injection de fluorescéine pour les cas avec et sans couteau. Sans couteau, la fluorescéine est entraînée par la feuille et une partie de celle-ci remonte avec la feuille alors que le reste est repoussé vers la gauche pour finalement retourner vers le bas en suivant la paroi. Avec un couteau (figure 4.30), la fluorescéine est beaucoup moins entraînée à la sortie du bain à cause de l'essuyage. Le traceur est alors majoritairement repoussé vers la gauche pour ensuite suivre le même cheminement que celui du cas sans couteau. Les observations de l'écoulement avec et sans couteau sont sensiblement les mêmes pour toutes les configurations étudiées.

Comme l'écoulement observé dans la maquette à eau correspond aux observations faites en industrie (voir figure 2.43) et que la présence de la courbure au bas de la surface n'affecte que très peu l'écoulement de la cuve, il est possible de dire que la présence des couteaux n'affecte pas de façon significative l'écoulement dans la cuve et qu'il est possible de négliger le retour de fluide dû à la présence des couteaux à air lors de la modélisation numérique du bain de galvanisation. La seule chose à tenir compte lors de la modélisation numérique est la présence d'une surface libre, qui reste constamment liquide, dans la région qui entoure la sortie de la feuille.

Cette zone est plus ou moins grande selon la position et la pression imposées aux couteaux, alors que le reste du bain est constamment solidifié. Ces observations confirment les conclusions d'un rapport interne fait pour l'ILZRO (Ajersch et Binet, 1997) qui indiquait que la présence des couteaux à air n'affectait pas de façon significative l'écoulement dans la cuve.



Figure 4.25 Effet de la vitesse de la feuille sur la formation du ménisque à la surface du bain, vitesses: 0.54, 0.95, 1.42 m/s

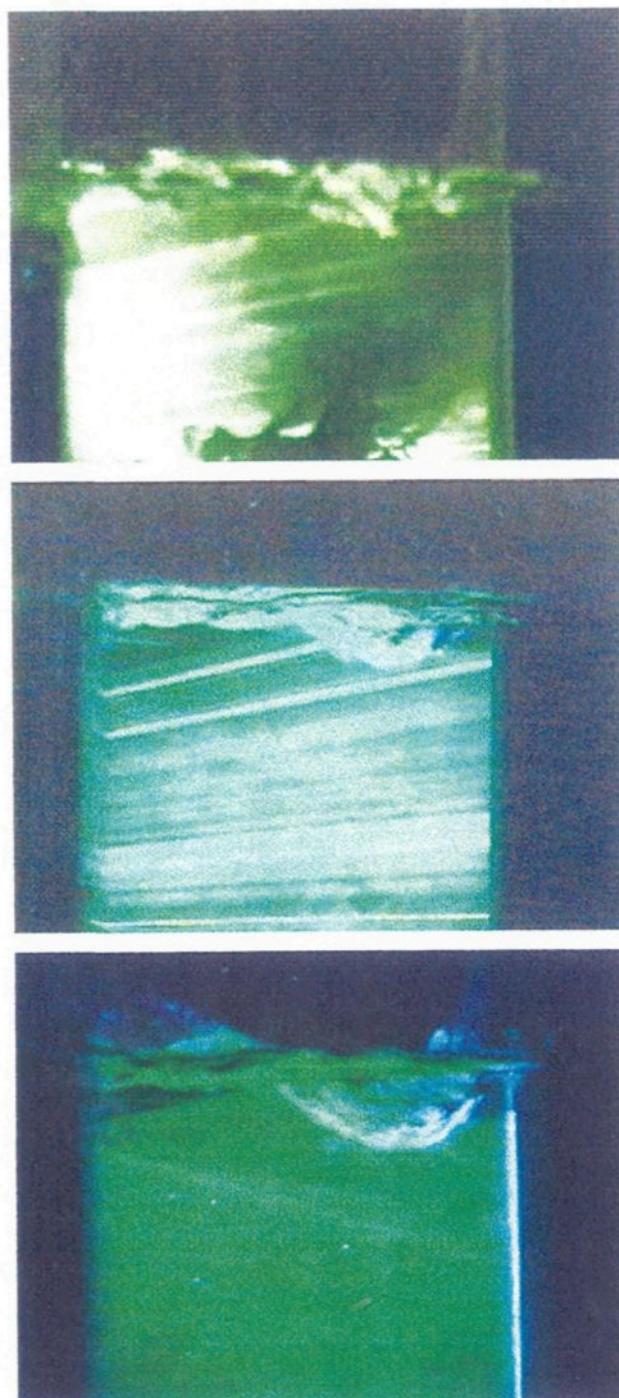


Figure 4.26 Effet de la hauteur du couteau par rapport à la surface (vitesse de la feuille: 1.42 m/s, distance: 1.8 cm), hauteurs: 17.8, 13.5, 8.5 cm

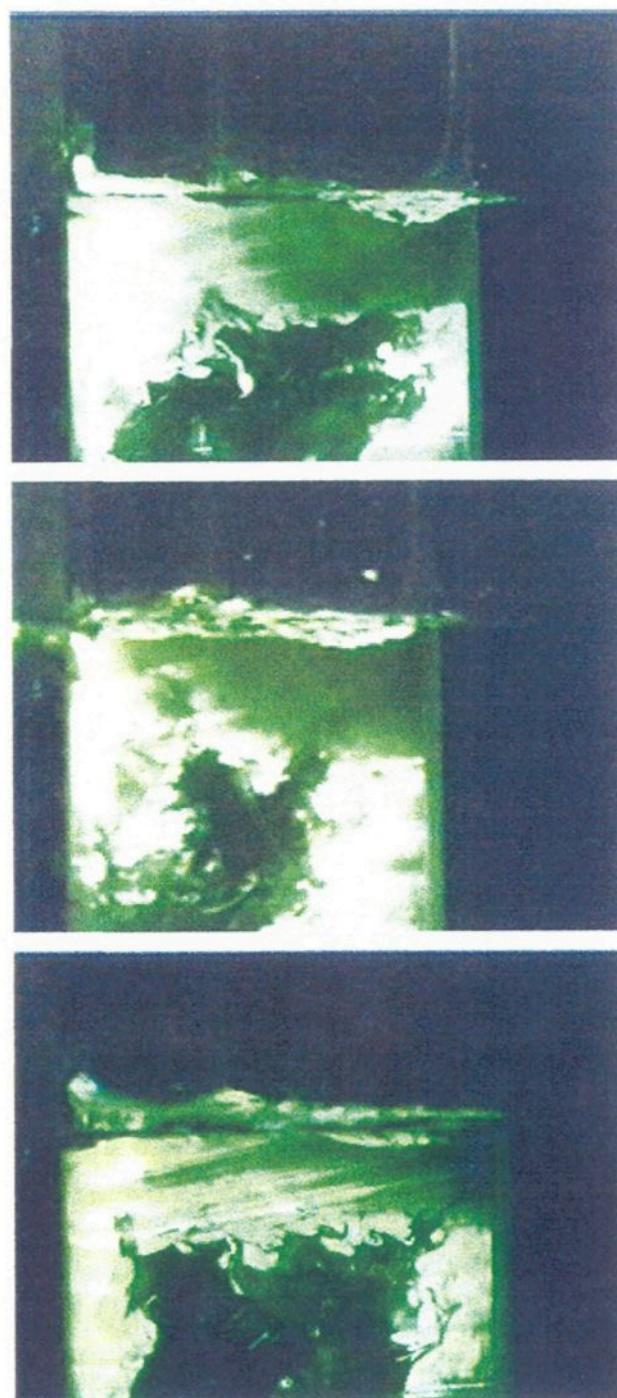


Figure 4.27 Effet de la distance du couteau par rapport à la feuille (vitesse de la feuille: 0.95 m/s, hauteur: 17.8 cm), distances: 0.75, 1.8, 2.6 cm

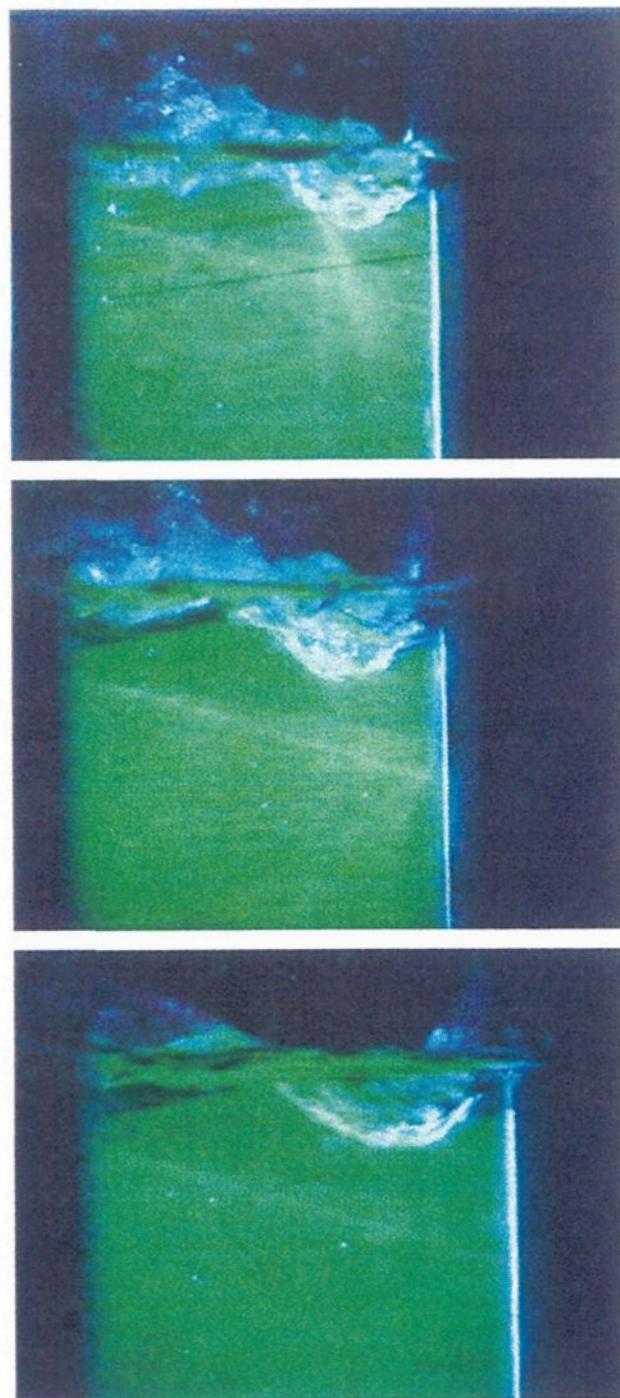


Figure 4.28 Effet de la vitesse de la feuille (hauteur: 8.5 cm, distance: 1.8 cm), vitesses de la feuille: 0.54, 0.95, 1.42 cm

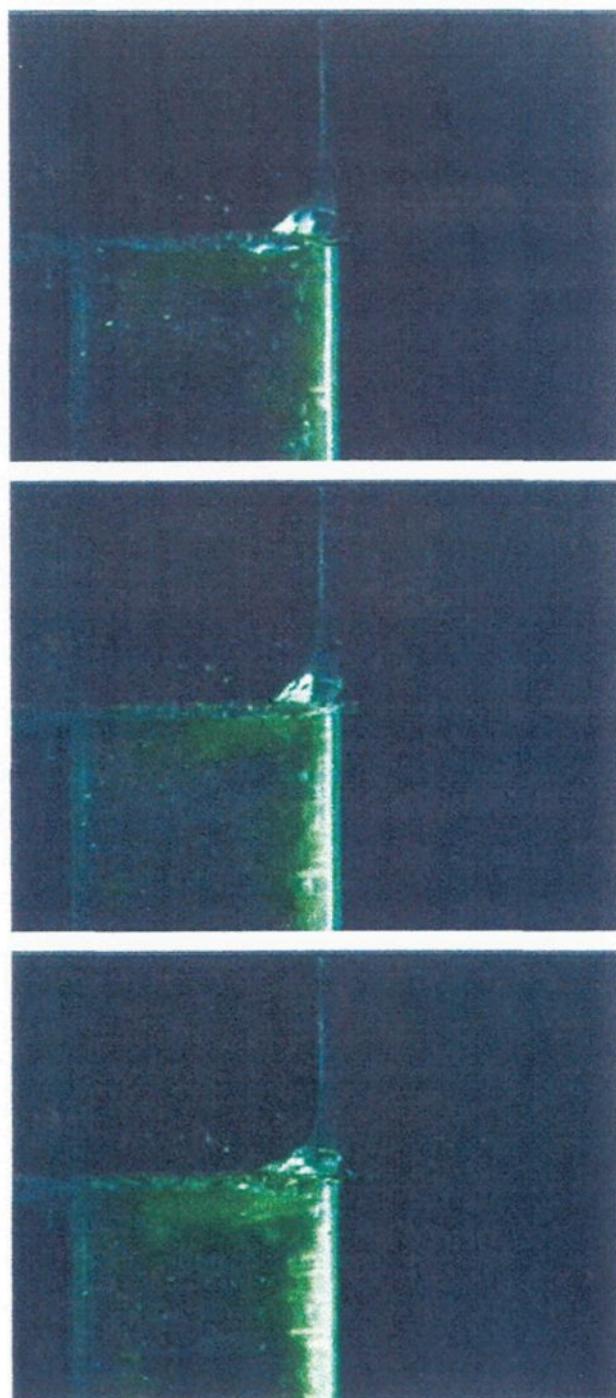


Figure 4.29 a) Visualisation de l'écoulement dans la zone de sortie de la feuille sans couteau (vitesse de la feuille: 1.42 m/s).

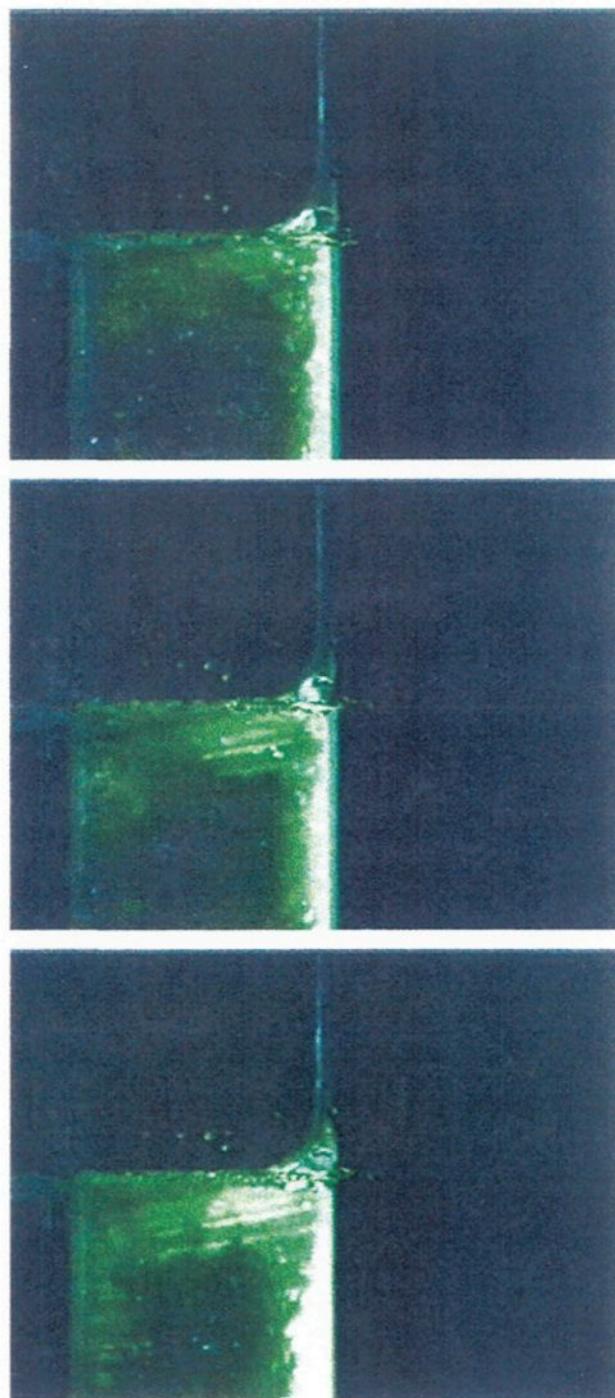


Figure 4.29 b) Visualisation de l'écoulement dans la zone de sortie de la feuille sans couteau (vitesse de la feuille: 1.42 m/s).

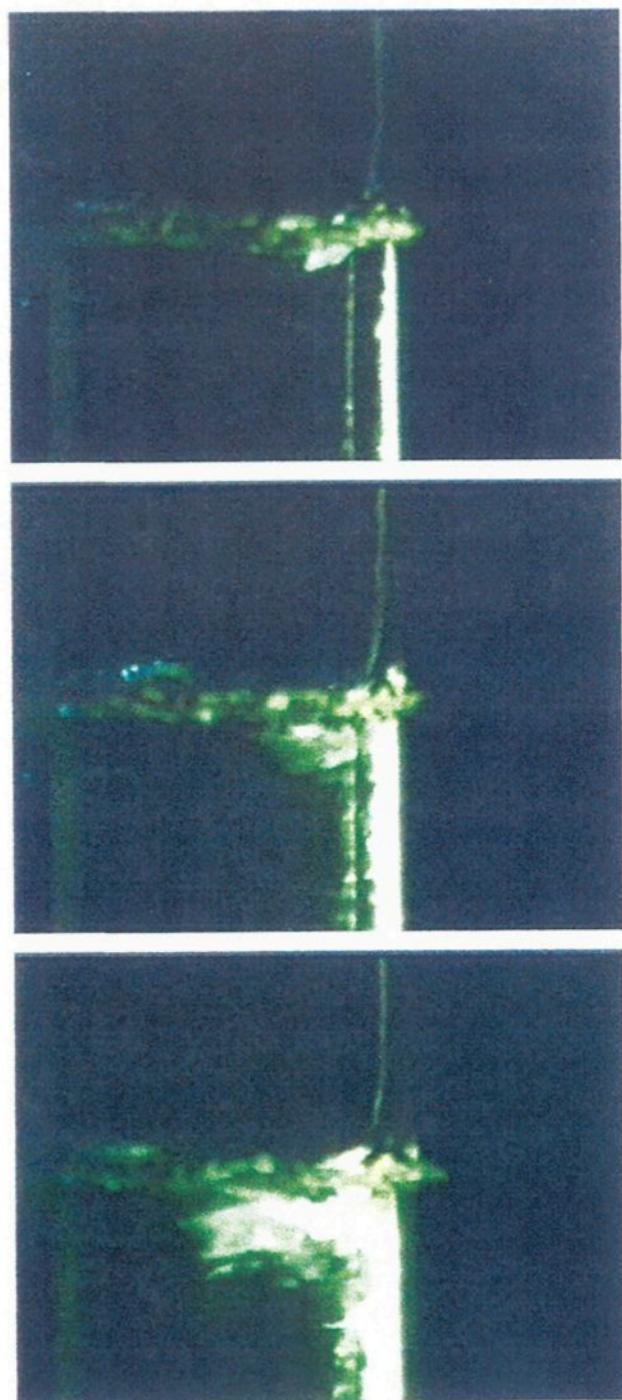


Figure 4.30 a) Visualisation de l'écoulement dans la zone de sortie de la feuille avec couteau (vitesse de la feuille: 1.42 m/s, hauteur: 18.5 cm, distance: 1.8 cm).

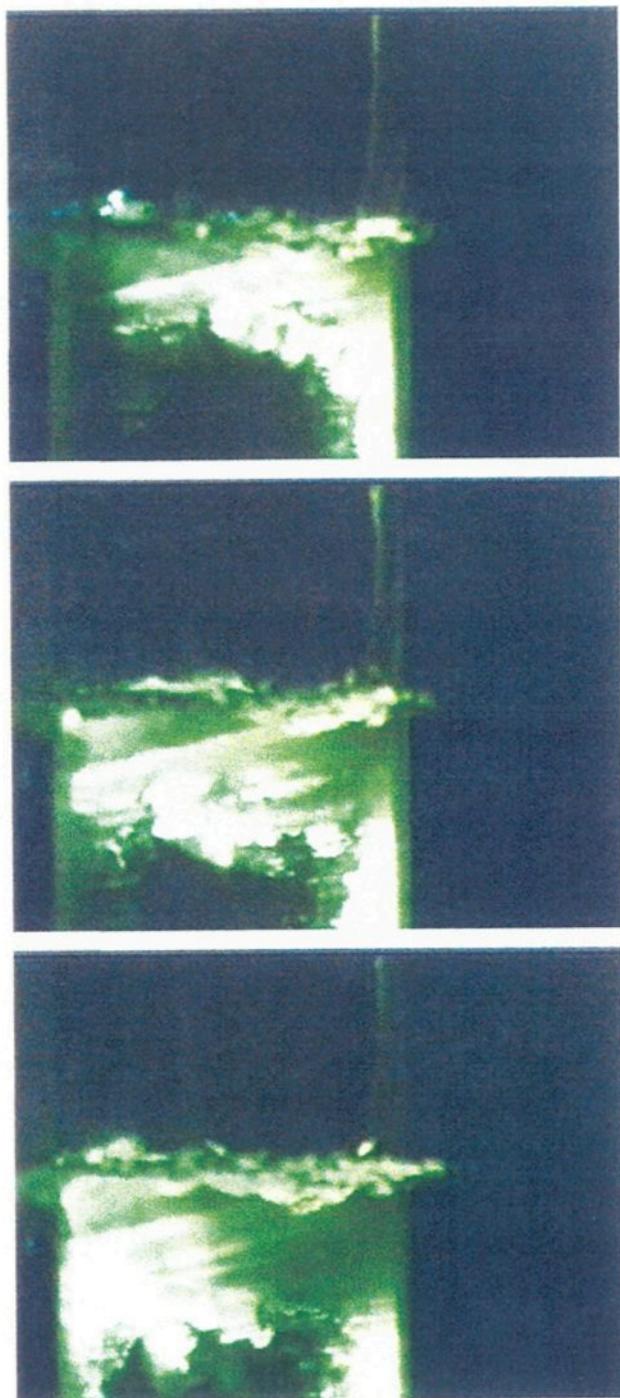


Figure 4.30 b) Visualisation de l'écoulement dans la zone de sortie de la feuille avec couteau (vitesse de la feuille: 1.42 m/s, hauteur: 18.5 cm, distance: 1.8 cm).

4.1.2 Temps de mélange de la cuve de galvanisation

Un des points importants dans la gestion du bain de galvanisation est le temps de mélange de l'aluminium dans la cuve de galvanisation lorsque celui-ci est ajouté au bain. Les essais de visualisation dans le bain permettent de connaître un temps de mélange de la fluorescéine pour le modèle à eau en fonction des différentes configurations de la cuve.

Ainsi, les temps de mélange pour chaque configuration du bain et pour chaque essai ont été compilés. Le temps de mélange complet du modèle à eau a été choisi comme étant celui où la concentration en fluorescéine semble complètement homogène à l'oeil. Le tableau 4.1 résume les résultats obtenus.

À premier abord, on aurait pu croire que le mélange le plus rapide se ferait dans un bain avec deux rouleaux. Étrangement, la configuration qui donne le meilleur temps de mélange est celle avec un angle de 45°, sans plaque mais avec un seul rouleau. Ce phénomène peut être expliqué par le fait que la présence de deux rouleaux stabilisateurs fait de sorte que le traceur qui est dispersé reste plus longtemps dans la section avant du bain et qu'il se rend moins facilement à l'arrière (figures 4.2 et 4.12). Il reste en quelque sorte pris par le mouvement des rouleaux, dans les sections de l'avant et du milieu. Par contre, avec un seul rouleau, le traceur se rend plus facilement à l'arrière tel que vu à la figure 4.15. Selon ces observations,

il est possible de dire qu'avec deux rouleaux, le mélange dans la zone où l'équipement en mouvement est situé est plus efficace, mais qu'à l'arrière, le mélange est moins bon, alors qu'avec un seul rouleau, l'arrière est mieux mélangé.

Tableau 4.1 Temps de mélange en fonction des différentes configurations du modèle à eau

Nombre de rouleaux	Plaque déflectrice	Angle de courroie	Couteau	Vitesse de feuille (m/s)	Temps de mélange (s)
2	non	45°	non	1,5	68
2	non	45°	non	0,83	89
1	non	45°	non	1,5	45
0	non	45°	non	1,5	51
0	non	32°	non	1,5	82
0	oui	45°	non	1,5	134
0	oui	32°	non	1,5	92
0	non	45°	non	0,54	84
0	non	45°	non	0,95	71
0	non	45°	non	1,42	54
0	non	45°	oui	0,54	96
0	non	45°	oui	0,95	79
0	non	45°	oui	1,42	59

Le deuxième temps de mélange le plus rapide est pour la configuration de bain sans rouleau, sans plaque et avec un angle de 45°. De la même manière que précédemment, le mélange à l'arrière joue un rôle important ici. Avec deux rouleaux, celui-ci est diminué, alors qu'avec un seul, il est favorisé, de même que dans le cas sans rouleau. Par contre, dans les configurations avec un rouleau et sans rouleau, le mélange à l'intérieur de la courroie est défavorisé. Les figures 4.10 et 4.20 montrent que le mélange est plus agité dans la section avec rouleaux que dans celle sans rouleaux, malgré la différence d'angle.

Lorsque l'angle de la courroie est plus aigu, le temps de mélange est augmenté. Encore une fois, le mélange dans la région arrière est responsable de cette augmentation du temps. Avec un angle plus prononcé, la section arrière est plus grande et l'agitation à cet endroit est très faible.

La présence d'une plaque déflectrice augmente sans conteste le temps de mélange. Celui-ci se retrouve pratiquement doublé. Ce fait s'explique par l'isolation de la région arrière. Par contre, la section gauche de la plaque est mélangée plus rapidement. En fait, ceci implique que si on diminue le volume du bain avec les mêmes grandeurs de rouleaux et de feuille, on obtiendra un mélange beaucoup plus efficace et rapide. La plaque déflectrice est certainement un ajout utile en galvanisation si on considère les deux points suivants: elle améliore la vitesse du mélange dans la section où sont contenus les appareillages et elle agit comme une

section de prémélange pour la fonte des lingots. La plaque est donc recommandée pour les industries qui ne possèdent pas de bain de préfonte de lingots. De plus, cette amélioration peut être apportée pour peu de frais.

Le temps de mélange avec plaque est meilleur lorsque l'angle de la courroie est de 32° . Ce phénomène est moins facile à expliquer. Il est possible qu'avec un angle de 45° le traceur est retourné vers la feuille plus facilement que pour le cas d'un angle de 32° . Ainsi, la section isolée de l'arrière reçoit moins efficacement le traceur dans le cas de l'angle plus évasé.

Évidemment, l'augmentation de la vitesse de la feuille diminue le temps de mélange de la fluorescéine au cours de la simulation de l'écoulement dans la maquette à eau. De plus, la présence du couteau augmente légèrement les temps de mélange aux mêmes vitesses de feuille. Ce fait est attribuable à la quantité de fluorescéine qui est entraînée hors du bain. Celle-ci, une fois sortie du bain, retourne dans la cuve pour être de nouveau disponible. Avec un couteau, le traceur est plus repoussé dans la section avant du bain, ce qui peut faire augmenter légèrement le temps de mélange.

4.1.3 Mesures de vitesse

Les nombreuses mesures de vitesse prises dans le modèle à eau à l'aide de la technique LDV seront présentées ici. Pour faciliter la validation du modèle numérique, ces mesures seront comparées avec les vitesses calculées par celui-ci, même si les modifications et résultats du modèle numérique sont présentés seulement à la section 4.2.

Les vitesses ont été mesurées dans le modèle à eau de la cuve de galvanisation avec deux rouleaux stabilisateurs, un angle de courroie de 45° sans plaque et avec une vitesse de feuille de 1.5 m/s ($Re \approx 10^5$). Les résultats de ces mesures de vitesse sont présentés sous forme de graphiques des composantes x, y et z de la vitesse le long de droites dans le bain, telles que vues à la figure 3.7. Sur chaque figure, on retrouve la grandeur de la vitesse adimensionnalisée à partir de la vitesse de la feuille selon:

$$v^* = \frac{v}{v_{feuille}} \quad (51)$$

Sur ces même graphiques, les vitesses adimensionnelles calculées du modèle numérique le long de ces mêmes droites ont été extraites et retracées. L'annexe B présente les données brutes calculées par le logiciel FIDAP.

Les mesures et calculs de vitesse sont présentés aux figures 4.31 à 4.51. Les positions des droites représentées dans ces figures sont identifiées en haut de chaque graphe d'après les axes y et z. Par exemple, $y = 0$ m est situé au bas du bain et $z = 0$ m est situé à la paroi extérieure du bain (au contact eau/plexiglass). Les coordonnées x correspondent à la longueur du bain où $x = 0$ m à l'avant du bain et la longueur totale du bain à eau est de 0.8 mètres (voir figure 3.8).

La figure 4.31 montre les calculs et les mesures des composantes x et y de la vitesse pour une droite se situant sous le rouleau dans le modèle à eau et au centre du bain. À cette même position, la droite croise le rouleau principal dans le modèle numérique. Les deux courbes présentent la même allure générale, bien que l'amortissement subi par les vitesses dans le modèle à eau soit plus important. De la même manière, la figure 4.32 montre les composantes de la vitesse au centre du bain en profondeur, mais à 12.5 cm en hauteur. À cet endroit, la droite où les vitesses ont été mesurées, coupe la feuille. À la coordonnée $y = 0.11$ m, la feuille verticale est rencontrée ($v_x^* = 0$ et $v_y^* = 1$) et à la coordonnée $y = 0.26$ m, le côté de la feuille à 45° est croisé. Les profils se ressemblent ici aussi, bien que les pentes des profils de vitesse mesurés près de la feuille à 45° soient plus abruptes.

À la même profondeur, mais à la hauteur de 0.18 m, on observe le même phénomène (figure 4.33). Certaines des mesures de vitesse à l'endroit où cette droite traverse le bain n'ont pu être rapportées car les rouleaux et les bras de ceux-ci

nuisaient aux mesures. Les vitesses dans la direction y à l'arrière du bain étaient difficiles à prendre à cause de l'écoulement rotatif à cet endroit et aussi à cause de leur valeur très faible. La figure 4.34 illustre les vitesses à une position y de 0.225 m et les mêmes remarques sont applicables ici. À noter que le profil de vitesse mesuré près de la feuille est beaucoup plus abrupt que précédemment. La région où passe cette droite est d'ailleurs très turbulente.

Les figures 4.35 et 4.36 montrent les vitesses mesurées sur des droites se situant à 0.30 m et 0.345 m respectivement. Sur ces figures, seulement la vitesse dans la direction x a pu être mesurée. Plus on se rapproche de la surface du bain, plus la composante y de la vitesse était faible et difficile à mesurer. Tout près de la surface, celle-ci était pratiquement nulle.

La deuxième série de figures rapporte les mesures de vitesse effectuées sur une droite située à 0.125 m de la profondeur du bain à eau. Les profils de vitesse observés sur les figures 4.37 à 4.42 ressemblent beaucoup à ceux des figures 4.31 à 4.36. Quelques différences sont parfois observables au niveau de la pente du profil de vitesse près de la feuille (par exemple, en comparant les figures 4.34 et 4.40). Ces observations permettent de dire que les grandeurs et directions du profil de vitesse dans le sens de la profondeur varient peu, tant et autant qu'on se trouve dans la région où les rouleaux et la feuille se situent. Aussitôt qu'on se retrouve dans la zone où ceux-ci sont absents, le profil de l'écoulement change.

D'ailleurs, les figures 4.43 à 4.48 présentent des mesures de vitesse faites près de la paroi du bain en profondeur (0.06 m de la paroi). Ici, il était très difficile d'obtenir des mesures de vitesse dans la direction y à cause de la prédominance de la vitesse en x , particulièrement lorsque la grandeur de celle-ci était très faible (figures 4.46, 4.47 et 4.48). Néanmoins, Les profils calculés et mesurés se ressemblent malgré le fait que les vitesses mesurées sont plus faibles dans l'ensemble.

Les figures 4.49 à 4.51 illustrent les quelques vitesses dans le sens de la profondeur du bain prises à l'aide de la technique LDV. Malheureusement, les mesures de vitesse dans la direction des z étaient très difficiles. La composante z des vecteurs de la vitesse était souvent très faible et d'un ordre de grandeur plus petit par rapport aux composantes x et y . Les changements d'orientation dans la vitesse en z sont aussi fréquents ce qui contribue à noyer les signaux laser. De plus, pour pouvoir effectuer les mesures dans le sens de l'axe z , le faisceau devait être placé face à l'avant où à l'arrière du bain, ce qui implique que le faisceau doit traverser une plus grande épaisseur d'eau et que la réception du signal en est amoindrie. Pour la même raison de positionnement du laser, les mesures de vitesse en z n'ont pas pu être prises au centre du bain. Les composantes de vitesse en z prises dans la maquette à eau et rapportées aux figures 4.49 à 4.51 sont très faibles. À noter sur ces figures les nombreux changements d'orientation de composantes z calculées pas le modèle numérique.

D'après les figures 4.31 à 4.51, le modèle numérique représente assez bien l'écoulement dans le bain. Pour que le modèle numérique donne une meilleure représentation de l'écoulement mesuré dans le modèle à eau, il serait nécessaire de mailler plus densément près des zones de grands mouvements (près des rouleaux et de la feuille) et d'utiliser un modèle de turbulence qui tient compte d'un changement rapide de vitesse aux couches limites, près des zones solides en mouvement.

4.1.4 Calculs de turbulence

À l'aide des formules 40 à 47, les valeurs de v'_x , v'_y et de $\overline{v'_x v'_y}$ ont été calculées à partir des vitesses mesurées. Les courbes des figures 4.37, 4.31, 4.32 et 4.34 ont été choisies pour les calculs de facteurs de turbulence car celles-ci sont représentatives de l'écoulement et elles comportent suffisamment de mesures. Les valeurs des facteurs de turbulence sont présentées sous forme de courbes aux figures 4.52 à 4.55. De la même manière que pour les mesures de vitesse, ces figures sont illustrées suivant une droite dans le bain à eau.

Les figures 4.52 et 4.53 montrent les facteurs de turbulence pour des droites qui passent sous le rouleau principal, pour des positions en z à 12.5 cm et au centre du bain, respectivement. La turbulence, dans cette région, est plus élevée dans la zone se situant près du rouleau principal. À l'arrière du bain, celle-ci est beaucoup plus faible. Les valeurs des indices de turbulence suivent les profils de vitesse.

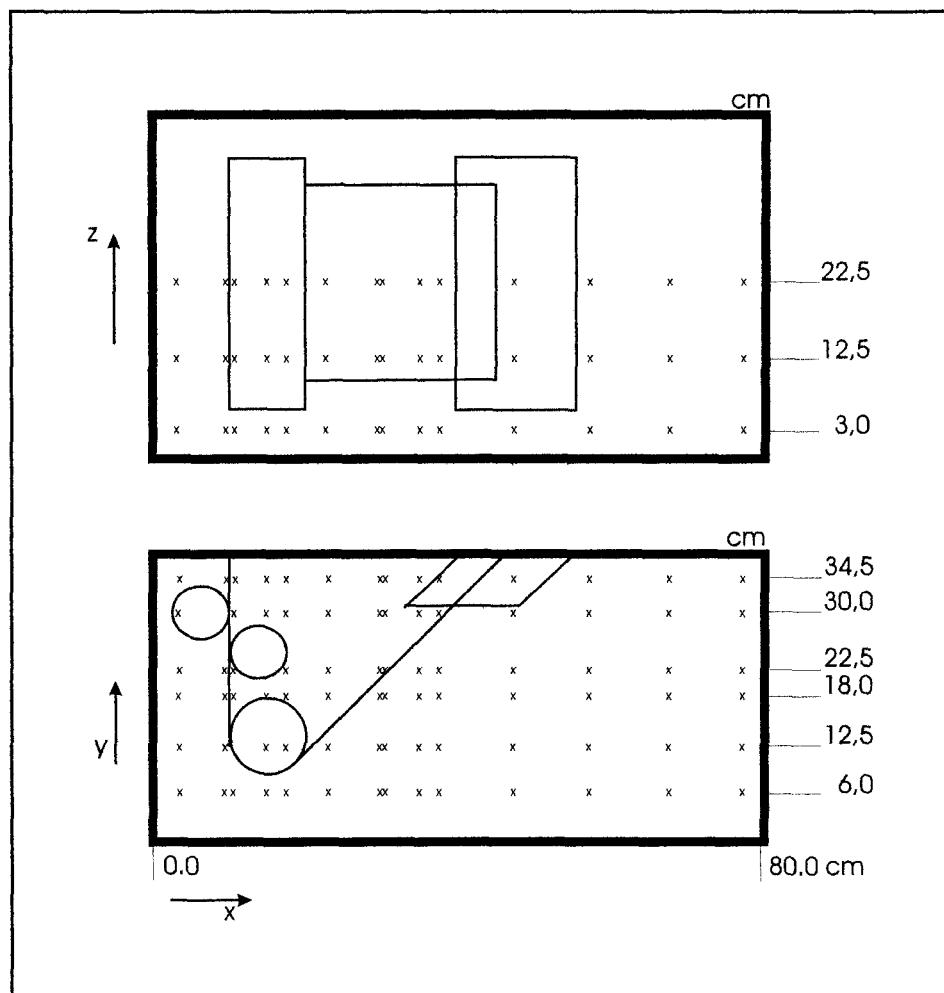
La figure 4.54 montre les facteurs de turbulence pour une droite passant au centre du bain en profondeur et à 12.5 cm en hauteur. La turbulence est plus élevée aux endroits se situant près de la feuille et des rouleaux ainsi qu'au centre du bain. Sur cette figure, la valeur de $\overline{v'_x v'_y}$ est plus élevée d'un facteur d'au moins 10, même si on ne considère pas le point qui est plus grand que $1200 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}^2$.

La figure 4.55 montre les facteurs de turbulence pour une droite passant au centre du bain, qui traverse les rouleaux et la feuille. La turbulence est aussi plus élevée dans cette région que dans le bas du bain. De plus, on voit que la zone où se trouve la feuille à 45° entraîne une augmentation de la turbulence par rapport aux figures 4.52 et 4.53. La turbulence dans cette région semble néanmoins moins élevée que dans la section montrée à la figure 4.54. Probablement, dans la zone centrale l'écoulement est moins turbulent que dans la zone à 12.5 cm en z car, à cet endroit, le fluide a tendance à entrer au centre du bain et ce mouvement contribue à déstabiliser l'écoulement.

À partir de ces calculs de turbulence, il est possible de voir que l'écoulement dans le bain est turbulent près des zones de grands mouvements, c'est-à-dire près de la feuille et des rouleaux. Il est donc important pour obtenir une modélisation adéquate de l'écoulement d'une cuve de galvanisation d'utiliser un modèle de turbulence adéquat (par exemple, un modèle k/ϵ pourrait être approprié). De plus, il faut aussi considérer qu'aussitôt qu'on s'éloigne de ces zones, le mouvement du

fluide est nettement amoindri. Il est alors important de tenir compte du fait qu'il est possible que l'écoulement soit laminaire dans ces régions. Il existe dans certains logiciels des utilités qui permettent de ne pas calculer la turbulence lorsque le nombre de Reynolds local ne dépasse pas une grandeur prédéterminée.

POSITION DES MESURES DE VITESSES



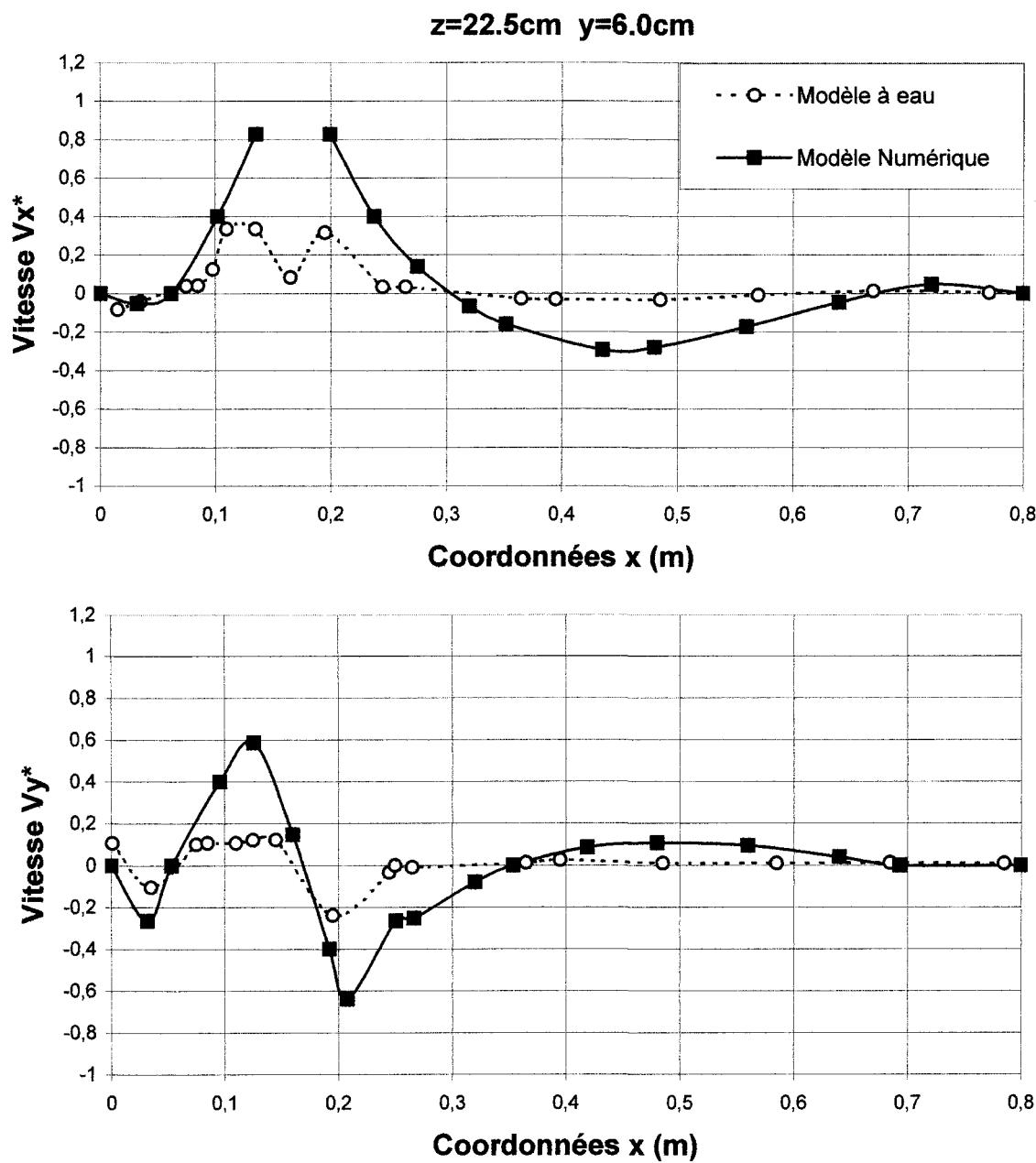


Figure 4.31 Comparaison des composantes x et y des vitesses adimensionnelles mesurées et calculées le long d'une droite passant à $y=0.06\text{m}$, $z=0.225\text{m}$ ($V_{\text{feuille}}=1,5\text{m/s}$, $Re=10^5$)

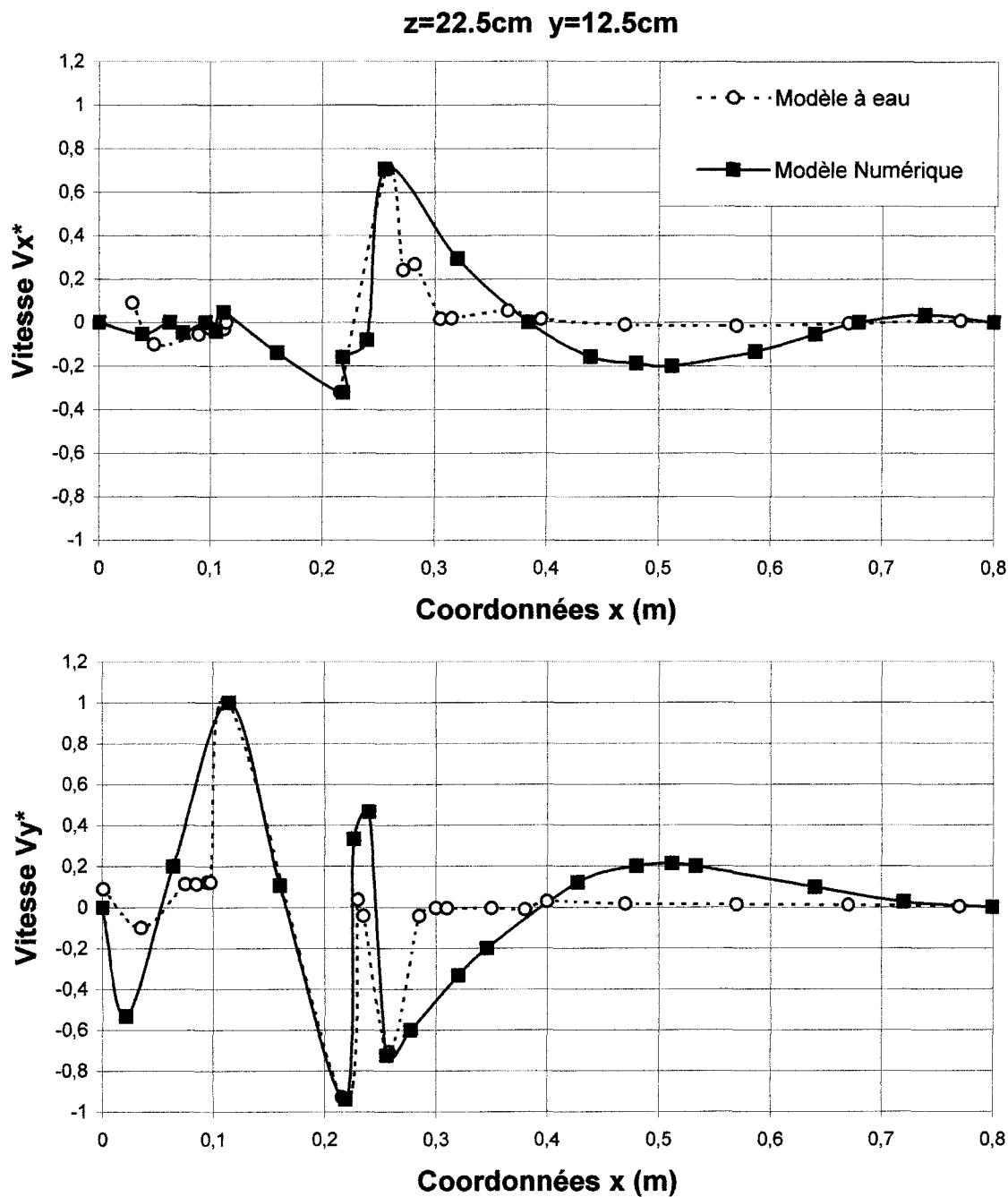


Figure 4.32 Comparaison des composantes x et y des vitesses adimensionnelles mesurées et calculées le long d'une droite passant à $y=0.125\text{m}$, $z=0.225\text{m}$ ($V_{\text{feuille}}=1,5\text{m/s}$, $\text{Re}=10^5$)

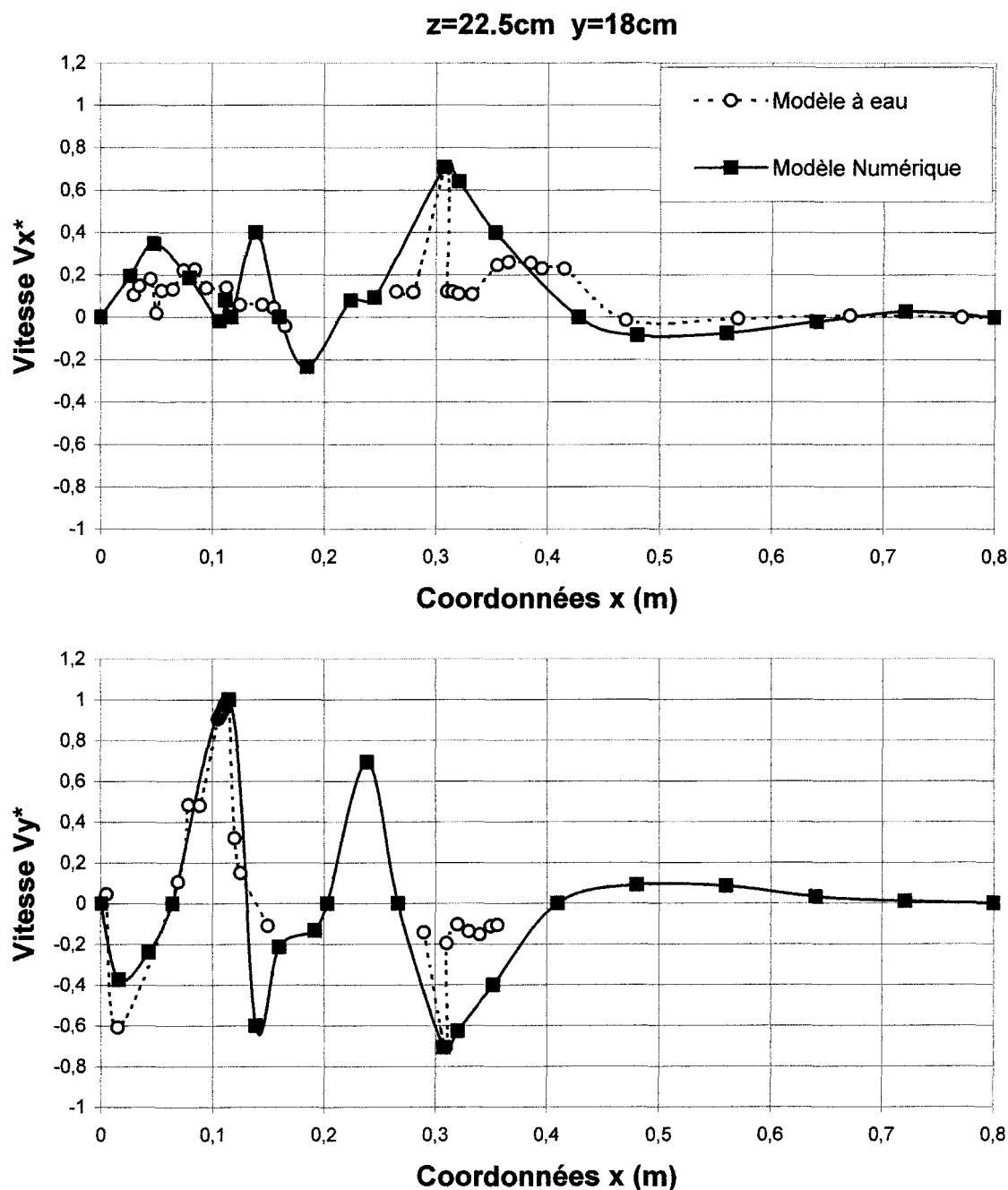


Figure 4.33 Comparaison des composantes x et y des vitesses adimensionnelles mesurées et calculées le long d'une droite passant à $y=0.18\text{m}$, $z=0.225\text{m}$ ($V_{\text{feuille}}=1,5\text{m/s}$, $\text{Re}=10^5$)

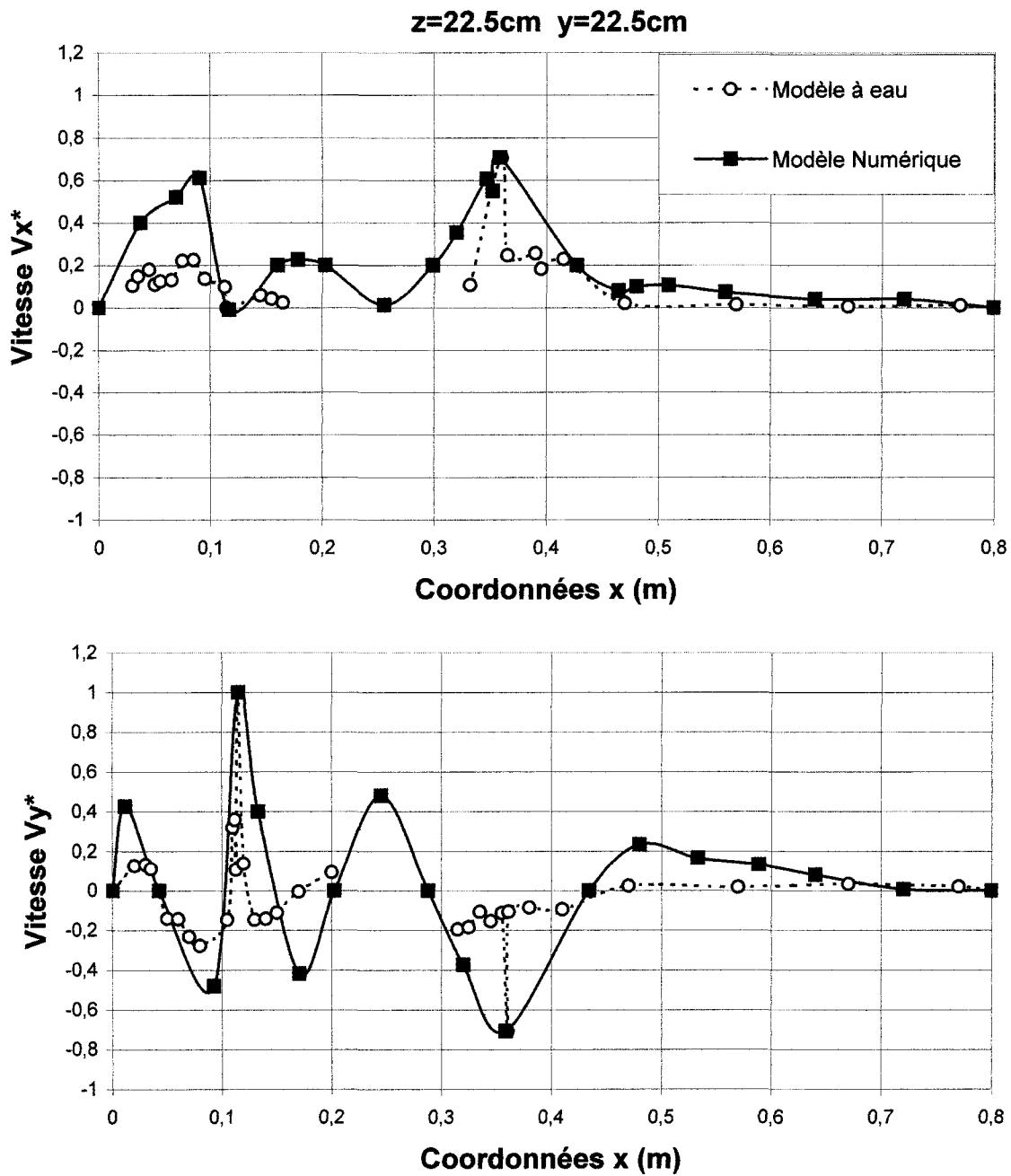


Figure 4.34 Comparaison des composantes x et y des vitesses adimensionnelles mesurées et calculées le long d'une droite passant à $y=0.225\text{m}$, $z=0.225\text{m}$ ($V_{\text{feuille}}=1,5\text{m/s}$, $\text{Re}=10^5$)

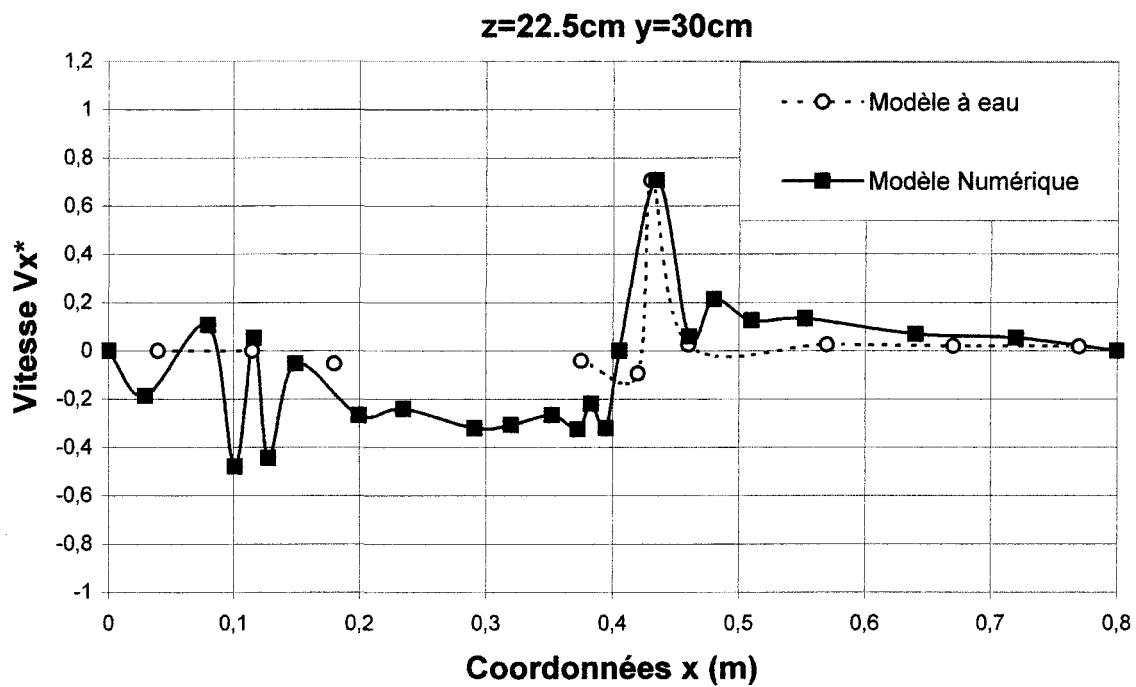


Figure 4.35 Comparaison des composantes x et y des vitesses adimensionnelles mesurées et calculées le long d'une droite passant à $y=0.30\text{m}$, $z=0.225\text{m}$ ($V_{\text{feuille}}=1,5\text{m/s}$, $\text{Re}=10^5$)

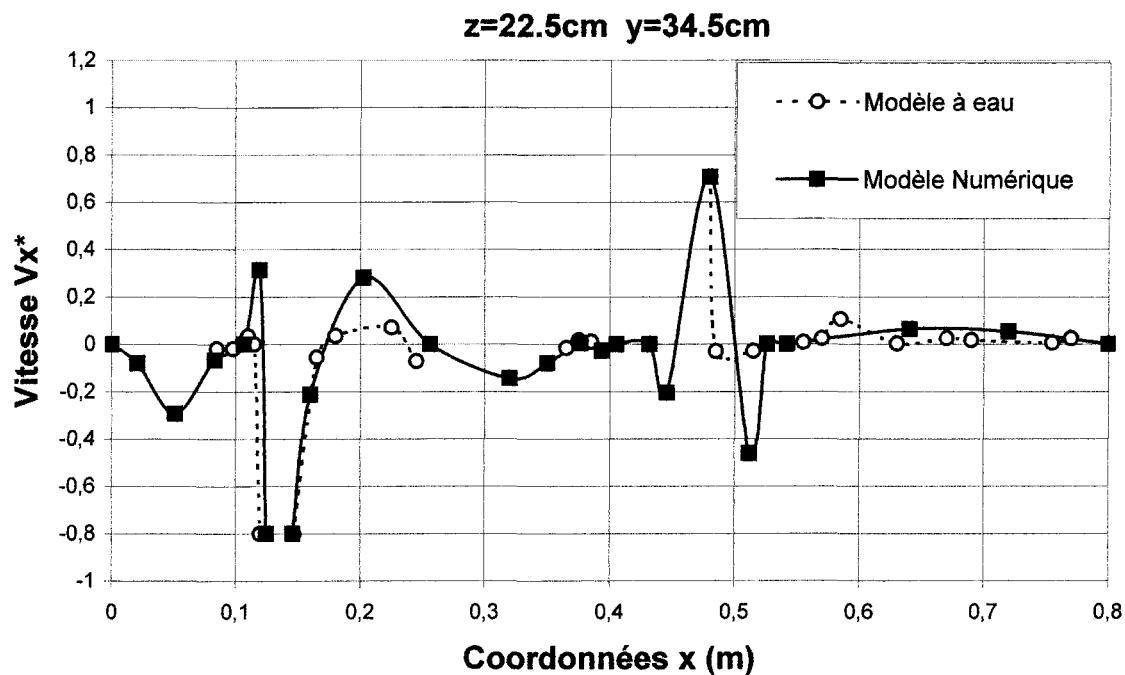


Figure 4.36 Comparaison des composantes x et y des vitesses adimensionnelles mesurées et calculées le long d'une droite passant à $y=0.345\text{m}$, $z=0.225\text{m}$ ($V_{\text{feuille}}=1,5\text{m/s}$, $\text{Re}=10^5$)

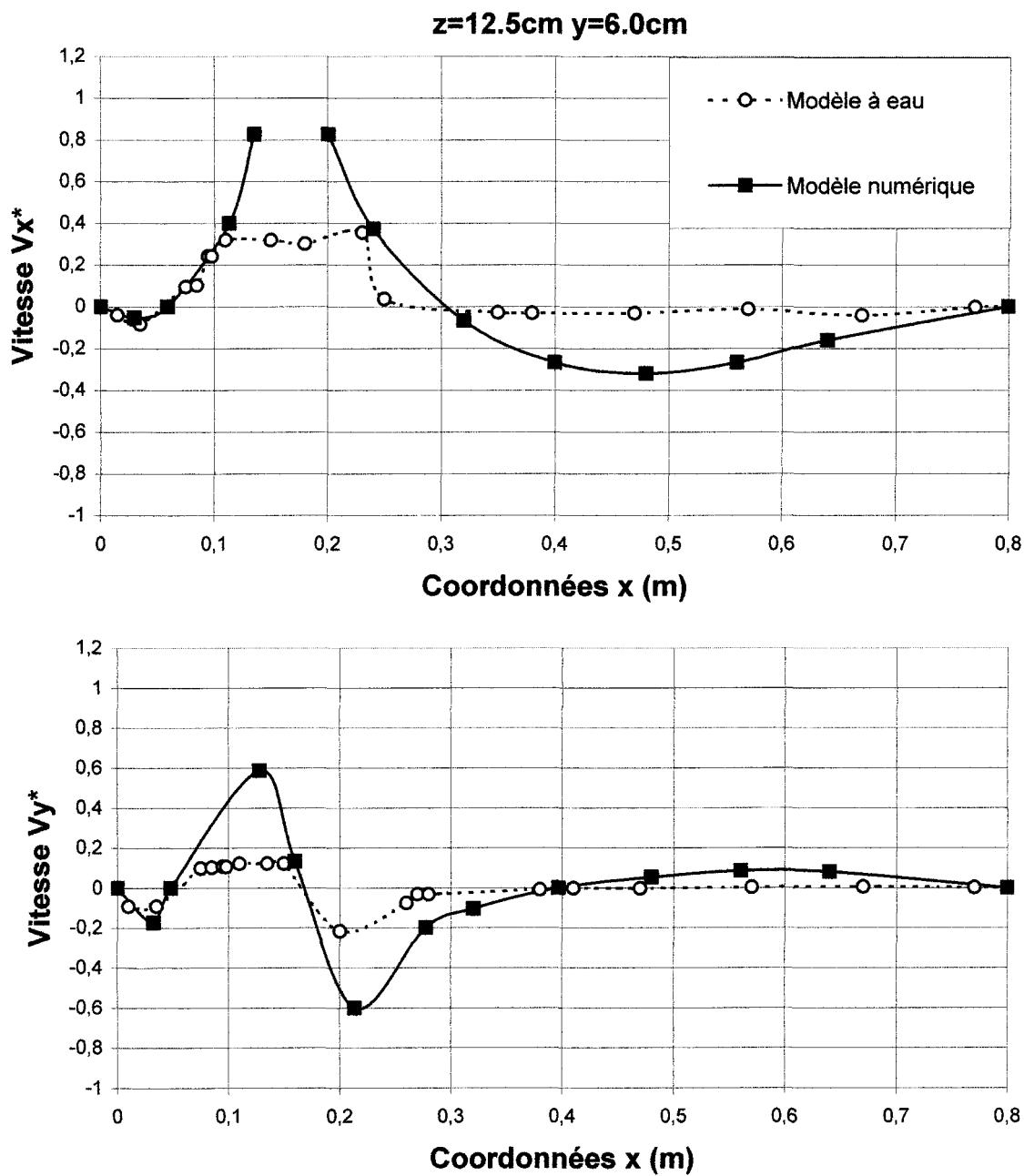


Figure 4.37 Comparaison des composantes x et y des vitesses adimensionnelles mesurées et calculées le long d'une droite passant à $y=0,06\text{m}$, $z=0,125\text{m}$ ($V_{\text{feuille}}=1,5\text{m/s}$, $\text{Re}=10^5$)

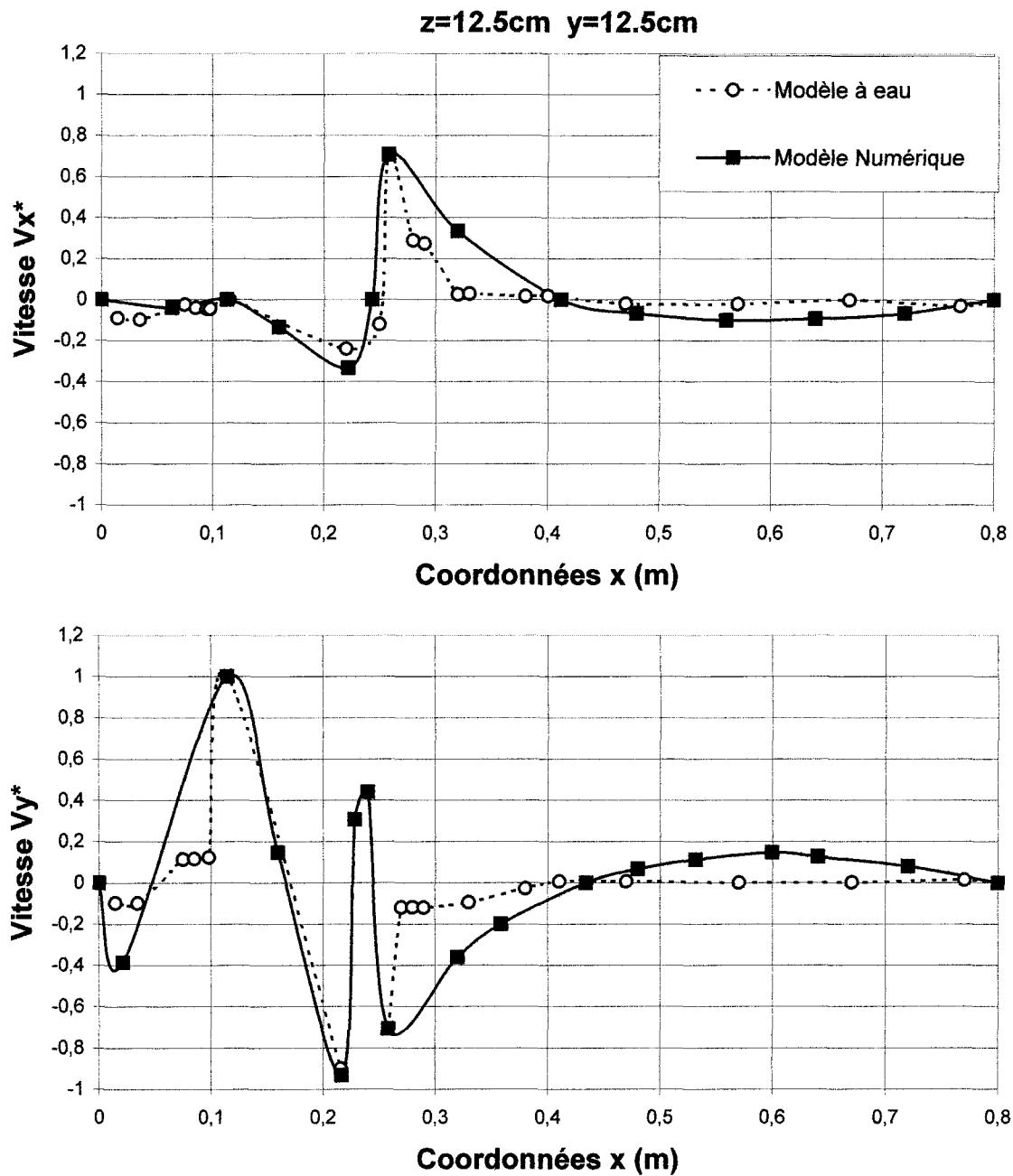


Figure 4.38 Comparaison des composantes x et y des vitesses adimensionnelles mesurées et calculées le long d'une droite passant à $y=0.125\text{m}$, $z=0.125\text{m}$ ($V_{\text{feuille}}=1,5\text{m/s}$, $\text{Re}=10^5$)

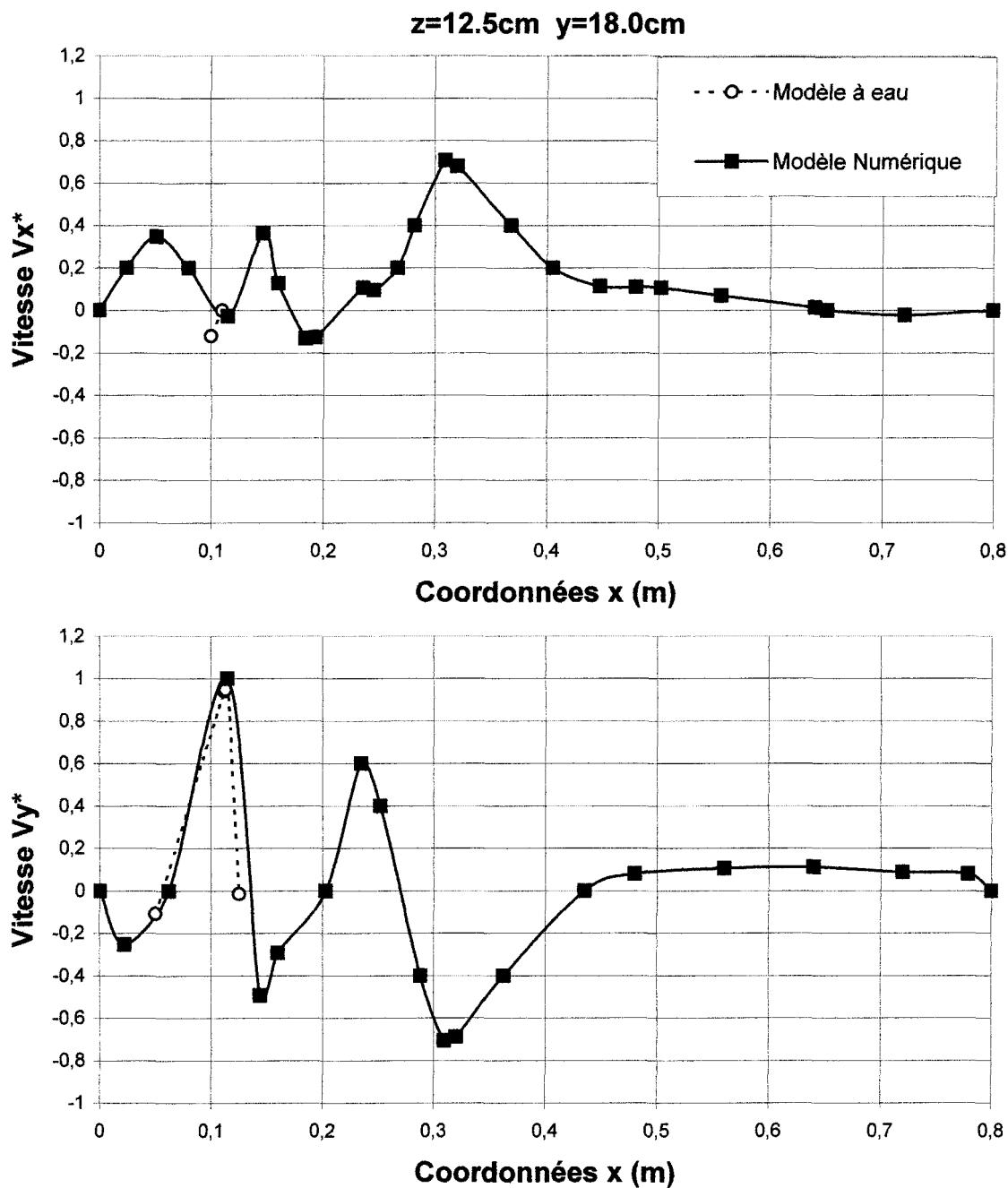


Figure 4.39 Comparaison des composantes x et y des vitesses adimensionnelles mesurées et calculées le long d'une droite passant à $y=0.18\text{m}$, $z=0.125\text{m}$ ($V_{\text{feuille}}=1,5\text{m/s}$, $\text{Re}=10^5$)

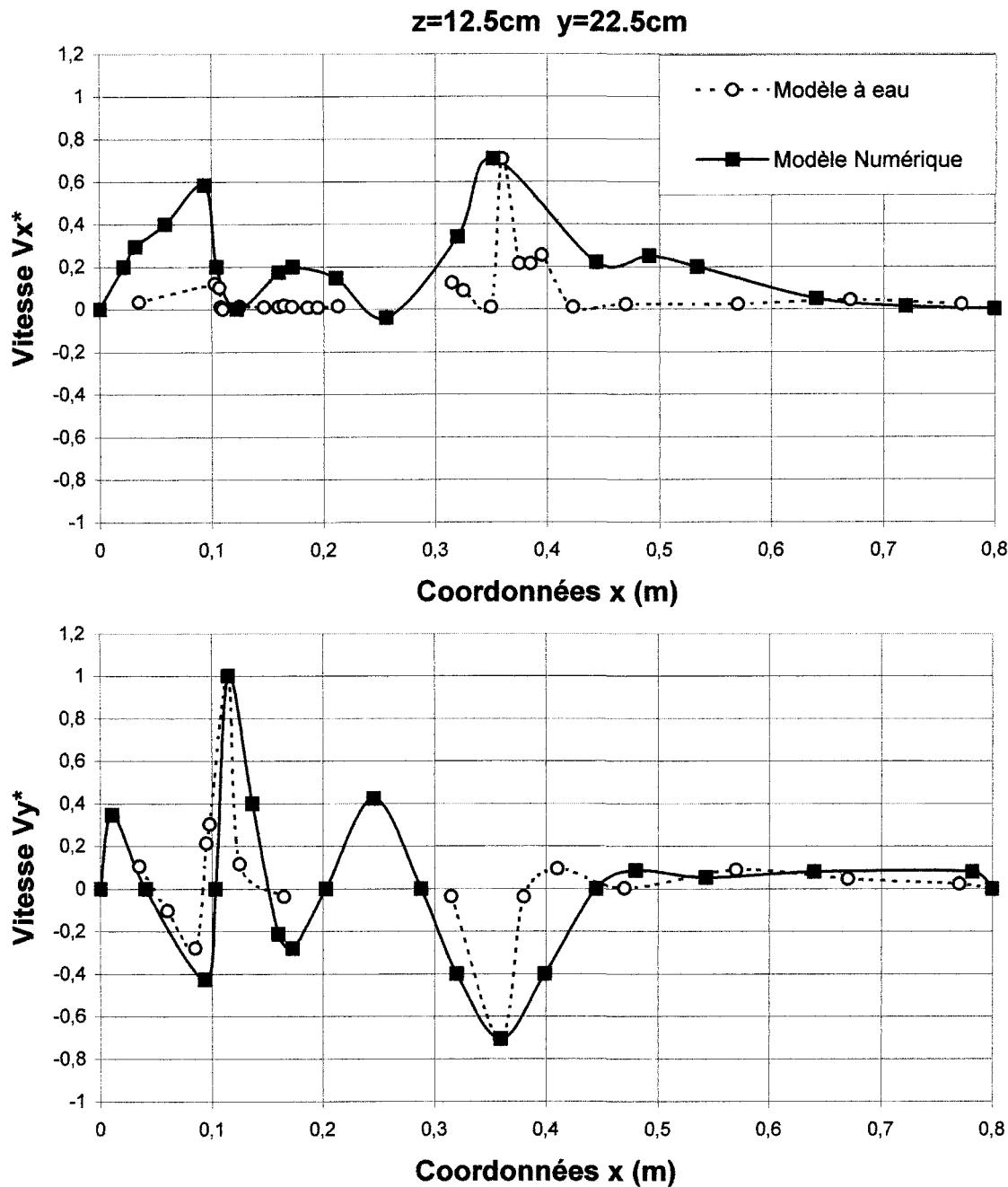


Figure 4.40 Comparaison des composantes x et y des vitesses adimensionnelles mesurées et calculées le long d'une droite passant à $y=0.225\text{m}$, $z=0.125\text{m}$ ($V_{\text{feuille}}=1,5\text{m/s}$, $Re=10^5$)

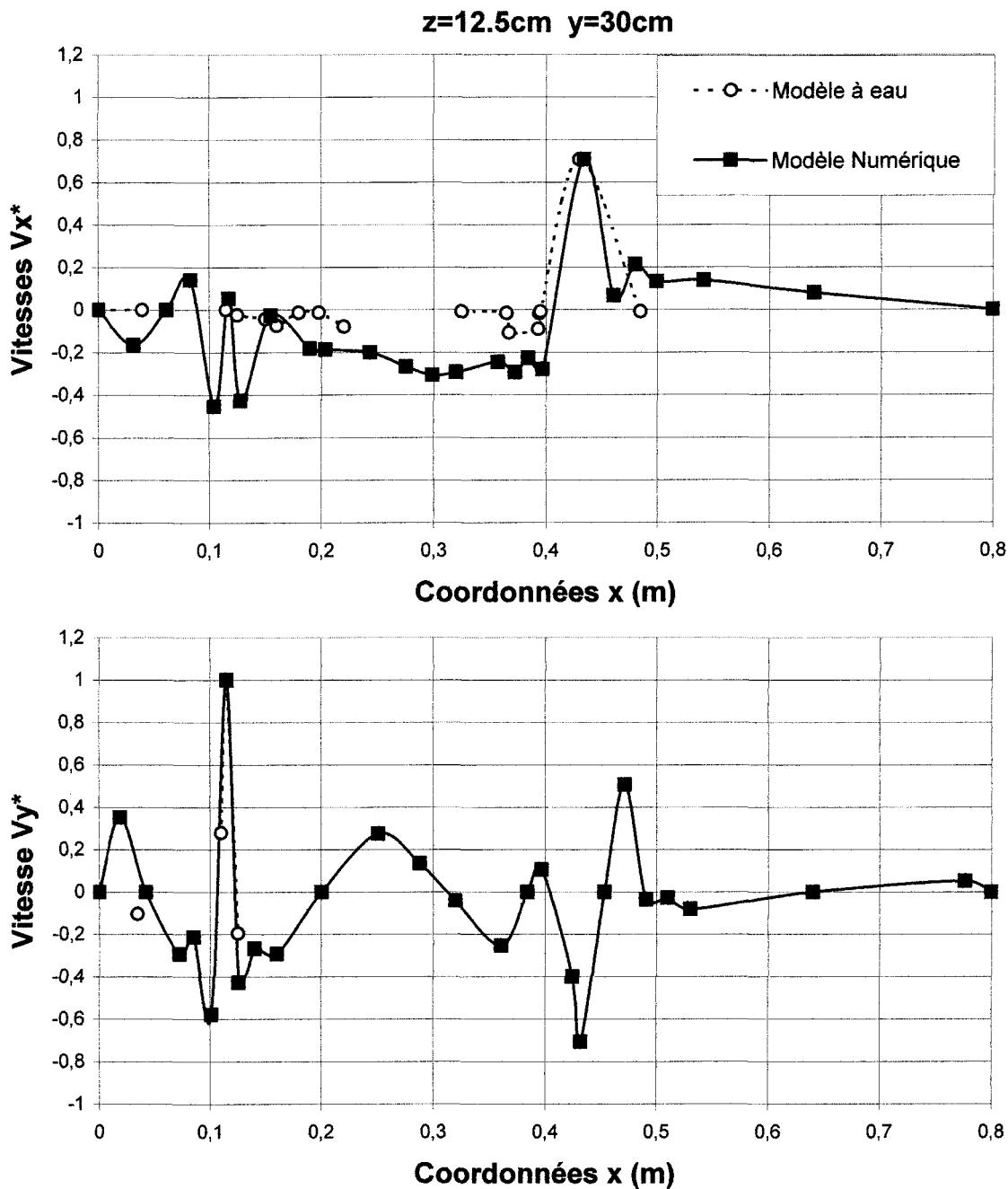


Figure 4.41 Comparaison des composantes x et y des vitesses adimensionnelles mesurées et calculées le long d'une droite passant à $y=0.30\text{m}$, $z=0.125\text{m}$ ($V_{\text{feuille}}=1,5\text{m/s}$, $\text{Re}=10^5$)

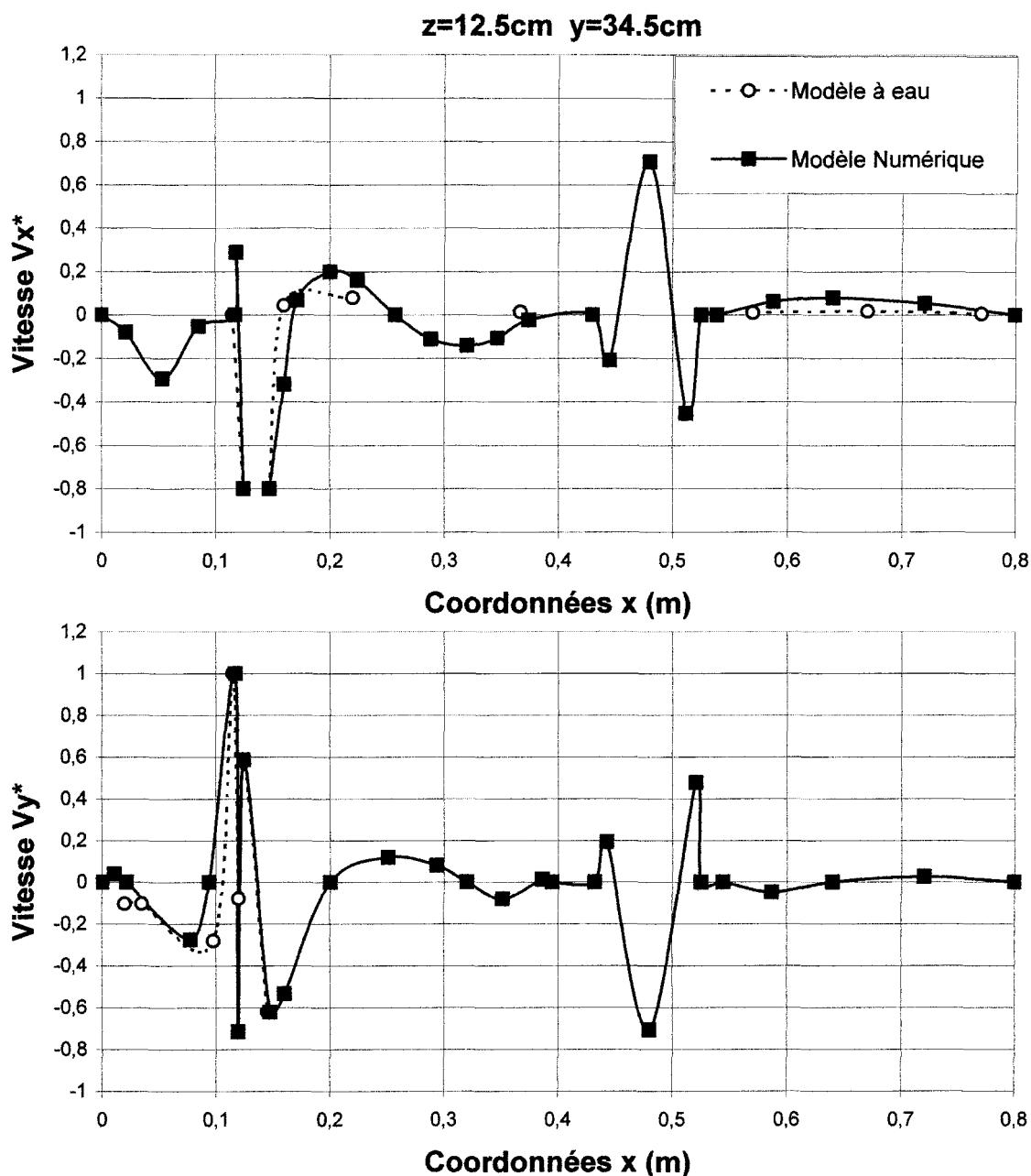


Figure 4.42 Comparaison des composantes x et y des vitesses adimensionnelles mesurées et calculées le long d'une droite passant à $y=0.345\text{m}$, $z=0.125\text{m}$ ($V_{\text{feuille}}=1,5\text{m/s}$, $\text{Re}=10^5$)

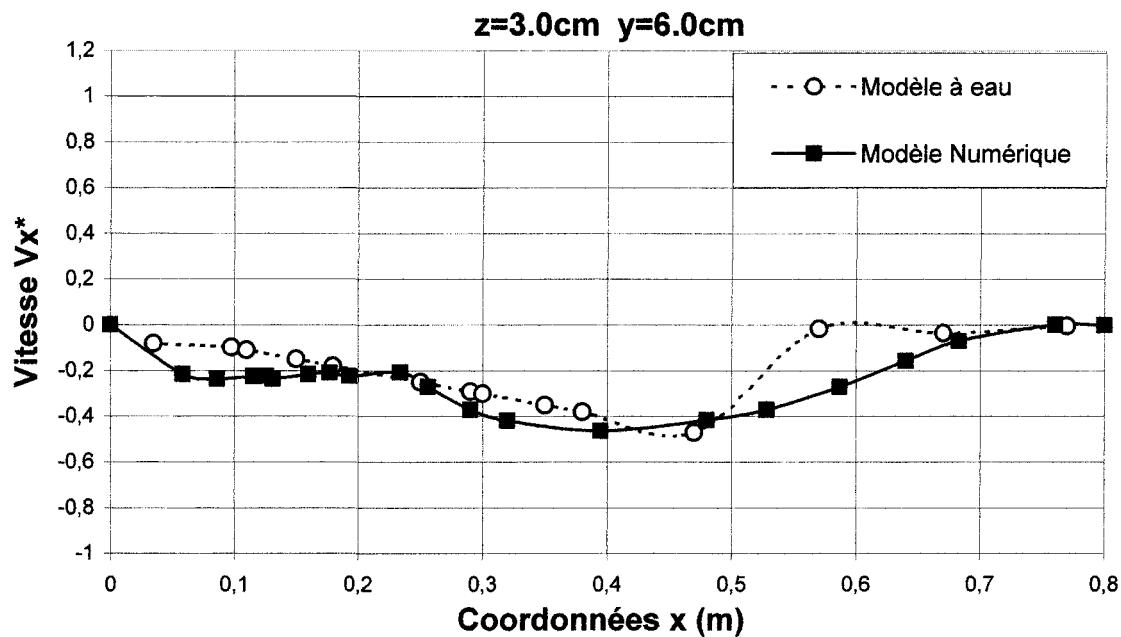


Figure 4.43 Comparaison des composantes x et y des vitesses adimensionnelles mesurées et calculées le long d'une droite passant à $y=0.06\text{m}$, $z=0.03\text{m}$ ($V_{\text{feuille}}=1,5\text{m/s}$, $\text{Re}=10^5$)

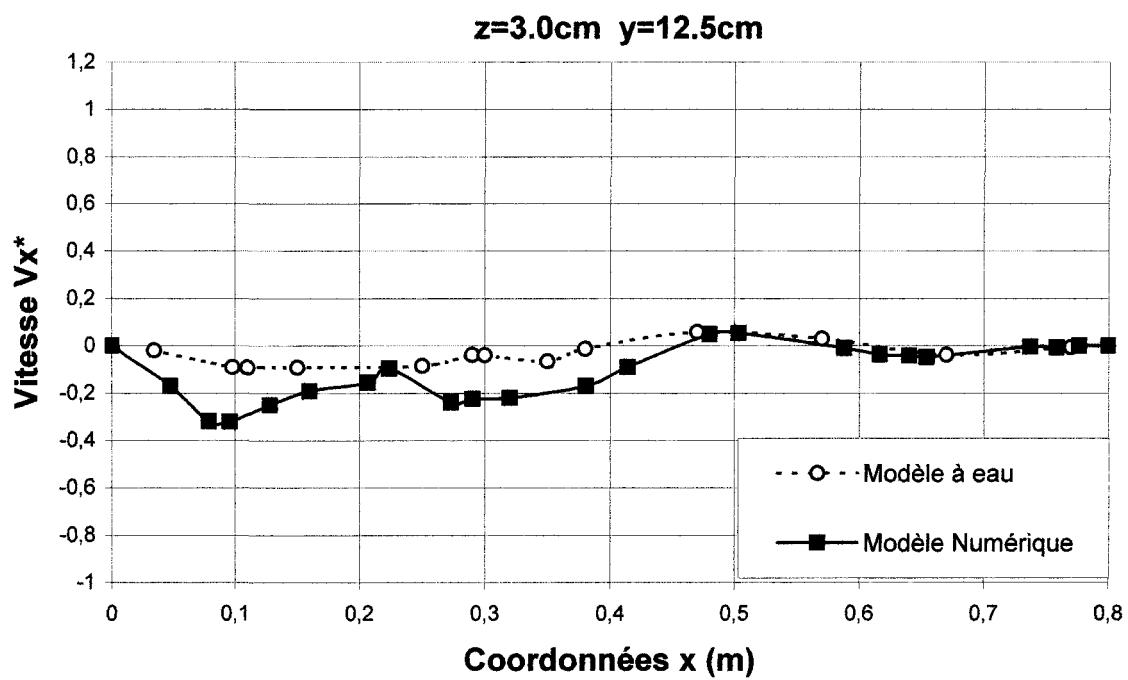


Figure 4.44 Comparaison des composantes x et y des vitesses adimensionnelles mesurées et calculées le long d'une droite passant à $y=0.125\text{m}$, $z=0.03\text{m}$ ($V_{\text{feuille}}=1,5\text{m/s}$, $\text{Re}=10^5$)

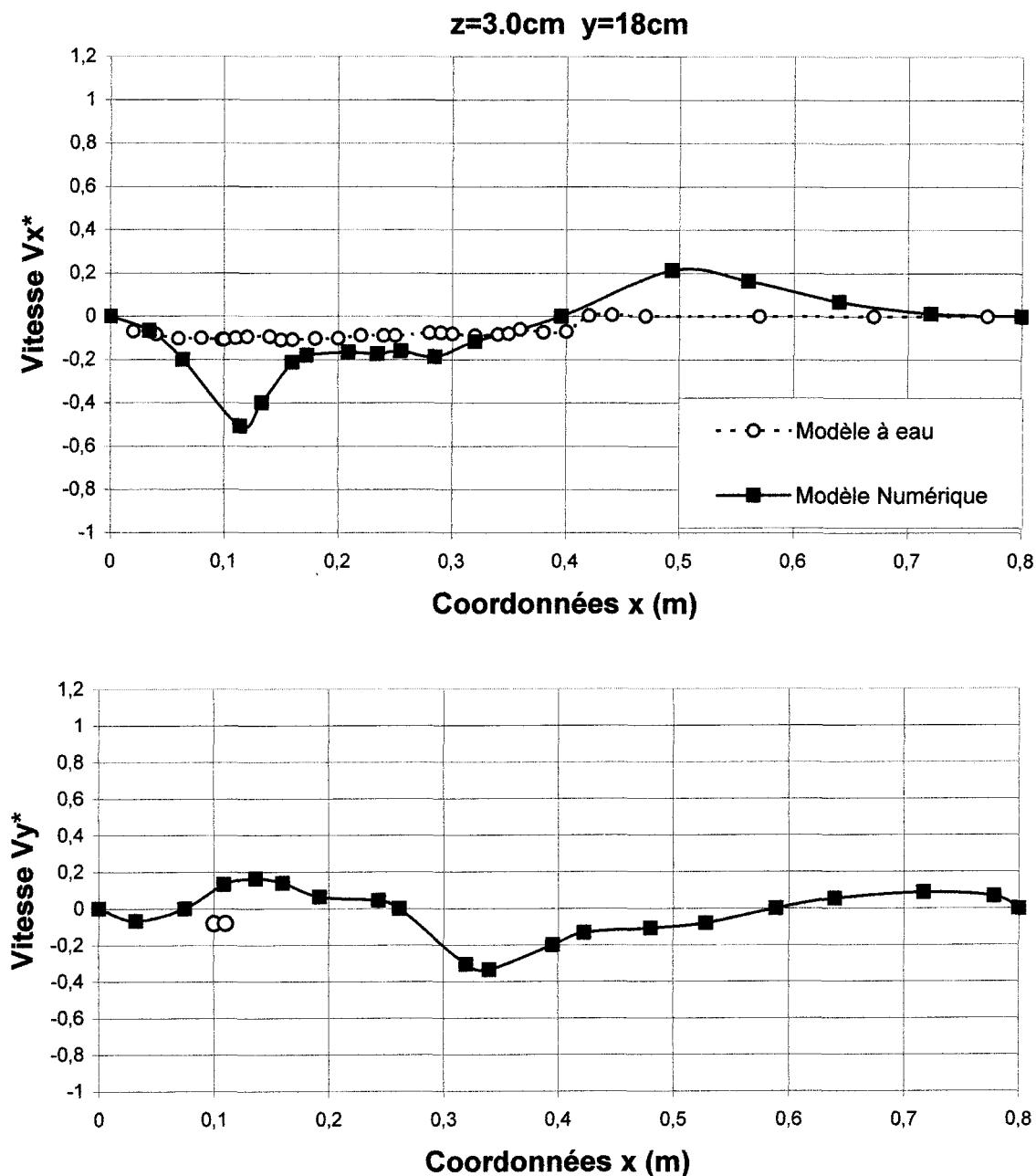


Figure 4.45 Comparaison des composantes x et y des vitesses adimensionnelles mesurées et calculées le long d'une droite passant à $y=0.18\text{m}$, $z=0.03\text{m}$ ($V_{\text{feuille}}=1,5\text{m/s}$, $\text{Re}=10^5$)

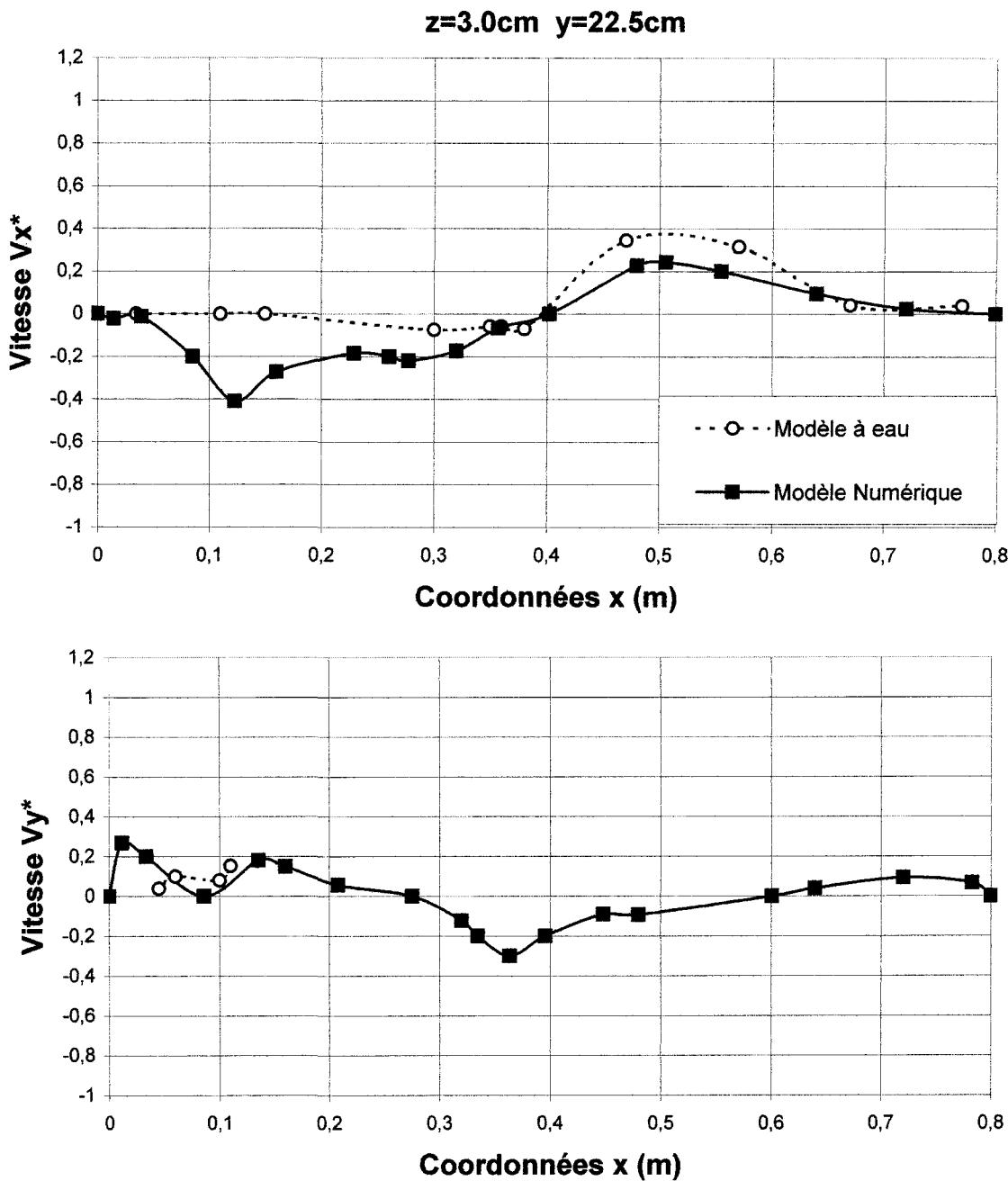


Figure 4.46 Comparaison des composantes x et y des vitesses adimensionnelles mesurées et calculées le long d'une droite passant à $y=0.225\text{m}$, $z=0.03\text{m}$ ($V_{\text{feuille}}=1,5\text{m/s}$, $\text{Re}=10^5$)

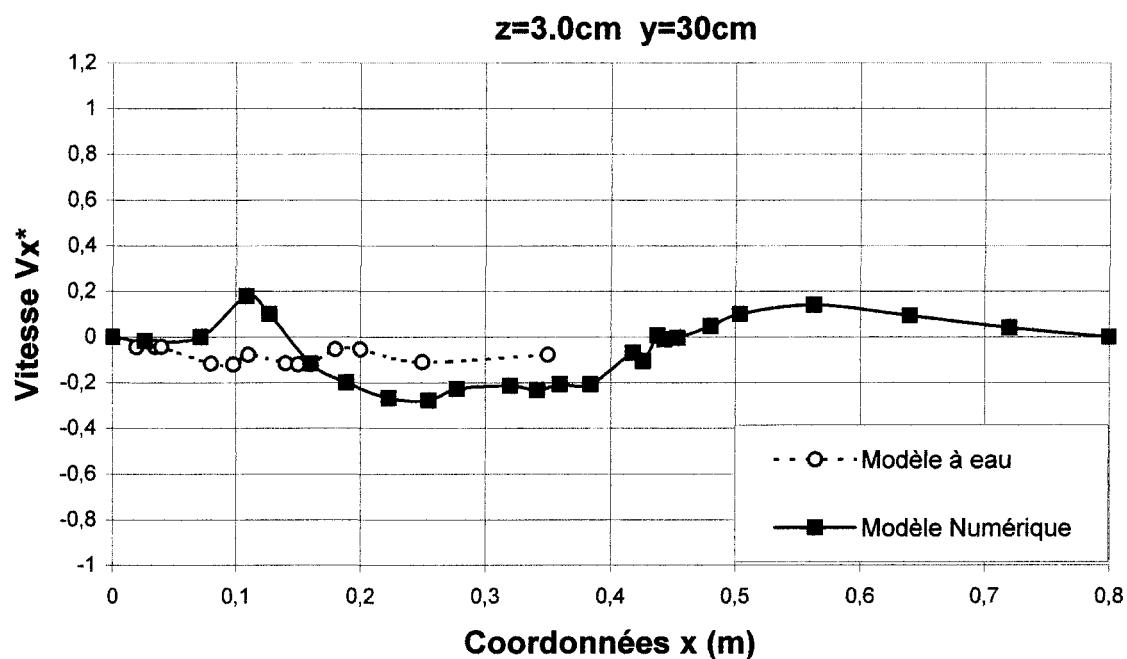


Figure 4.47 Comparaison des composantes x et y des vitesses adimensionnelles mesurées et calculées le long d'une droite passant à $y=0.30\text{m}$, $z=0.03\text{m}$ ($V_{\text{feuille}}=1,5\text{m/s}$, $\text{Re}=10^5$)

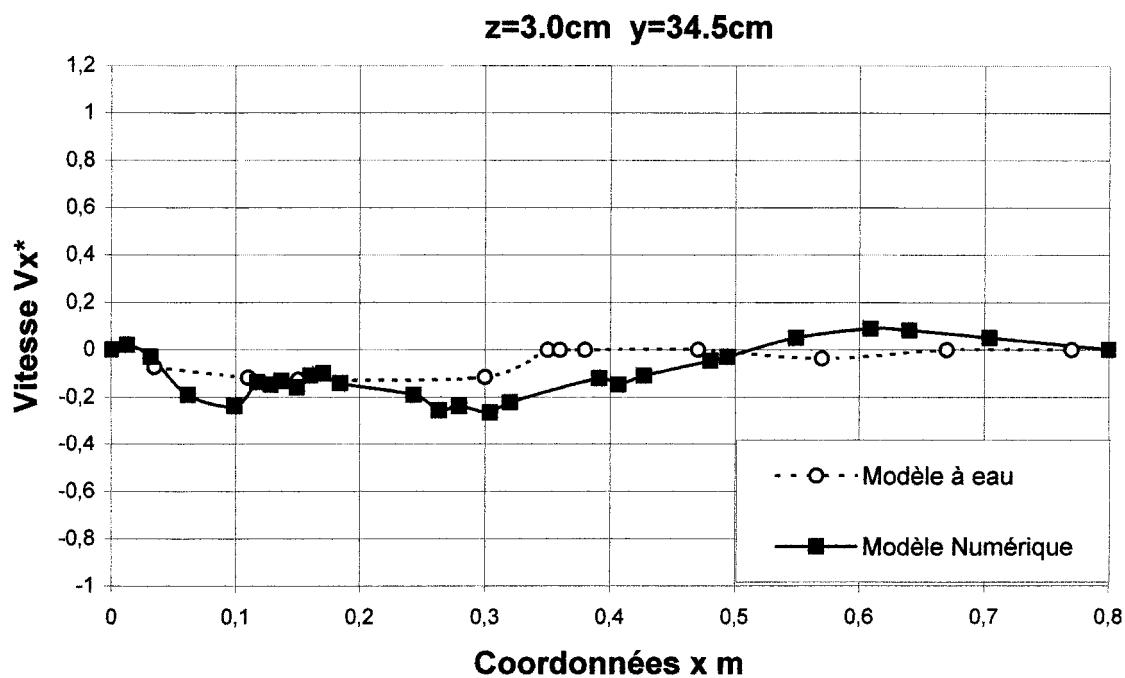


Figure 4.48 Comparaison des composantes x et y des vitesses adimensionnelles mesurées et calculées le long d'une droite passant à $y=0.345\text{m}$, $z=0.03\text{m}$ ($V_{\text{feuille}}=1,5\text{m/s}$, $\text{Re}=10^5$)

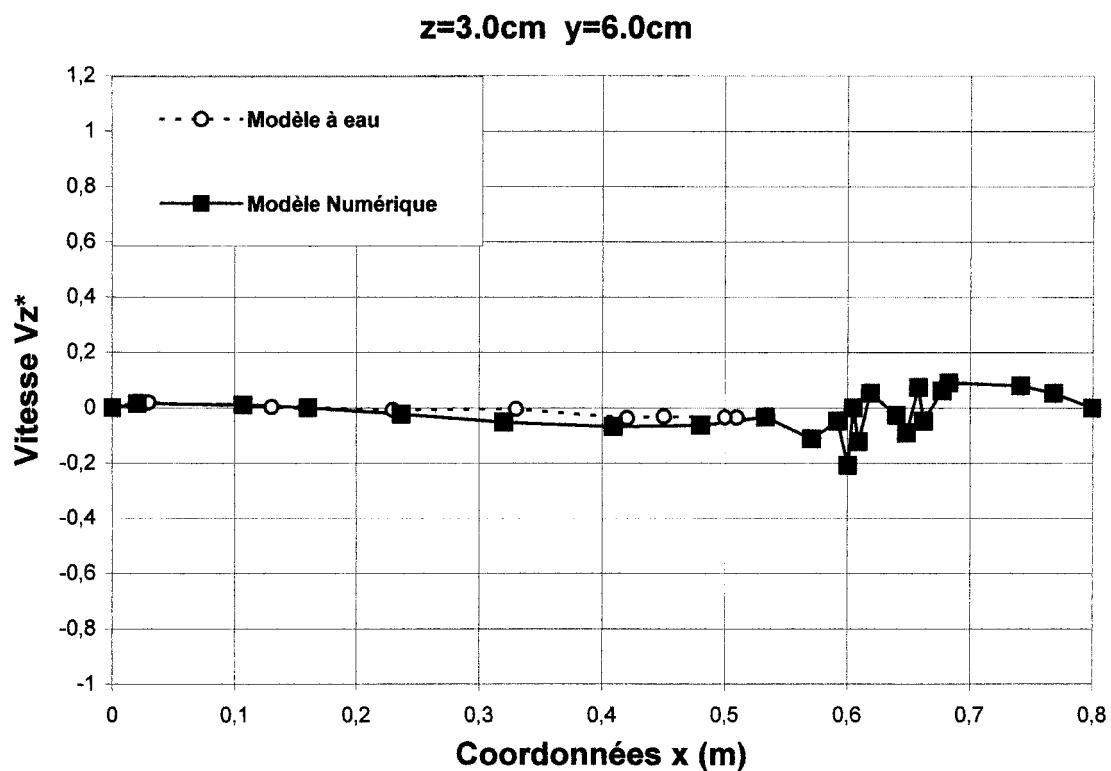


Figure 4.49 Comparaison de la composante z des vitesses adimensionnelles mesurées et calculées le long d'une droite passant à $y=0.06\text{m}$, $z=0.03\text{m}$ ($V_{\text{feuille}}=1,5\text{m/s}$, $\text{Re}=10^5$)

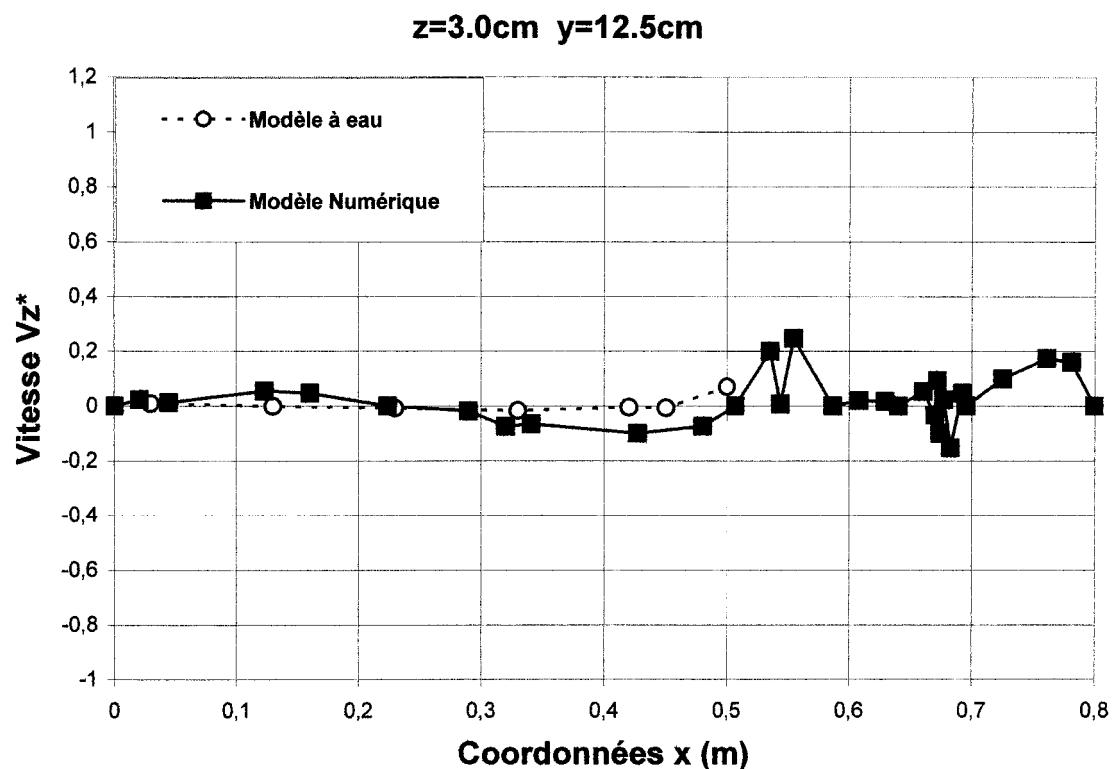


Figure 4.50 Comparaison de la composante z des vitesses adimensionnelles mesurées et calculées le long d'une droite passant à $y=0.125\text{m}$, $z=0.03\text{m}$ ($V_{\text{feuille}}=1,5\text{m/s}$, $Re=10^5$)

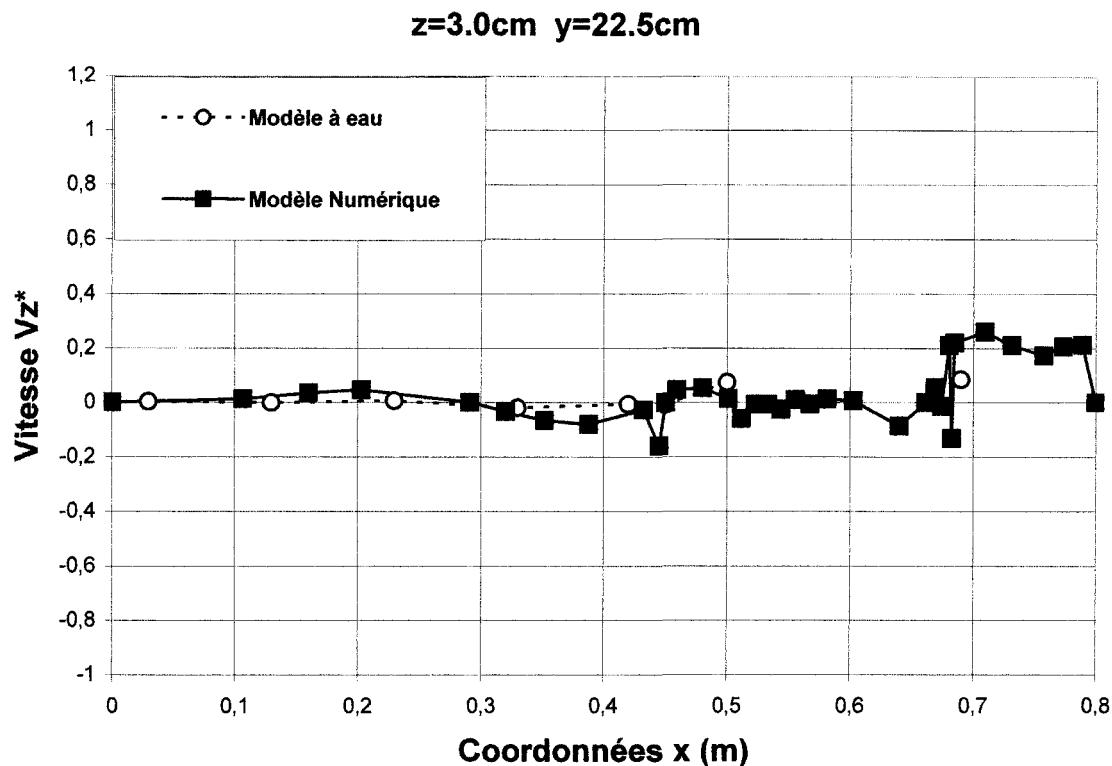


Figure 4.51 Comparaison de la composante z des vitesses adimensionnelles mesurées et calculées le long d'une droite passant à $y=0.225\text{m}$, $z=0.03\text{m}$ ($V_{\text{feuille}}=1,5\text{m/s}$, $Re=10^5$)

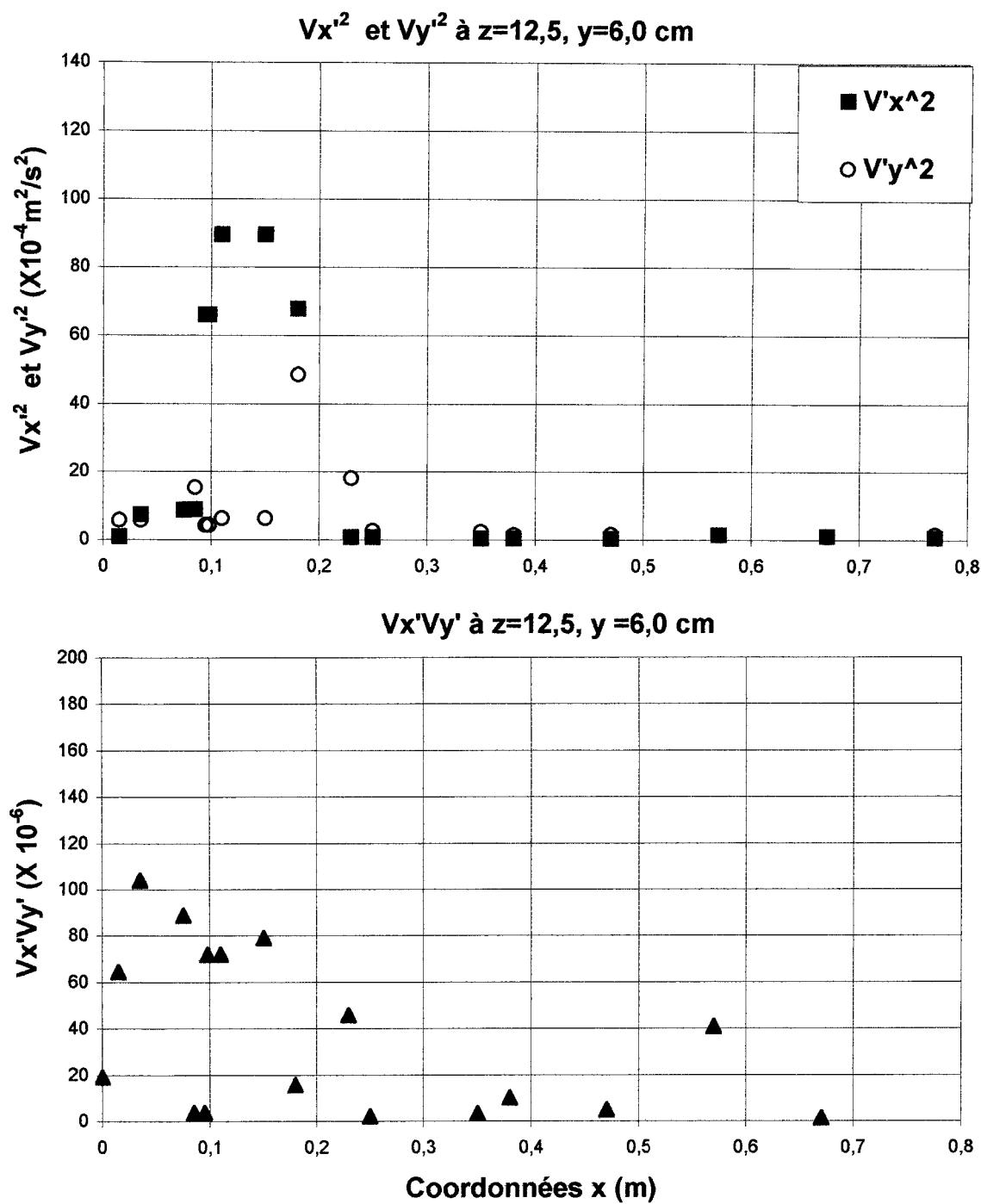


Figure 4.52 Calculs des facteurs de turbulence le long d'une droite passant à $y=0.06\text{m}$, $z=0.125\text{m}$

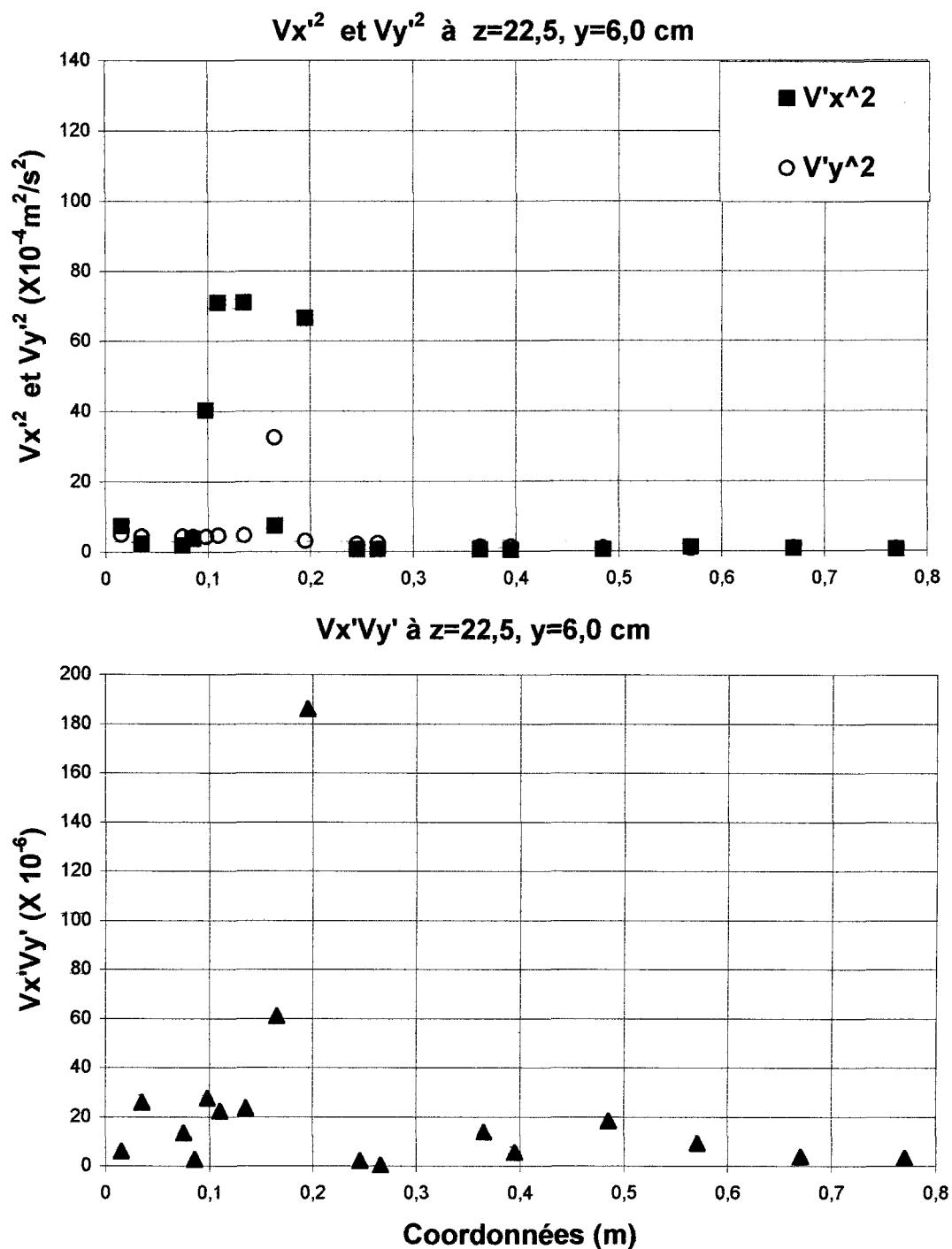


Figure 4.53 Calculs des facteurs de turbulence le long d'une droite passant à $y=0.06\text{m}$, $z=0.225\text{m}$

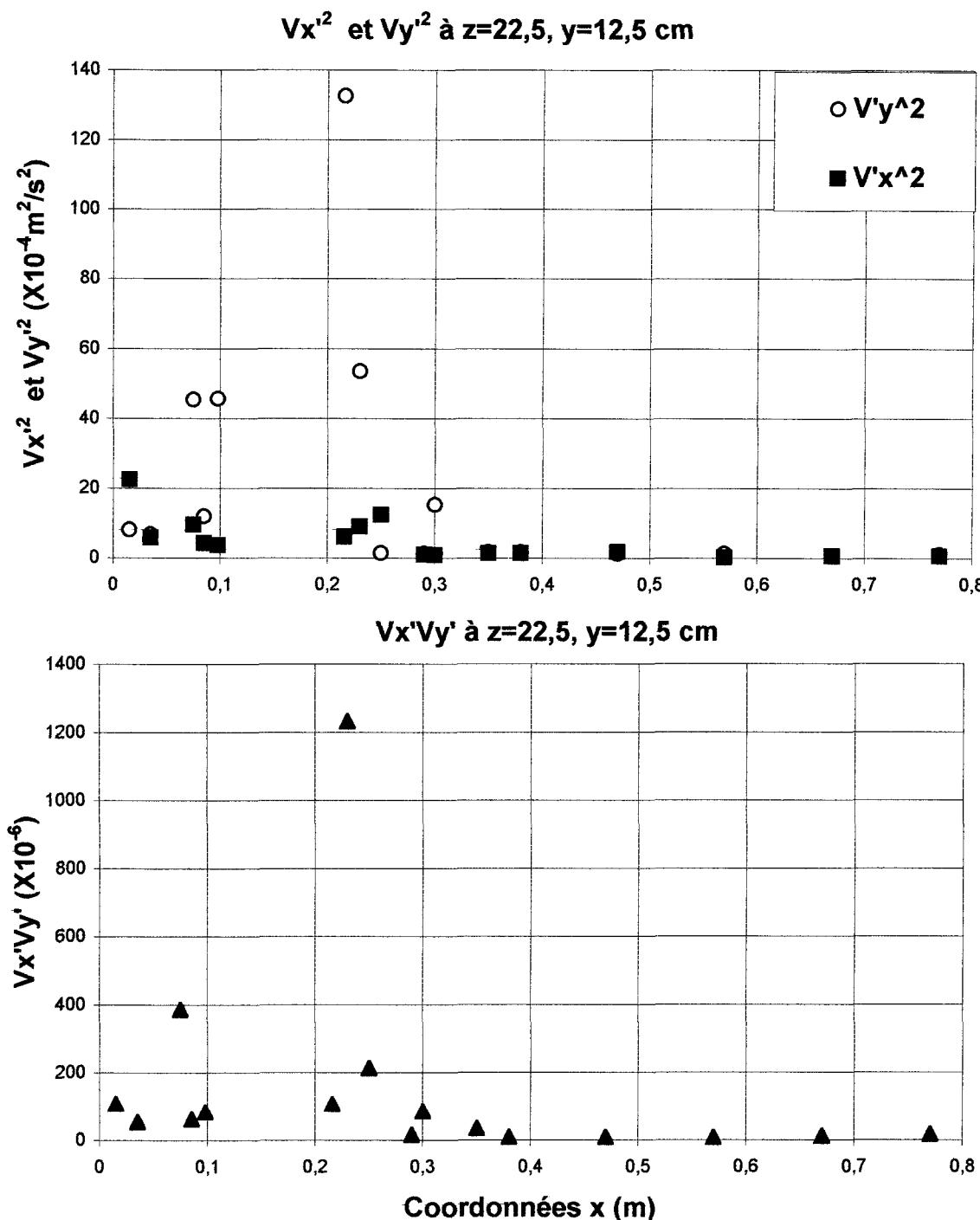


Figure 4.54 Calculs des facteurs de turbulence le long d'une droite passant à $y=0.125\text{m}$, $z=0.225\text{m}$

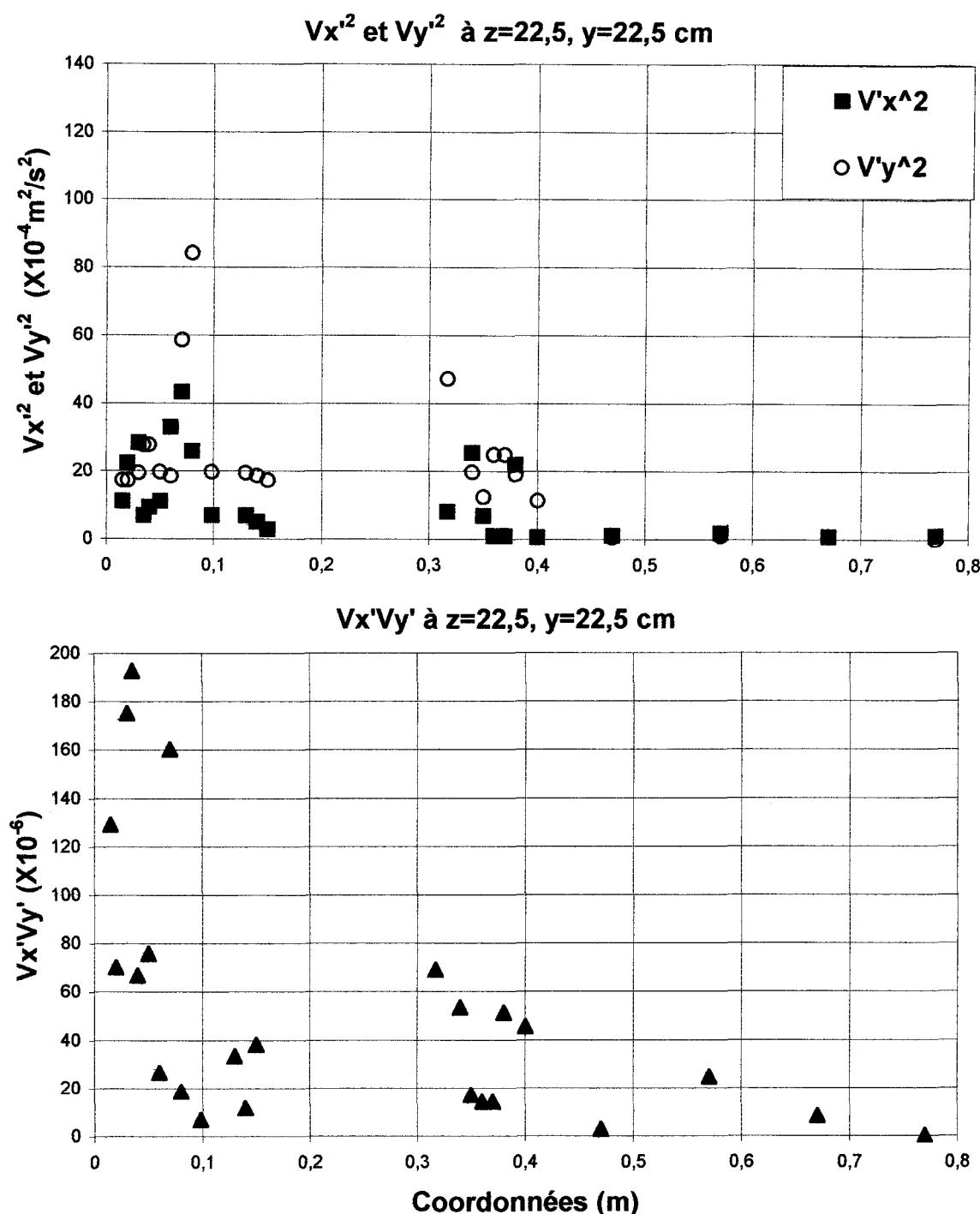


Figure 4.55 Calculs des facteurs de turbulence le long d'une droite passant à $y=0.225\text{m}$, $z=0.225\text{m}$

4.2 Modèle numérique

Le calcul de l'écoulement à l'aide d'un modèle numérique a été fait en ajoutant à celui de Ajersch, Paré et Binet (1995) la présence d'une gorge qui sert à relier un inducteur. Des vitesses d'entrée et de sortie ont été imposées sur l'extrémité de cette gorge pour simuler la présence d'un inducteur fonctionnant à 100% de sa capacité. De plus, les conditions aux frontières de surface ont été modifiées pour simuler la présence d'une couche de métal solidifiée aux endroits appropriées. Finalement, un modèle de turbulence simple à zéro paramètre (FIPAP, 1993) a été ajouté au calcul.

Les résultats obtenus sont très semblables à ceux obtenus pour un calcul laminaire, sans inducteurs et avec une surface sans contraintes (Ajersch, Paré et Binet, 1995). La figure 4.56 montre l'écoulement calculé dans un plan central (plan A, figure 3.2) avec et sans agrandissement. Les vitesses sont plus élevées près des rouleaux et de la courroie que dans le reste du bain. La même observation est faite à la figure 4.57 sur un plan se situant au quart du rouleau principal (plan C, figure 3.2). On voit aussi que l'écoulement calculé varie peu en grandeur et en orientation pour des plans allant du centre vers la zone liquide tant qu'on se situe dans la région où se trouve la feuille et les rouleaux (plans A à D, figure 3.2).

L'écoulement calculé est en général très semblable à celui observé dans le modèle à eau. À l'extérieur de la feuille, les sens d'écoulement sont les mêmes et les grandeurs de vitesse aussi. À l'intérieur de la feuille (dans la zone centrale), l'écoulement calculé par le modèle numérique est plus détaillé que ce qui était possible d'observer dans la maquette à eau. Cependant, avec deux rouleaux, les orientations d'écoulement près de la surface vers l'avant et vers l'arrière ont été observés dans le modèle à eau et c'est aussi ce qu'on observe à la figure 4.56.

La figure 4.58 correspond à un plan qui se situe entre la feuille et les bras des rouleaux (plan E, figure 3.2). On voit que l'écoulement dans ce plan contourne la feuille, tel qu'observé à la figure 4.4 issue de la maquette à eau. De la même manière, la figure 4.59 illustre l'écoulement calculé dans un plan se situant entre la paroi extérieure et les bras des rouleaux (plan G, figure 3.2). L'écoulement se dirige de l'avant vers l'arrière, tel qu'observé à la figure 4.3. Une perturbation de l'écoulement lorsque le fluide passe près des rouleaux et de la feuille est aussi observée, tout autant dans la modélisation numérique que par visualisation dans le modèle à eau.

La figure 4.60 illustre un plan yz à l'avant du bain. Des changements importants d'orientation apparaissent à cet endroit, dus à la présence du rouleau stabilisateur. La figure 4.60 en bas montre bien de quelle façon le fluide se déplace du centre, entouré par la feuille, vers l'extérieur.

Les figures 4.61 et 4.62 montrent des plans xz au centre et à la surface du bain, respectivement. L'écoulement illustré ici montre le passage du fluide par le côté du bain et l'échange avec le milieu. Les vitesses à la surface sont beaucoup plus faibles qu'au centre. L'écoulement calculé à la figure 4.61 correspond bien avec celui observé dans le modèle à eau (figure 4.5), mis à part l'entrée de fluide dans la gorge de l'inducteur.

La figure 4.63 montre le détail de l'écoulement dans la cloche. Celui-ci est asymétrique et on voit qu'à l'arrière, le fluide se dirige vers l'intérieur de la cloche avant d'être aspiré par la feuille qui entre dans le bain. L'écoulement calculé est similaire à celui visualisé par laser, bien que les vitesses calculées semblent plus élevées que ce qui a été observé. L'absence de surface libre peut en être la cause.

La figure 4.64 montre l'effet des inducteurs sur l'écoulement dans le bain pour un plan yz passant au centre de l'inducteur (figure 4.64 en haut) et pour un plan passant du côté droit de l'inducteur (figure 4.64 en bas). L'effet de celui-ci est très faible et il s'illustre seulement par une légère modification de l'orientation de l'écoulement lorsque le fluide s'approche de l'ouverture de la gorge. Les vecteurs vitesse se courbent pour entrer dans la gorge, même lorsque l'inducteur pousse vers l'intérieur du bain. Ce fait s'explique par une vue qui coupe la gorge qui relie les inducteurs au bain (figure 4.65). En effet, le fluide poussé à l'intérieur de la gorge par l'inducteur est court-circuité par celui qui entre dans l'appareil de chauffage. Selon

ces figures issues des calculs numériques, la présence des inducteurs affecte peu l'écoulement à l'intérieur de la cuve. Il est cependant très probable que l'effet thermique des inducteurs augmente la perturbation de l'écoulement.

Le modèle de turbulence utilisé n'est pas suffisamment sophistiqué pour bien représenter la turbulence de l'écoulement dans le bain. La comparaison vitesses mesurées et calculées semble montrer que l'approximation de la turbulence par un modèle à zéro paramètre n'est pas adéquate. De plus, le maillage de la zone de calcul de l'écoulement dans la cuve pourrait être amélioré. Les zones près de la feuille et des rouleaux pourraient être plus détaillées et le nombre de noeuds dans la profondeur du bain pourrait être augmenté.

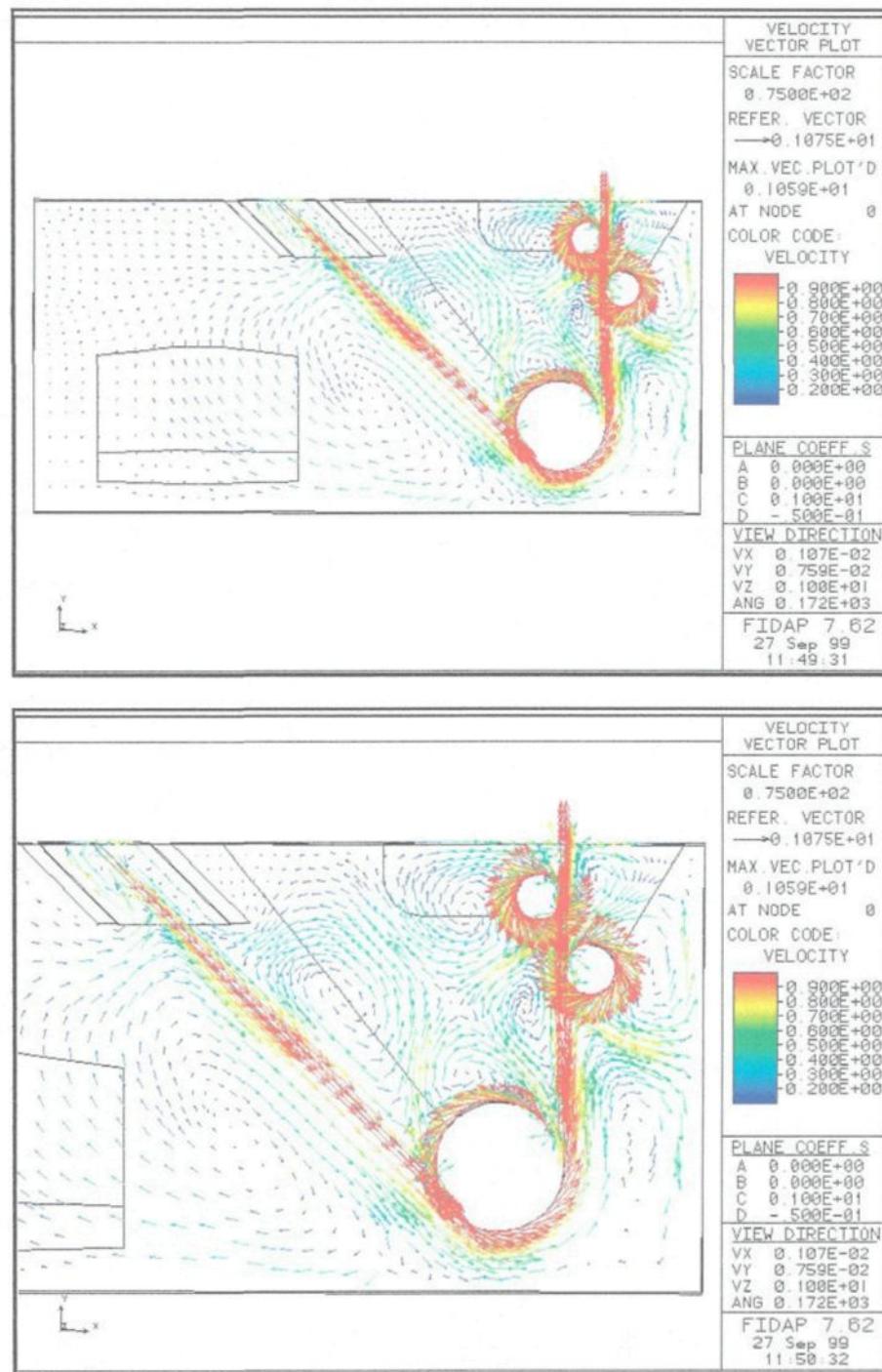


Figure 4.56 Écoulement calculé dans un plan xy au centre du bain

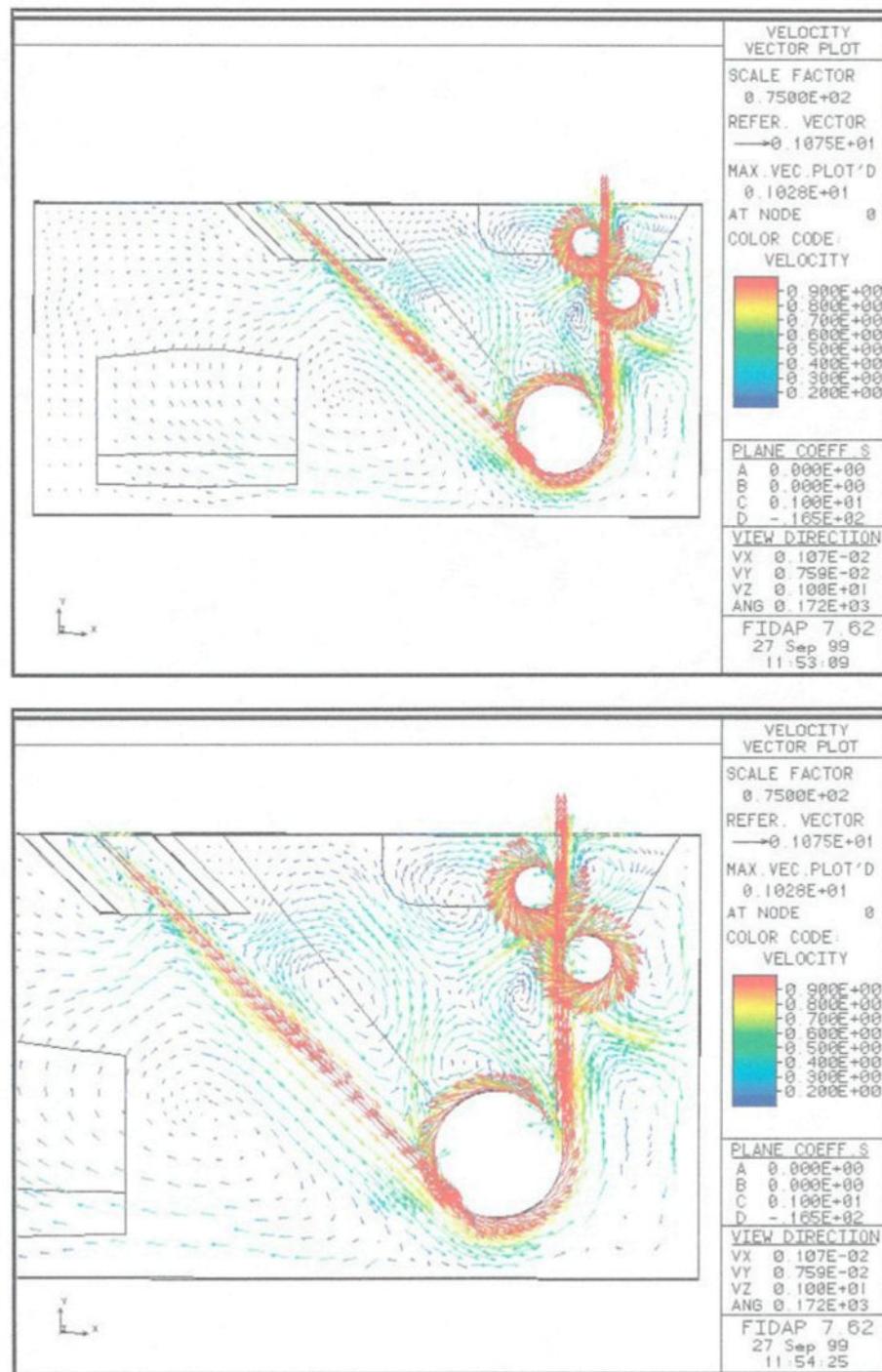


Figure 4.57 Écoulement calculé dans un plan xy situé au quart du rouleau

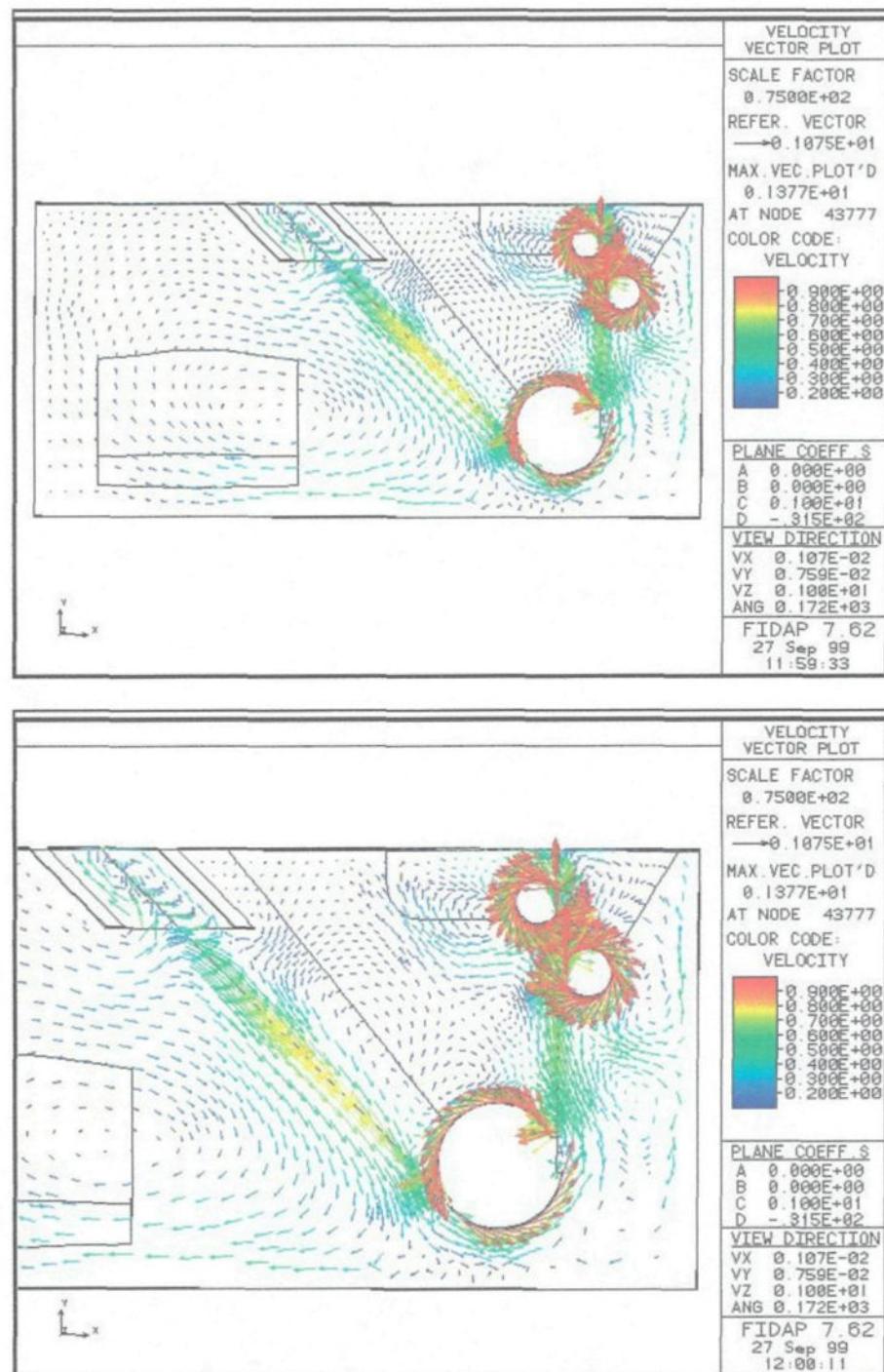


Figure 4.58 Écoulement calculé dans un plan zy entre la feuille et les bras des rouleaux

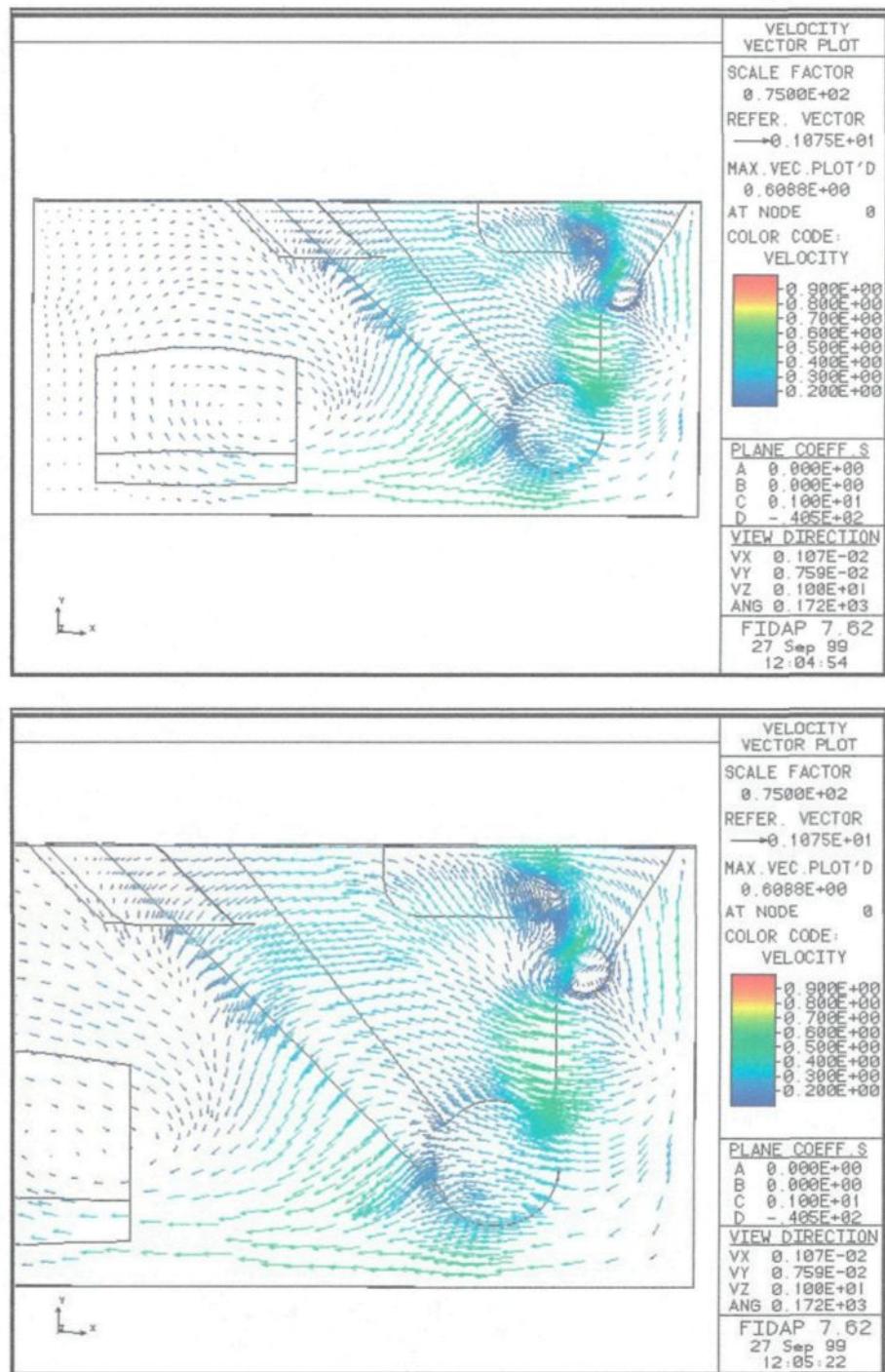


Figure 4.59 Écoulement calculé dans un plan xy situé entre la paroi du bain et les bras des rouleaux

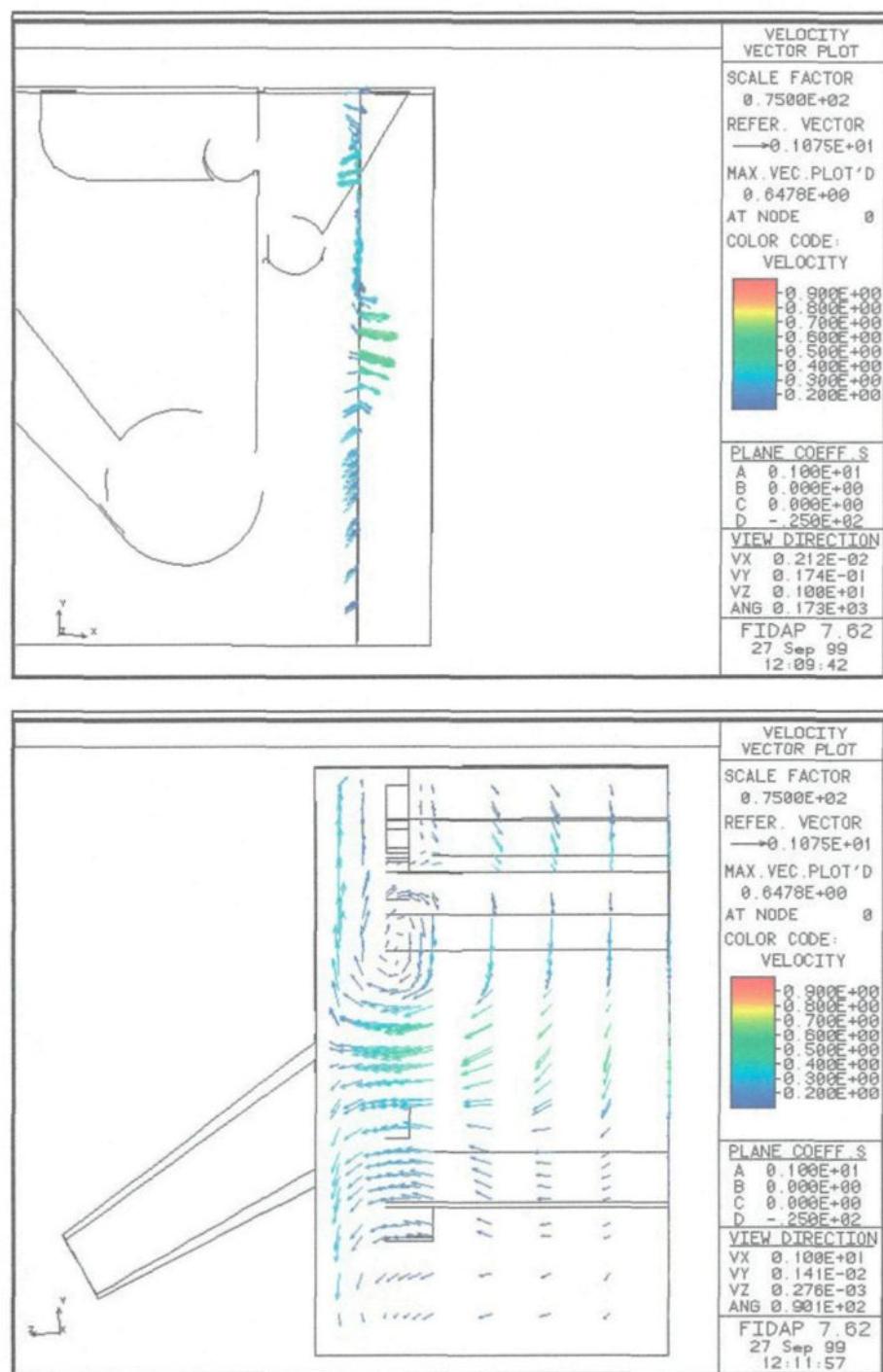


Figure 4.60 Écoulement calculé dans un plan yz à l'avant du bain

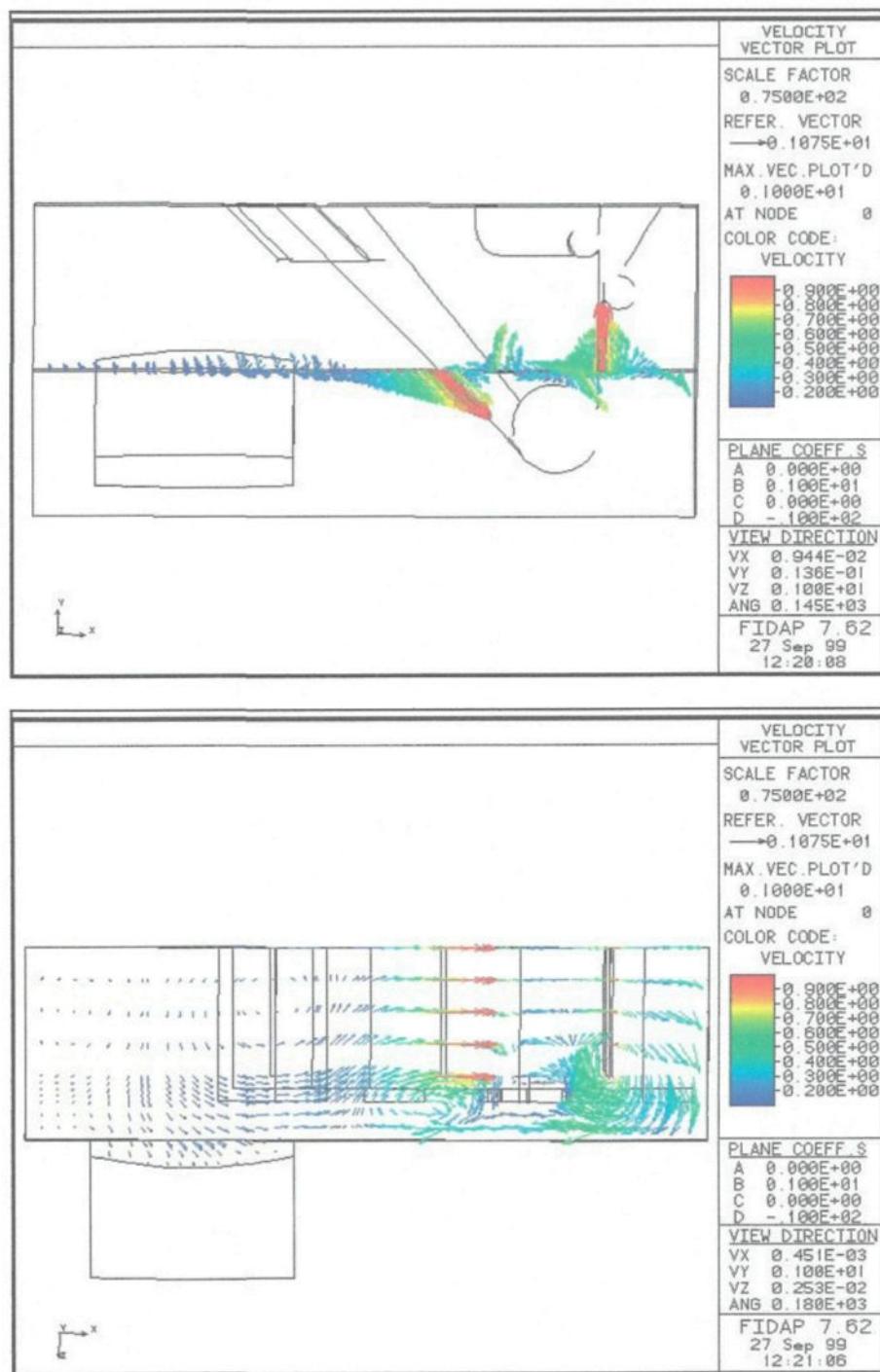


Figure 4.61 Écoulement calculé dans un plan xz au centre du bain vue

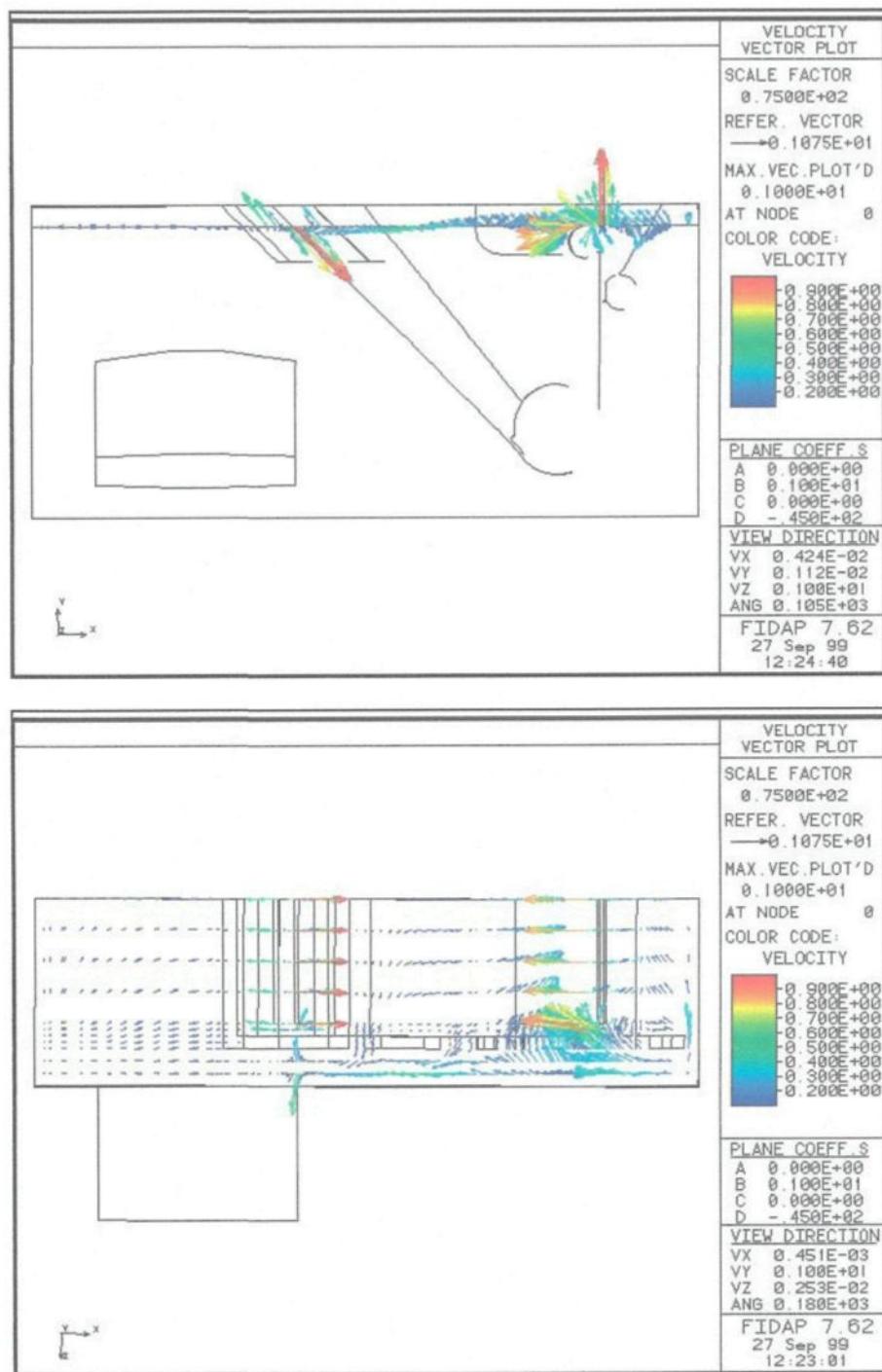


Figure 4.62 Écoulement calculé dans un plan xz près de la surface

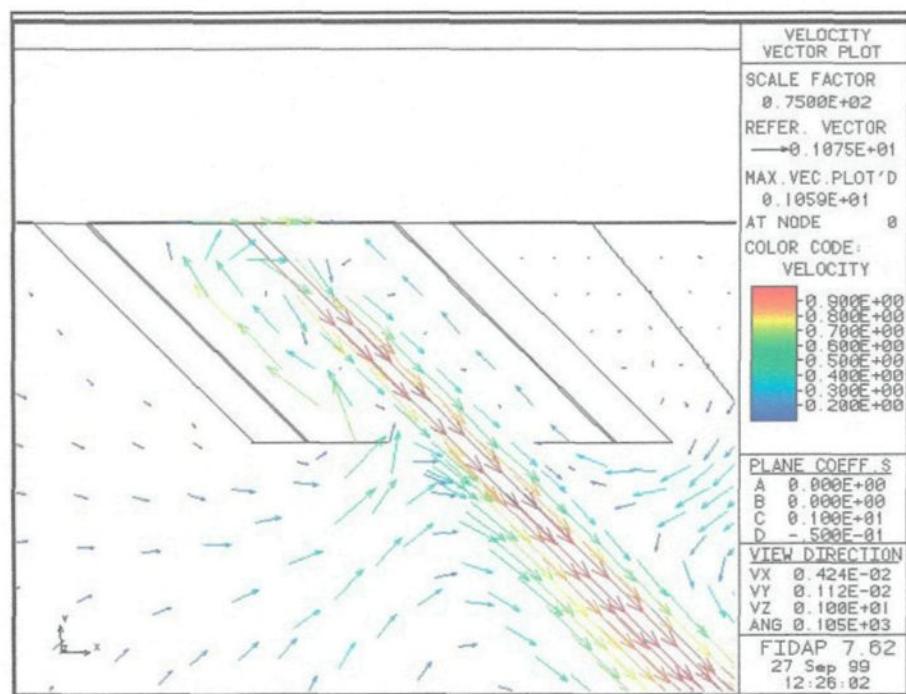


Figure 4.63 Écoulement calculé à l'intérieur de la cloche

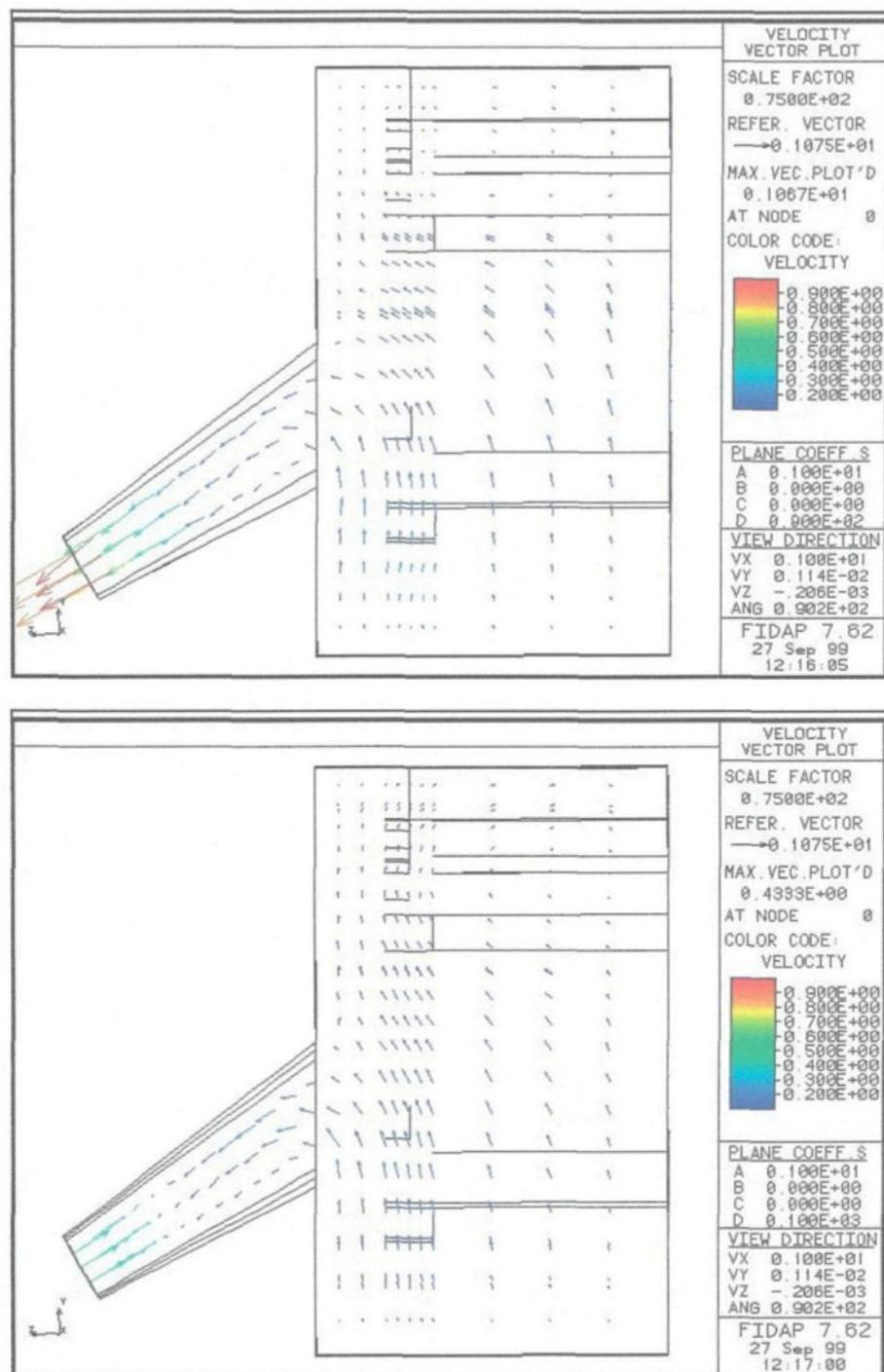


Figure 4.64 Effet de la présence des inducteurs et de la gorge sur l'écoulement dans un plan yz

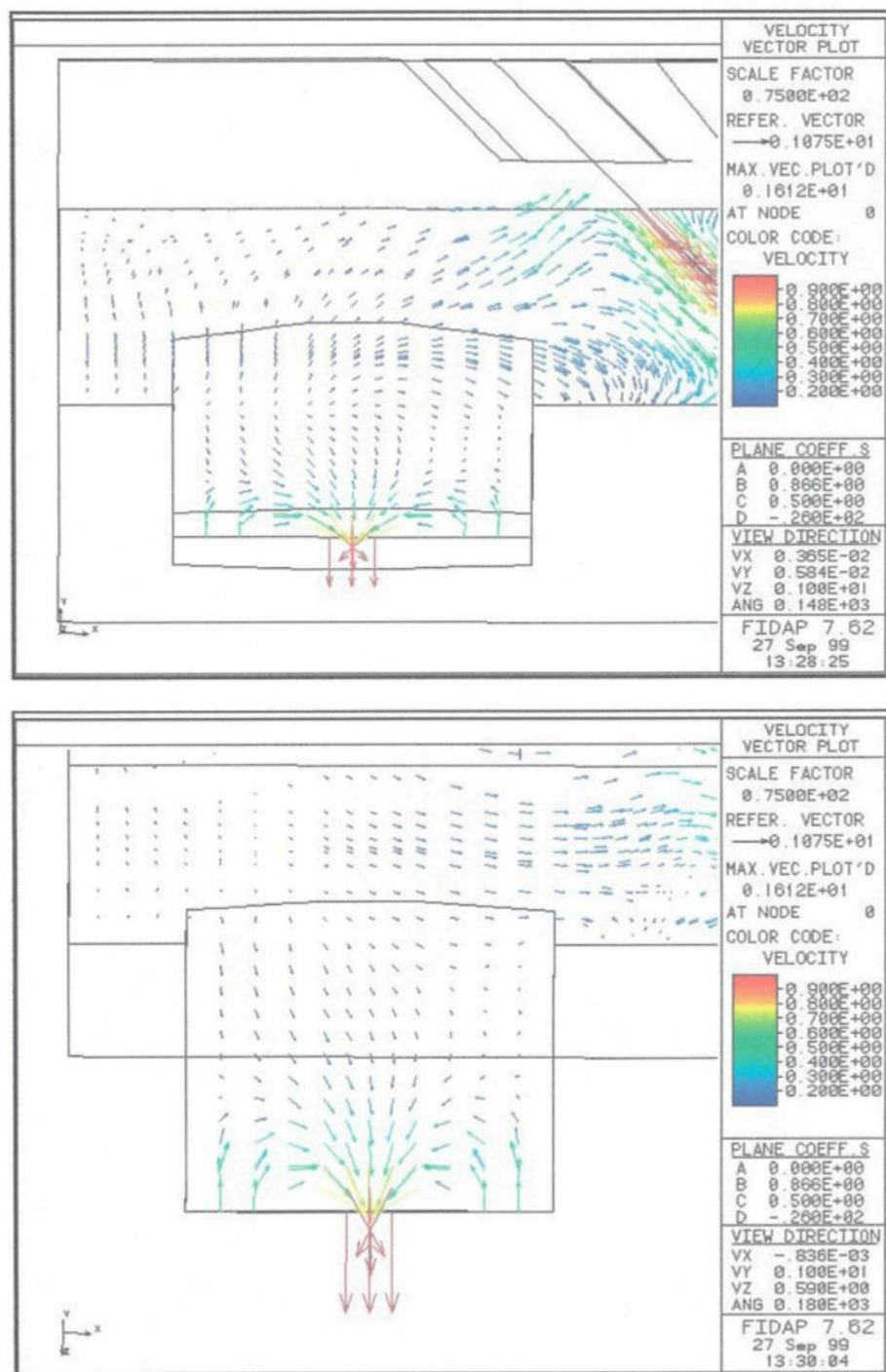


Figure 4.65 Effet de la présence des inducteurs et de la gorge sur l'écoulement dans un plan parallèle à la gorge

4.3 Tests industriels

Les résultats des tests effectués sur la ligne de galvanisation de Bethlehem Steel sont présentés et discutés dans cette section. Les événements arrivés lors des trois séries de tests et les résultats obtenus seront résumés. La variation des courbes de concentration d'aluminium dissout dans le bain par la variation de la température en fonction du temps au cours des tests seront présentées et discutées. Finalement, les comparaisons avec les analyses chimiques seront discutées.

4.3.1 Première série de tests: Effet du chauffage par induction seulement

La première série de tests consistait à connaître l'effet de la puissance des inducteurs sur l'écoulement dans le bain. Ainsi, la puissance des inducteurs a été ajustée à 10%, 50% et 100% de sa capacité pour des périodes de temps d'au moins 20 minutes. La concentration de l'aluminium effectif et la température ont été enregistrées continuellement à toutes les deux secondes pendant cette série de tests. Quelques lingots jumbos contenant 0.47% poids Al ont été ajoutés au bain et une période d'écumage du bain a été effectuée pendant les observations. Un échantillon du bain a été pris par le personnel technique de l'usine.

Le tableau 4.2 résume les différents événements survenus lors des essais. Pendant la période des tests, la vitesse de la feuille a varié de 2.24 à 2.31 m/s (440-454 pieds par minute) et sa température de 476 à 471°C (875-880°F). Sa largeur était de 1.397 m (55 pouces). Les lectures d'aluminium et de la température des quatre senseurs sont reportées à la figure 4.66. Les deux graphes du haut se rapportent aux senseurs 1 et 2 alors que ceux du bas sont les enregistrements des senseurs 3 et 4. Cette figure montre le détail des mesures prises au moment où les essais de changement de capacité ont eu lieu. Pour voir les courbes mesurées pour toute la durée de vie de ces capteurs (avant et après les essais), se référer à l'annexe C.

Sur ces graphiques, les changements de capacité des inducteurs sont indiqués par des barres verticales. On voit bien que les capteurs de température pour les quatre senseurs sont bien en phase bien qu'ils présentent de légères variations de quelques degrés (au plus, 4.5°C). La concentration de l'aluminium effectif est elle aussi en phase, sauf pour les sondes 1 et 2 après le temps 1.2 heure. À ce moment, l'une de ces sondes a été soit accidentellement accrochée soit légèrement perturbée par l'écumage. D'ailleurs, chacune des sondes a indiqué une légère différence en concentration d'Al et en température. Ces différences de valeurs peuvent être attribuées à de possible variations locales de concentration en aluminium et à l'erreur expérimentale.

4.3.1.1 Effet des additions de lingots jumbo

Les lingots jumbos (0.47% poids Al) ajoutés régulièrement au bain lors de ce test prenaient en moyenne une quinzaine de minutes à fondre. L'introduction de ces jumbos à l'arrière du bain dans le panier a eu pour effet de diminuer la température localement tel qu'observé aux capteurs 1 et 2 (figure 4.66). Les capteurs 3 et 4 montrent aussi un changement de la température après l'ajout de lingots et de l'augmentation de la capacité des inducteurs, mais cet effet est amoindri et arrive après un déphasage d'au moins 2.4 minutes (figure 4.66).

4.3.1.2 Effet des changements de la température

Une des observations importantes à retenir selon cette série de tests, est l'augmentation de la concentration en aluminium effectif lors de l'augmentation de la température. Cet effet connu est particulièrement observé lors de l'augmentation de la capacité des inducteurs à 100% où la concentration d'Al passe, en moyenne de 0.148 à 0.153% poids pour les sondes 1 et 2 de 0.158 à 0.160% pour la sonde 3 et de 0.148 à 0.152% poids Al pour la sonde 4 lorsque la température passe (en moyenne) de 463°C à 469°C.

Comme les sondes mesurent l'aluminium effectif en équilibre avec la phase $\text{Fe}_2\text{Al}_5\text{Zn}_x$ en présence dans le bain, il est normal de voir la composition d'aluminium changer avec la température. Ceci correspond à la dissolution des intermétalliques de surface et en suspension qui contribuent à l'augmentation de l'aluminium dissout. Selon l'équation de solubilité de Tang, $\ln[\text{Fe}]^2[\text{Al}]^5 = 32.3 + 36133/T$, une augmentation de 5°C du bain augmente la solubilité de l'aluminium d'à peu près 0.003% et de celle du fer d'à peu près 0.0025% poids. Les augmentations observées par ces tests sont près de cet ordre de grandeur.

POSITION DES SONDES YAMARI

ET DES ENDROITS D'ADDITION

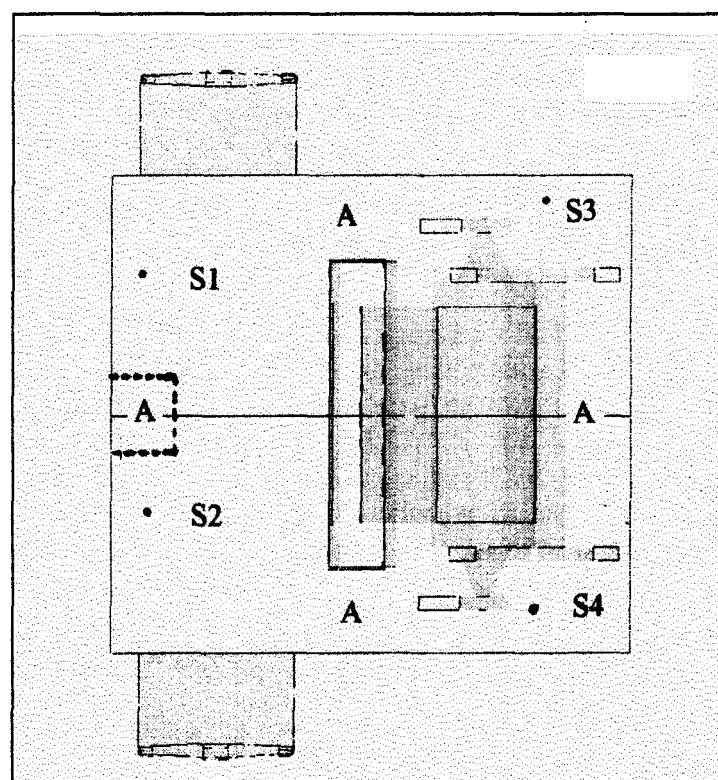


Tableau 4.2 Événements survenus lors des tests industriels effet de la capacité des inducteurs

Paramètres	Temps (heure)	Événements
Vitesse feuille: 2.24 m/s Largeur feuille: 1.397 m	0,3	Inducteur de 17% à 10%
	0,7	Inducteur de 10% à 50%
	0,74	Prise d'échantillon pour analyse (Bethlehem Steel)
	0.76 à 0.96	Ajout et fusion d'un jumbo (0.47% poids Al)
Vitesse feuille: 2.28 m/s Température feuille: 468°C Puissance des inducteurs: # 1 : 234 kW # 2 : 227 kW	1.18 à 1.25	Écumage à l'arrière et côté sud-ouest
	1.28 à 1.37	Ajout et fusion d'un jumbo (0.47% poids Al)
	1,53	Inducteurs de 50% à 100%
	1,8	Ajout et fusion d'un jumbo (0.47% poids Al)
Vitesse feuille: 2.31 m/s Température feuille: 471°C Puissance des inducteurs: # 1 : 464 kW # 2 : 456 kW	1,86	Inducteurs mode automatique

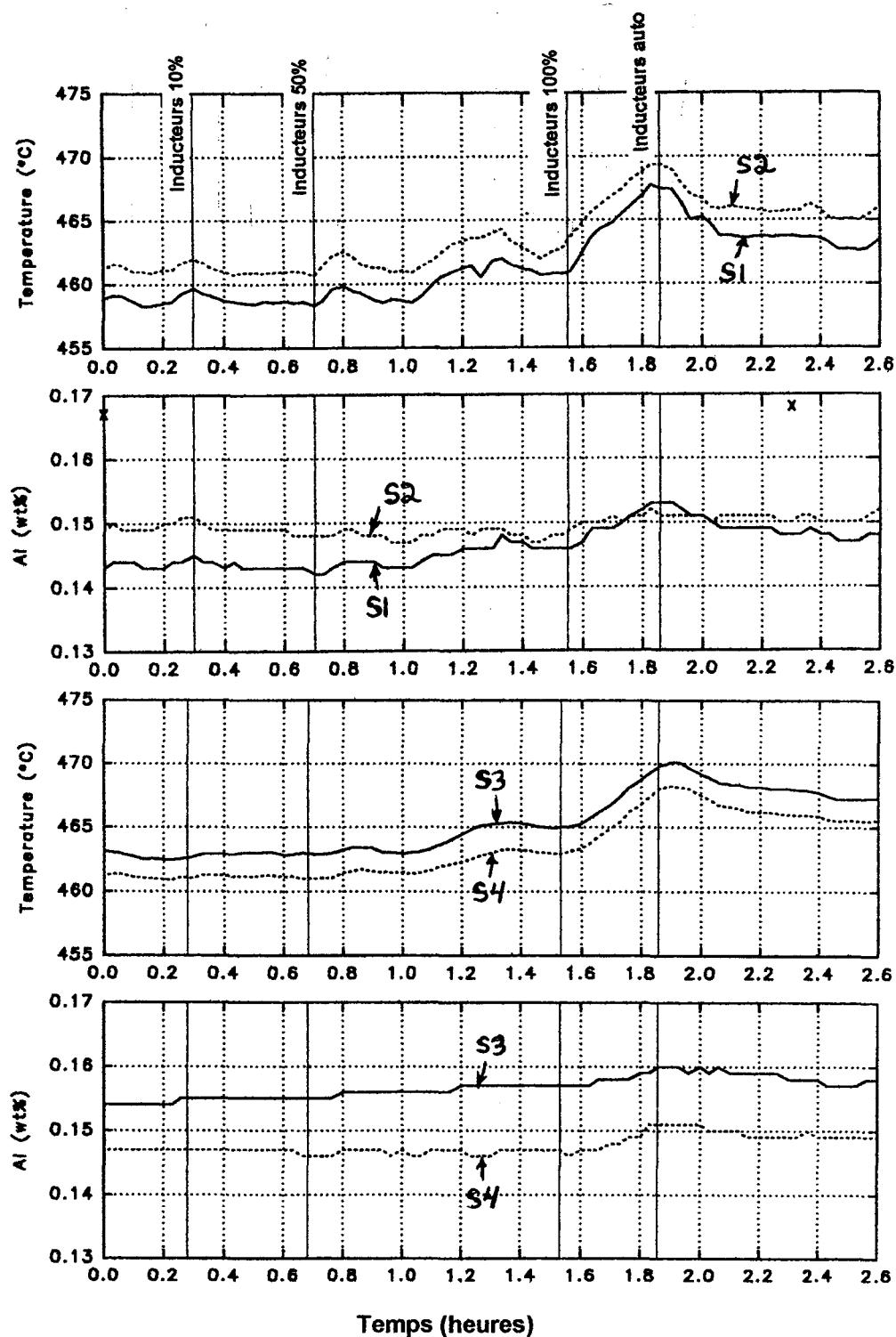


Figure 4.66 Mesures de l'aluminium et de la température, effet de la capacité des inducteurs

4.3.2 Deuxième série: Effet des additions avec chauffage

La deuxième série de tests consistait à utiliser des lingots riches en aluminium comme traceur dans le bain afin de visualiser la concentration de l'aluminium en fonction du temps sous l'effet de la variation de la puissance de chauffage des inducteurs. Pour cette fin, cette série de tests s'est faite pour les mêmes capacités de chauffage des inducteurs que précédemment, soit à 10%, 50% et 100%. Après au moins vingt minutes, et à chaque étape, vingt lingots riches en aluminium ont été ajoutés à l'arrière du bain, dans le panier prévu pour l'ajout des lingots réguliers. Après l'ajout, trois échantillons du bain ont été pris à la cuillère à des intervalles d'une dizaine de minutes (0.17 heures) près de chacune des positions des quatre senseurs. La première prise d'échantillons s'est faite tout de suite après l'addition de traceurs. De la même façon que précédemment, l'enregistrement de la concentration en aluminium effectif et de la température s'est effectué continuellement aux deux et à la minute (pour plus de précision quant aux petits changements de concentration).

4.3.2.1 Résultats des mesures des sondes Yamari

Le tableau 4.3 résume les événements survenus au cours de l'expérimentation. Lors du déroulement des tests, la vitesse de la feuille a varié de 1.14 à 1.19 m/s (381 à 398 ppm), sa température de 468°C à 464°C (874°F à 867°F) et sa largeur était de

1.52 m (59.89 pouces). La figure 4.67 montre les graphiques de la variation de la concentration en Al effectif et de la température pour les capteurs 1 à 4 pendant le déroulement des expériences d'addition de lingots riches en aluminium tel que décrit dans le tableau 4.3. Pour voir les courbes mesurées pour toute la durée de vie de ces capteurs (avant et après les essais), se référer à l'annexe C.

Pour chacun des essais de cette série, la première manoeuvre consistait à placer la capacité des inducteurs au pourcentage voulu et à laisser la température se stabiliser. Pour le premier essai, la capacité des inducteurs a été placée à 10%. Pendant cette étape, la température du bain a diminué graduellement en dessous de la valeur normale de contrôle de 460°C ($\pm 5^\circ\text{C}$ selon le capteur). Ceci implique qu'à 10% de leur capacité, les inducteurs ne fournissent pas assez de chaleur pour maintenir la température à 460°C.

Une fois la température fixée, la tâche consistait à ajouter les petits lingots riches en aluminium (4% Al) à l'arrière du bain. L'addition des ces lingots a eu pour effet de créer un pic de concentration d'aluminium sur le capteur 2 qui se trouve près de l'addition (figure 4.67). Par contre, le capteur 1, situé aussi à l'arrière n'a pas enregistré un tel pic. Ceci est probablement dû au fait que le senseur numéro 1 est plus loin de la position de l'addition mais aussi et surtout parce qu'il n'existe que très peu de mouvement à l'arrière du bain, tout particulièrement en présence de la plaque déflectrice et à basse capacité des inducteurs. Le traceur d'aluminium a été par la

suite détecté à l'avant aux senseurs 3 et 4 à peu près 3.6 minutes après l'addition. La réponse à l'avant prend de la forme d'une lente augmentation graduelle de 0.002 à 0.003% poids Al. Cette augmentation graduelle indique que le traceur a été dispersé lors de son passage dans les différentes zones du bain.

La deuxième étape consistait à placer la capacité des inducteurs à 50% et à attendre la stabilisation de la température. Dans ce cas, on assiste à une augmentation moyenne de trois degrés de la température lue par chaque capteur. L'addition de traceur d'aluminium a le même effet que précédemment: on observe un pic de concentration d'aluminium au niveau du senseur numéro 2. Ce pic est par contre plus petit que précédemment. La réponse à l'avant apparaît à peu près 2.4 minutes plus tard tel qu'indiqué sur la figure 4.67. Ceci indique qu'à plus haute température, l'écoulement (ou le mixage) est un peu plus rapide.

Lors de l'augmentation de la capacité des inducteurs à 100%, la température du bain a rapidement grimpé d'une dizaine de degrés à l'heure. Cette augmentation de température a rapidement entraîné une augmentation de l'aluminium effectif contenu dans le bain. Sur le graphe de la figure 4.67, la concentration en Al a augmenté de 0.155 à 0.163% poids pour le senseur 2, de 0.150 à 0.155% pour le senseur 1, de 0.158 à 0.165% pour le senseur 3 et de 0.155 à 0.162% pour le senseur 4. On attribue cette augmentation d'aluminium à la fois à l'augmentation de la solubilité de l'aluminium et aux additions de traceurs. Lors de cet essai, on ne peut

Tableau 4.3 Événements survenus lors des tests industriels effet de la capacité des inducteurs et de l'ajout de traceurs

Paramètres	Temps (heures)	Événements
Vitesse feuille: 1.14 m/s	0,15	Ajout et fusion d'un jumbo (0.47% poids Al)
Température feuille: 468°C	0,19	Inducteurs de 50 à 10%
Largeur feuille : 1.52 m	0,5	20 lingots à l'arrière
Puissance des inducteurs:	0,57	Échantillons I-1, 1
# 1 : 50 kW	0,74	Ajout et fusion d'un jumbo (0.47% poids Al)
# 2 : 46 kW	0,84	Échantillons I-1, 2
	0,96	Échantillons I-1, 3
Vitesse feuille : 1.19 m/s	1,02	Inducteurs de 10% à 50%
Puissance des inducteurs:	1.63 à 1.67	20 lingots à l'arrière
# 1 : 234 kW	1,65	Ajout et fusion d'un jumbo (0.47% poids Al)
# 2 : 237 kW	1,7	Échantillons I-2, 1
	1,8	Échantillons I-2, 2
	1,94	Ajout et fusion d'un jumbo (0.47% poids Al)
	2	Échantillons I-2, 3
Vitesse feuille: 1.19 m/s	2,1	Inducteurs 50 à 100%
Puissance des inducteurs:		
# 1 : 464 kW		
# 2 : 455 kW		
Température feuille 464°C	2,22	Ajout et fusion d'un jumbo (0.47% poids Al)
	2,47	17 lingots à l'arrière (3 mis sur le côté par erreur)
	2,52	Échantillons I-3, 1
	2,7	Échantillons I-3, 2
	2,9	Échantillons I-3, 3
	3	Mode automatique des inducteurs

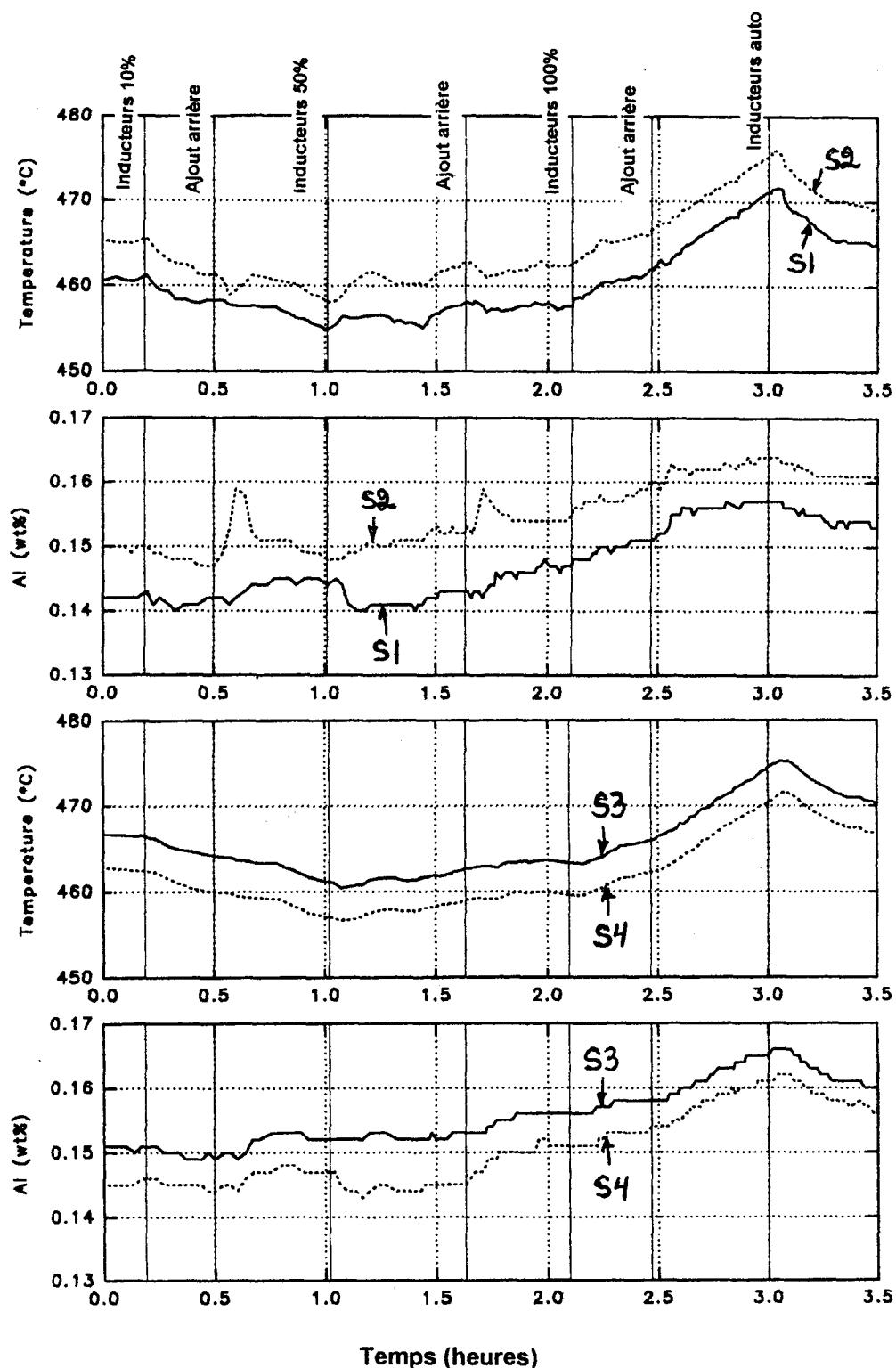


Figure 4.67 Mesures de l'aluminium et de la température effet de la capacité des inducteurs et de l'ajout de traceurs

plus détecter clairement la présence du traceur à cause de la haute température qui permet à l'aluminium présent dans les intermétalliques de se dissoudre dans le bain en plus grande quantité, mais aussi à cause de l'augmentation du mélange par induction à l'arrière du bain.

L'enregistrement continu de la température montre que lorsque la capacité des inducteurs est ramenée au mode automatique (placé à 460°C), un pic s'est formé sur les courbes dû à l'augmentation précédente de la température. Ce pic enregistré aux sondes 1 et 2 est aussi enregistré aux sondes 3 et 4 mais seulement 3.0 minutes plus tard. Cette période est légèrement plus petite que le temps de réponse donné par les traceurs d'aluminium pour la même capacité d'inducteurs et pour une vitesse de ligne comparable. Cette observation peut être attribuée à la distance relative plus courte qu'une impulsion de température a à voyager pour atteindre les senseurs en comparaison avec le chemin que doit effectuer l'aluminium traceur. En effet, l'aluminium pour se rendre de l'arrière à l'avant du bain, est diffusé dans le fluide, transporté par l'écoulement, mixé dans les différentes zones tout en subissant des réactions (intermétalliques et couche inhibitrice). La température, par contre peut voyager plus rapidement car elle peut traverser plus facilement l'écoulement étant donné la bonne conductivité thermique du zinc (63 W.m⁻¹K⁻¹, Guthrie, 1992).

4.3.2.2 Résultats des analyses

À la position de chacune des sondes, et pour chacune des capacités imposées des inducteurs, trois échantillons ont été prélevés à des intervalles moyens de 10 minutes. Les échantillons ont été numérotés selon le code suivant:

I-i, x-y

où i indique la capacité de chauffage des inducteurs: (1⇒10%, 2⇒50%, 3⇒100%),

x indique le numéro de l'échantillon (1, 2 et 3),

et y indique le numéro du senseur près duquel a été prélevé l'échantillon.

Chacun de ces échantillons a été analysé (ICP) par Cominco pour en connaître la composition en aluminium total et en fer total. Ensuite, à l'aide du logiciel DEAL (Determine Effective Aluminium), l'aluminium effectif et le fer dissout ont été calculés. On retrouve la liste des échantillons, le temps de prélèvement de ceux-ci lors de ces tests, la mesure en aluminium effectif par les sondes et les résultats des analyses au Tableau 4.4.

Les résultats de la teneur en aluminium ont été reportés sous forme de

graphique (figure 4.68 et 4.69). La figure 4.68 illustre la variation de la teneur en aluminium total et effectif, mesurés et calculés pour les trois tests et les quatre positions de capteurs, en fonction du temps. Sur ce graphe, la teneur en aluminium total est plus élevée pour les positions à l'arrière du bain (sondes 1 et 2). À ces positions, l'aluminium total est très élevé au temps t_2 pour ensuite diminuer rapidement à une valeur près de la normale au temps t_3 . Cette variation est moins marquée à l'avant du bain (sondes 3 et 4). L'augmentation plus marquée de l'aluminium total aux sondes 1 et 2 indique qu'il y a plus d'intermétalliques qui se forment à l'arrière du bain, là où les additions de lingots riches en aluminium sont faites.

La figure 4.69 montre le même graphe mais en omettant d'y inclure l'aluminium total. Ceci permet de mieux comparer l'aluminium effectif mesuré par les sondes et celui calculé par le logiciel DEAL. L'observation de ces graphes permet de voir qu'à mesure que la capacité des inducteurs augmente, (augmentation de la température), la teneur en aluminium effectif augmente aussi. Les valeurs mesurées par les sondes et celles calculées sont assez proches les unes des autres. Cependant, on y retrouve souvent une différence plus élevée que celle anticipée par les fabricants des capteurs ($\pm 2\%$ de la valeur mesurée). Cette différence peut être attribuable à plusieurs facteurs tels que l'erreur sur les analyses, l'erreur sur les calculs de l'Al effectif, etc. Il est aussi possible que l'erreur relative attribuée aux mesures des sondes soit plus élevée que réclamée par les fabricants.

Les courbes de la figure 4.69 indiquent aussi que l'augmentation de la capacité des inducteurs à 100% occasionne plus de mélange. En effet, les mesures et calculs de l'aluminium effectif à la position de chacun des capteurs, dans ces conditions, présentent des courbes moins étendues et dispersées les unes des autres que pour les tests à 10% et 50% de la capacité des inducteurs.

Tableau 4.4 Analyses des échantillons prélevés et mesures des sondes, effet de la capacité des inducteurs et de l'ajout de traceurs

SAMPL E	TEMP (°C)	BATH AI (wt%)	BATH Fe (wt%)	EFF. AI DEAL (wt%)	EFF. AI SENSOR S(wt%)	SOL. Fe (wt%)	Fe ₂ Al ₅ (vol%)	DELTA (vol%)
I-1, 1-1	458	1,4	1,13		0,144			
I-1, 1-2	459	0,177	0,05	0,149	0,153	0,02	0,1	0
I-1, 1-3	464	0,156	0,04	0,147	0,15	0,03	0,03	0
I-1, 1-4	460	0,169	0,05	0,143	0,144	0,03	0,09	0
I-1, 2-1	456	0,264	0,134	0,135	0,145	0,03	0,457	0,06
I-1, 2-2	460	0,204	0,08	0,142	0,151	0,03	0,221	0
I-1, 2-3	462	0,163	0,04	0,147	0,152	0,03	0,06	0
I-1, 2-4	458	0,166	0,04	0,143	0,148	0,03	0,08	0
I-1, 3-1	455	0,16	0,04	0,141	0,145	0,02	0,07	0
I-1, 3-2	460	0,158	0,04	0,144	0,149	0,03	0,05	0
I-1, 3-3	461	0,157	0,03	0,15	0,152	0,02	0,03	0
I-1, 3-4	458	0,161	0,04	0,142	0,147	0,03	0,07	0
I-2, 1-1	458	0,203	0,07	0,145	0,145	0,02	0,206	0
I-2, 1-2	462	0,178	0,04	0,152	0,157	0,02	0,09	0
I-2, 1-3	463	0,175	0,05	0,147	0,155	0,03	0,1	0
I-2, 1-4	459	0,162	0,04	0,144	0,149	0,03	0,07	0
I-2, 2-1	458	0,207	0,08	0,142	0,146	0,03	0,233	0
I-2, 2-2	462	0,168	0,04	0,147	0,155	0,03	0,08	0
I-2, 2-3	463	0,162	0,04	0,148	0,156	0,03	0,05	0
I-2, 2-4	460	0,16	0,04	0,145	0,15	0,03	0,05	0

Tableau 4.4 (suite) Analyses des échantillons prélevés et mesures des sondes, effet de la capacité des inducteurs et de l'ajout de traceurs

SAMPL E	TEMP (°C)	BATH Al (Wt%)	BATH Fe (wt%)	EFF. AI DEAL (wt%)	EFF. AI SENSOR S(wt%)	SOL. Fe (wt%)	Fe ₂ Al ₅ (vol%)	DELTA (vol%)
I-2, 3-1	457	0,169	0,04	0,145	0,146	0,02	0,09	0
I-2, 3-2	462	0,166	0,04	0,15	0,154	0,03	0,06	0
I-2, 3-3	463	0,164	0,04	0,149	0,156	0,03	0,05	0
I-2, 3-4	460	0,162	0,04	0,147	0,151	0,02	0,05	0
I-3, 1-1	464	0,206	0,07	0,151	0,155	0,03	0,197	0
I-3, 1-2	467	0,168	0,04	0,157	0,159	0,03	0,04	0
I-3, 1-3	467	0,161	0,03	0,154	0,159	0,03	0,02	0
I-3, 1-4	464	0,166	0,03	0,154	0,155	0,02	0,05	0
I-3, 2-1	467	0,17	0,04	0,155	0,156	0,03	0,06	0
I-3, 2-2	470	0,166	0,04	0,157	0,162	0,03	0,03	0
I-3, 2-3	470	0,169	0,04	0,155	0,162	0,03	0,05	0
I-3, 2-4	466	0,165	0,04	0,154	0,158	0,03	0,04	0
I-3, 3-1	471	0,168	0,04	0,157	0,157	0,03	0,04	0
I-3, 3-2	474	0,164	0,04	0,158	0,164	0,03	0,02	0
I-3, 3-3	474	0,165	0,04	0,158	0,165	0,03	0,02	0
I-3, 3-4	469	0,164	0,04	0,156	0,16	0,03	0,03	0

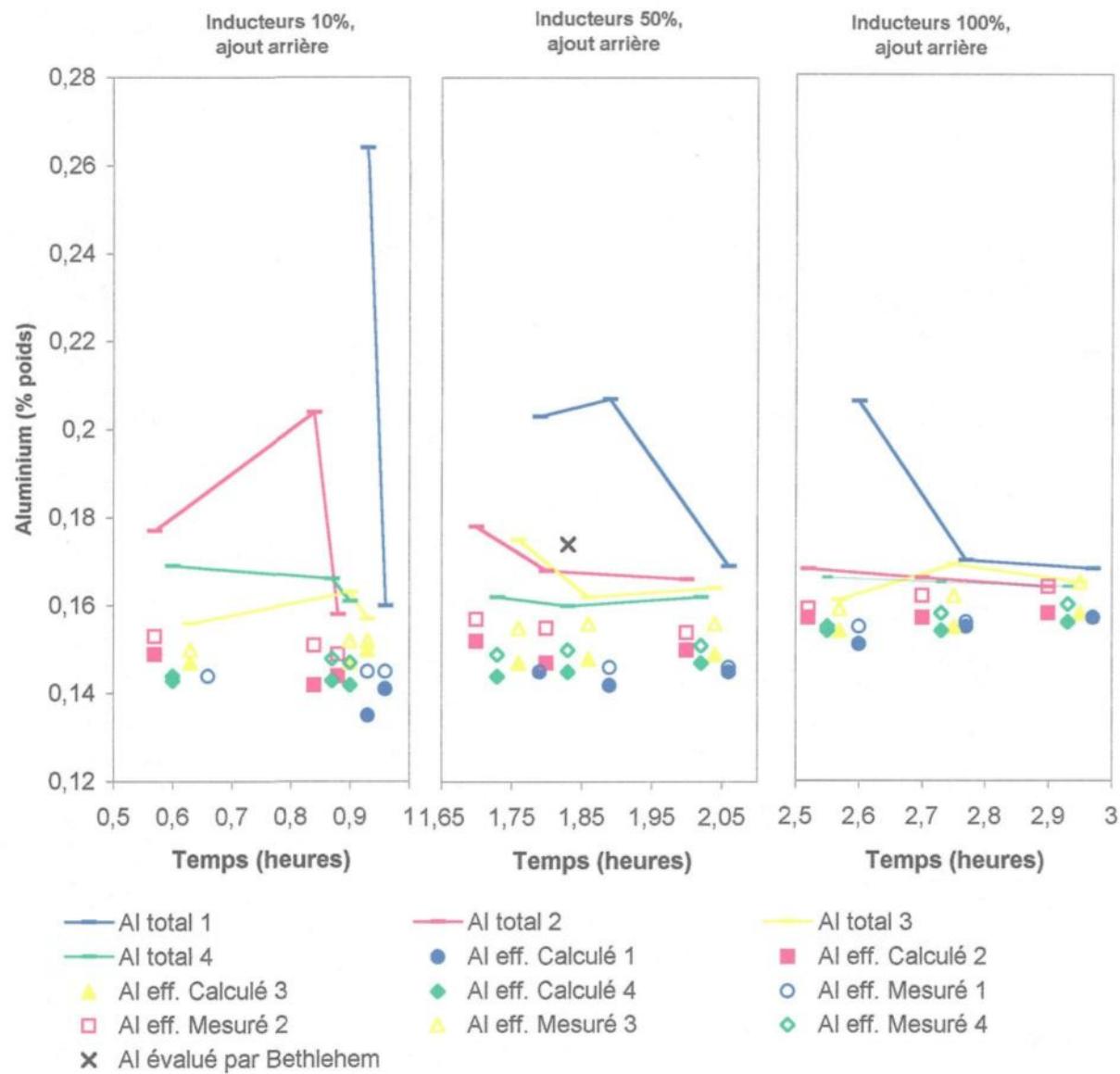


Figure 4.68 Comparaison entre l'Al effectif mesuré et les valeurs d'aluminium total et effectif calculées, effet de la capacité des inducteurs et de l'ajout de traceurs

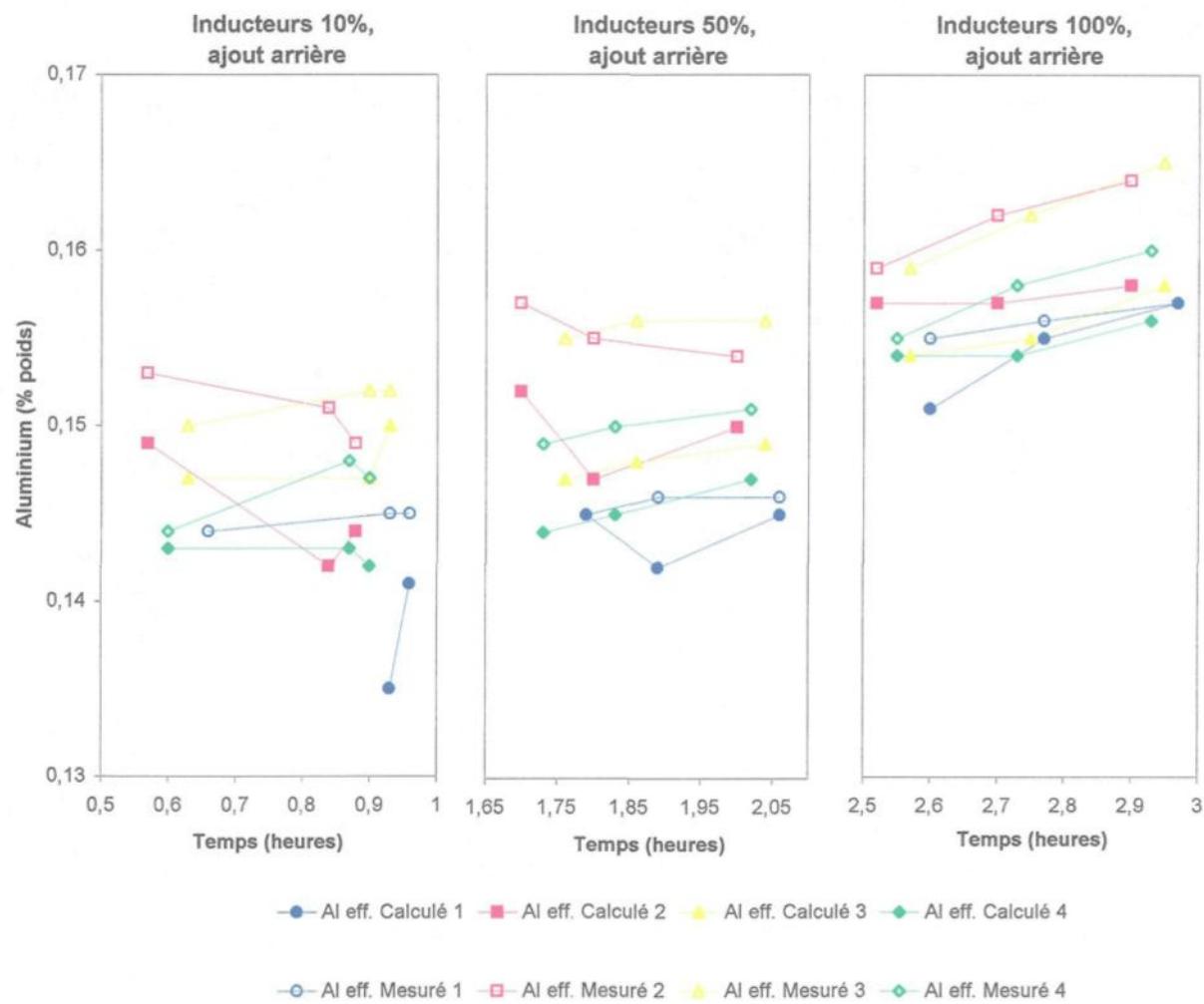


Figure 4.69 Comparaison entre les valeurs d'aluminium effectif calculées et mesurées, effet de la capacité des inducteurs et de l'ajout de traceurs

4.3.3 Troisième série: Effet de la position des additions, sans chauffage

La troisième série de tests consistait à connaître l'effet de la position de l'addition de lingots sur le mélange dans le bain. Trois différentes positions d'addition de petits lingots riches en aluminium ont été choisies, soit, à l'avant, du côté ouest et du côté est (près de la cloche). Les trois additions ont été suivies de prises d'échantillons de la même manière que pour la deuxième série de tests. L'enregistrement de la température et de la composition s'est aussi effectué comme précédemment en conservant, par contre, la puissance des inducteurs en mode automatique. Pour ce qui est des tests avec ajouts de traceur à l'arrière, la deuxième série de tests consiste en notre base de données ainsi que la dernière série de tests (transition) où les additions ont principalement été faites à l'arrière.

4.3.3.1 Résultats des mesures des sondes Yamari

Le tableau 4.5 illustre la série d'événements relatifs aux tests d'addition. Cette série de tests s'est faite à la suite des essais d'addition avec chauffage. Durant la période des additions et de l'échantillonnage, la vitesse de la feuille a varié de 2.03 à 1.53 m/s (399 - 302 pieds par minute) et sa température était de 459°C. La figure 4.70 montre la composition et la température en fonction du temps pour ces additions.

La première addition a été effectuée du côté ouest, près du snout, 38 minutes après le retour en mode automatique des inducteurs, suite aux tests précédents. Lors de l'introduction de ces lingots riches en aluminium, un événement observé a permis d'avoir un indice sur le sens de l'écoulement dans cette région: une fois le premier lingot ajouté, il a plongé sous le snout pour ensuite ressortir à la surface du bain près de la sonde numéro 2. Cependant, cet événement n'a pas été reproduit pour les autres lingots.

Après cette addition, on s'attendait à voir une augmentation de l'aluminium au sondes 2 et 4 situées à l'ouest. Malheureusement, peu de variations ont été enregistrées aux endroits prévues. La sonde numéro 2 montre même une diminution de la concentration en aluminium effectif. Par contre, la sonde 1 enregistre une augmentation du pourcentage en aluminium. Il est probable que le faible mixage de la région arrière soit la cause de ces effets. Les variations d'aluminium effectif enregistrées par les sondes de l'arrière du bain sont probablement très localisées à leur position.

La sonde 3 enregistre aussi une diminution de la teneur en aluminium. Par contre, la sonde 4 a enregistré une légère augmentation de la concentration en aluminium, tel qu'anticipé. Cette augmentation est très petite et il est difficile de conclure quoi que ce soit sur ce test.

Il est très probable que le facteur principal de la diminution en aluminium effectif aux sondes 2 et 3 soit la diminution de la température, suite au retour au mode automatique des inducteurs. La température cible du bain n'était pas encore atteinte au moment de l'ajout à la position ouest du bain.

Suite à ce test, la sonde numéro 2 a dû être changée pour une nouvelle sonde, c'est pourquoi on observe une coupure sur le graphe de la figure 4.70. De plus, il semble y avoir eu une perturbation sur la sonde 3. Celle-ci a brusquement enregistré une montée peu représentative de la teneur en aluminium mesurée dans l'échantillon prélevé à cet endroit (voir sections suivantes). Il est possible que l'échantillon prélevé au temps 4.07 ait perturbé cette sonde et qu'on doive retrancher au moins 0.07% poids Al aux valeurs enregistrées.

La deuxième addition de cette série de tests a été effectuée du côté est du bain, près de la cloche. Cette addition devrait entraîner une augmentation de l'aluminium aux sondes 1 et 3. Effectivement, ces deux sondes enregistrent des augmentations de 0.003% pour la sonde 1 et de 0.002% pour la sonde 3. Ces augmentations sont graduelles, ce qui indique que le traceur a été dispersé par son passage dans le bain. La sonde 4 enregistre aussi une augmentation semblable à celle de la sonde 3. Le mélange dans cette région est très efficace. La sonde 2 aussi enregistre une augmentation d'aluminium, mais il est difficile de se fier à cette lecture étant donné que d'après la courbe, cette nouvelle sonde ne semble pas encore très

stable suite à son introduction dans le bain.

La dernière partie de cette série de tests consistait à ajouter le traceur à l'avant du bain. L'addition de lingots dans cette région devrait entraîner une augmentation d'aluminium aux sondes 3 et 4. C'est ce qu'on observe à la figure 4.70; ces deux sondes augmentent graduellement leurs lectures de 0.003% poids Al de façon très symétrique, tel qu'on doit s'y attendre. Encore une fois, l'augmentation est graduelle, ce qui indique une zone bien mélangée. Les sondes 1 et 2 enregistrent sensiblement la même augmentation, et apparemment, sans décalage par rapport aux sondes de l'avant du bain. Ceci s'explique probablement par le fait que les additions ont dû fondre et se mélanger très vite, en passant sous le bain, tel que l'écoulement calculé numériquement démontre. Le pic vers le bas observé à la sonde 2 est une variation très locale qui peut être due à un dépôt d'intermétalliques sur la sonde.

Tableau 4.5 Événements survenus lors des tests industriels, effet des additions de traceur

Paramètres	Temps (heure)	Événements
Vitesse feuille: 2.03 m/s Température feuille: 459°C Puissance des inducteurs: # 1 : 271 kW # 2 : 264 kW	3,63	20 lingots côté ouest près du snout, plongeon vers le snout et retour à l'arrière vers la sonde no 2
	3.68 à 3.70	Échantillons D-1, 1
	3.85 à 3.86	Échantillons D-1, 2
	3,86	Ajout et fusion d'un jumbo (0.47% poids Al)
	4,07	Échantillons D-1, 3
	5,85	20 lingots côté est près du snout
	5.88-5.97	Échantillons D-2, 1
	6.08-6.13	Échantillons D-2, 2
Vitesse feuille: 1.75 m/s Puissance des inducteurs: # 1 : 160 kW # 2 : 162 kW	6.31-6.34	Échantillons D-2, 3
Vitesse feuille: 1.53 m/s	6.43-6.47	20 lingots à l'avant
	6.51-6.53	Échantillons D-3,1
	6,55	Ajout et fusion d'un jumbo (0.47% poids Al)
Vitesse feuille : 1.75 m/s Puissance des inducteurs: # 1 : 76 kW # 2 : 72 kW	6,69	Échantillons D-3, 2
Puissance des inducteurs: # 1 : 290 kW # 2 : 283 kW	6.86-6.91	Échantillons D-3, 3

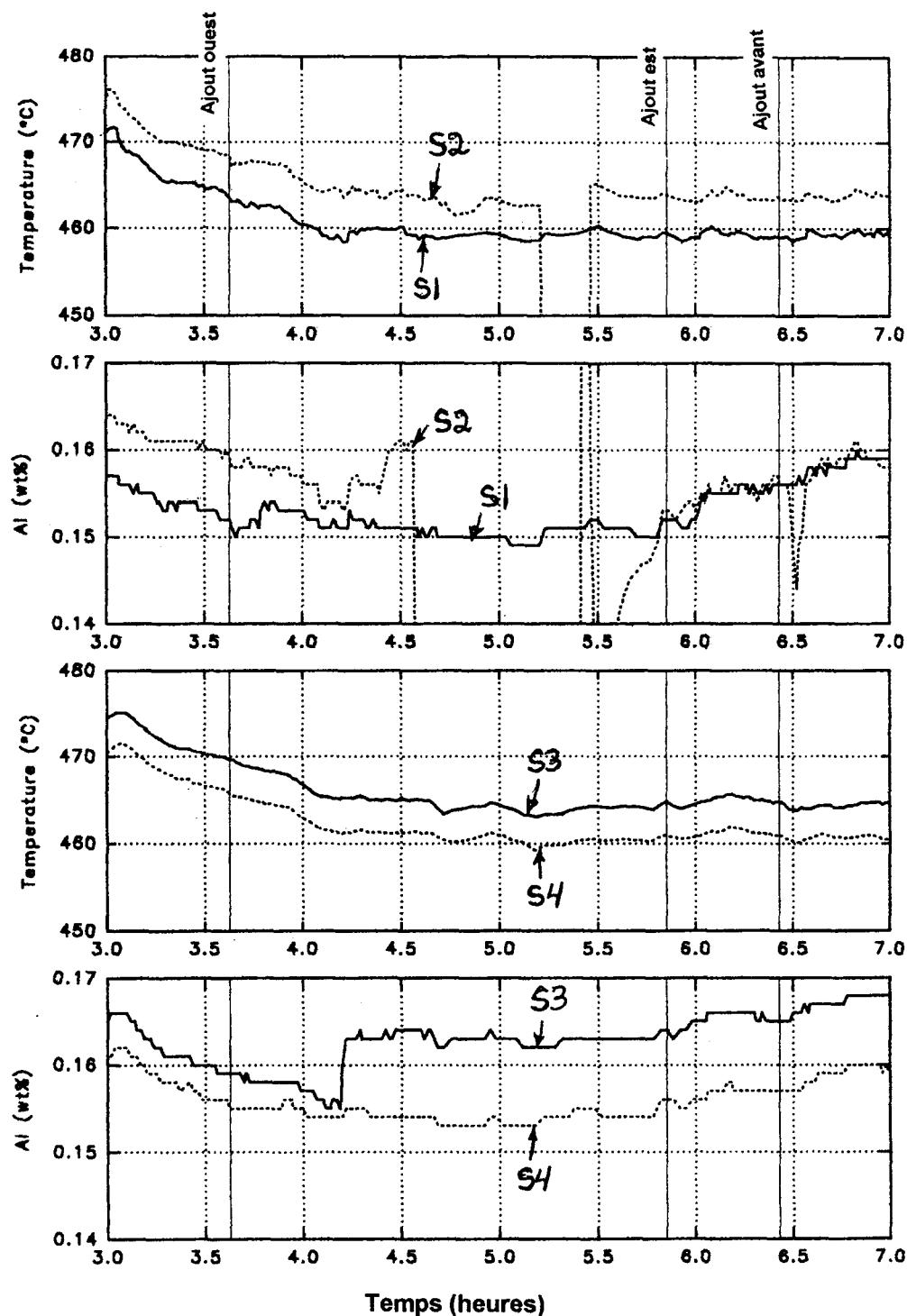


Figure 4.70 Mesures de l'aluminium et de la température effet des additions de traceurs

4.3.3.2 Résultats des analyses

À la position de chacune des sondes, et pour chacune des additions, trois échantillons ont été prélevés à des intervalles moyens de 10 minutes. Les échantillons ont été numérotés selon le code suivant:

D-i, x-y

où i indique la position de l'addition: (1⇒Ouest, 2⇒Est, 3⇒Avant),

x indique le numéro de l'échantillon (1, 2 et 3),

et y indique le numéro du senseur près duquel a été prélevé l'échantillon.

Chacun de ces échantillons a été analysé par Cominco pour en connaître la composition en aluminium total et en fer total. Ensuite, à l'aide du logiciel DEAL (Determine Effective Aluminium), l'aluminium effectif et le fer dissout ont été calculés. On retrouve la liste des échantillons, le temps de prélèvement de ceux-ci lors de ces tests, la mesure en aluminium effectif par les sondes et les résultats des analyses au Tableau 4.6.

Les résultats de la teneur en aluminium ont été reportés sous forme de graphique (figure 4.71 et 4.72). La figure 4.71 illustre la variation de la teneur en aluminium total et effectif, mesurés et calculés pour les trois tests et les quatre positions de capteurs, en fonction du temps. Sur ce graphe, la teneur en aluminium

total est plus élevée pour la position du capteur 1. À cette position, l'aluminium total est toujours très élevé au temps t_1 pour ensuite diminuer rapidement à une valeur près de la normale au temps t_3 . Cette variation est moins marquée à l'avant du bain (sondes 3 et 4) et à la sonde 2. L'augmentation plus marquée de l'aluminium total à la sonde 1 indique qu'il y a plus d'intermétalliques qui se forment à cet endroit où il existe peu de mouvement. Normalement, on devrait observer la même chose pour la sonde 2, ce qui n'est pas le cas. Il est probable que la sonde 1, qui est plus en retrait, se trouve dans une zone stagnante.

La figure 4.72 montre les teneurs en aluminium effectif mesurées par les sondes et calculées par DEAL. Les valeurs sont regroupées entre 0.15 et 0.16% poids Al sauf pour les valeurs mesurées par la sonde 3. En y retranchant 0.07% poids Al, tel que suggéré plus haut, on retrouvera des valeurs plus près de la réalité. Ce graphe, comparé à la figure 4.68 montre en général des valeurs d'aluminium effectif plus élevées de 0.01% et ces valeurs sont plus regroupées, ce qui indique que le mélange s'est fait plus rapidement avec des ajouts à l'avant, à l'est et à l'ouest qu'à l'arrière où le mélange est très faible.

Pour les ajouts à l'est et à l'avant, on assiste en général à une légère augmentation de l'aluminium effectif. On observe très peu cet effet pour les ajouts à l'ouest. Ceci provient de la diminution en température simultanée à cette addition qui entraîne la formation de plus d'intermétalliques.

Tableau 4.6 Analyses des échantillons prélevés et mesures des sondes, effet des additions de traceur

SAMPLE	TEMP (°C)	BATH Al (wt%)	BATH Fe (wt%)	EFF. AI DEAL (wt%)	EFF AI SENSORS (wt%)	SOL. Fe (wt%)	Fe ₂ Al ₅ (vol%)	Delta (Vol%)
D-1, 1-1	462,6	0,23	0,061	0,175	0,151	0,02	0,2	0
D-1, 1-2	467,7	0,16	0,038	0,152	0,158	0,03	0	0
D-1, 1-3	468,9	0,17	0,042	0,156	0,159	0,03	0,1	0
D-1, 1-4	465,2	0,16	0,033	0,154	0,155	0,03	0	0
D-1, 2-1	462,2	0,16	0,034	0,152	0,153	0,02	0	0
D-1, 2-2	467,2	0,16	0,033	0,155	0,158	0,03	0	0
D-1, 2-3	468	0,16	0,032	0,156	0,158	0,03	0	0
D-1, 2-4	466,3	0,16	0,032	0,153	0,155	0,03	0	0
D-1, 3-1	455,1	0,17	0,036	0,149	0,151	0,02	0,1	0
D-1, 3-2	464,4	0,17	0,037	0,154	0,156	0,03	0,1	0
D-1, 3-3	465,3	0,17	0,041	0,153	0,155	0,03	0,1	0
D-1, 3-4	461,7	0,16	0,033	0,152	0,154	0,02	0	0
D-2, 1-1	458,9	0,21	0,072	0,15	0,152	0,02	0,22	0
D-2, 1-2	463,6	0,18	0,044	0,154	0,153	0,02	0,1	0
D-2, 1-3	464,2	0,19	0,052	0,154	0,164	0,03	0,12	0
D-2, 1-4	460,6	0,17	0,038	0,153	0,155	0,02	0,1	0
D-2, 2-1	459,5	0,17	0,034	0,154	0,155	0,02	0,1	0
D-2, 2-2	464,4	0,17	0,034	0,156	0,155	0,02	0	0
D-2, 2-3	465,3	0,17	0,04	0,155	0,166	0,03	0,1	0
D-2, 2-4	460,3	0,17	0,04	0,153	0,157	0,02	0,1	0

Tableau 4.6 (suite) Analyses des échantillons prélevés et mesures des sondes, effet des additions de traceur

SAMPLE	TEMP (°C)	BATH Al (wt%)	BATH Fe (wt%)	EFF. AI DEAL (wt%)	EFF AI SENSORS (wt%)	SOL. Fe (wt%)	Fe ₂ Al ₅ (vol%)	Delta (Vol%)
D-2, 3-1	459	0,16	0,031	0,152	0,155	0,02	0	0
D-2, 3-2	463,4	0,17	0,035	0,155	0,154	0,02	0,1	0
D-2, 3-3	464,9	0,17	0,037	0,156	0,165	0,03	0,1	0
D-2, 3-4	466,2	0,18	0,041	0,153	0,157	0,02	0,1	0
D-3, 1-1	459,9	0,26	0,116	0,146	0,158	0,02	0,41	0
D-3, 1-2	463,4	0,18	0,036	0,158	0,147	0,02	0,1	0
D-3, 1-3	464	0,17	0,031	0,159	0,166	0,02	0	0
D-3, 1-4	460,3	0,17	0,031	0,156	0,157	0,02	0	0
D-3, 2-1	459,1	0,18	0,037	0,156	0,158	0,02	0,1	0
D-3, 2-2	463,2	0,17	0,033	0,157	0,158	0,02	0	0
D-3, 2-3	464,1	0,18	0,042	0,159	0,167	0,02	0,1	0
D-3, 2-4	460,8	0,17	0,03	0,158	0,159	0,02	0	0
D-3, 3-1	459,3	0,19	0,049	0,155	0,159	0,02	0,12	0
D-3, 3-2	464,2	0,17	0,031	0,159	0,16	0,02	0	0
D-3, 3-3	464,7	0,17	0,031	0,159	0,168	0,02	0	0
D-3, 3-4	460,9	0,17	0,032	0,157	0,16	0,02	0	0

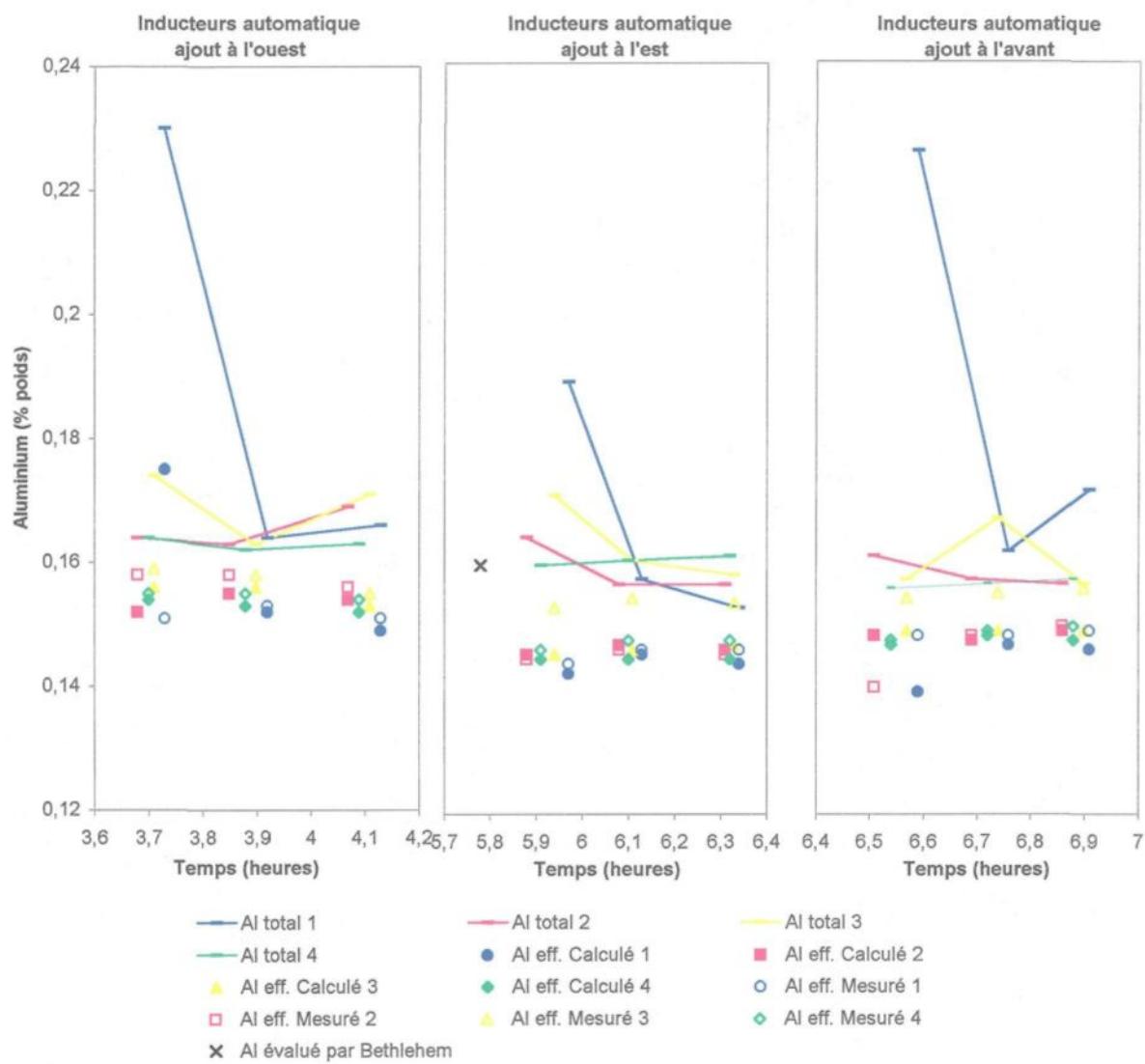


Figure 4.71 Comparaison entre l'Al effectif mesuré et les valeurs d'aluminium total et effectif calculées, effet des additions de traceurs

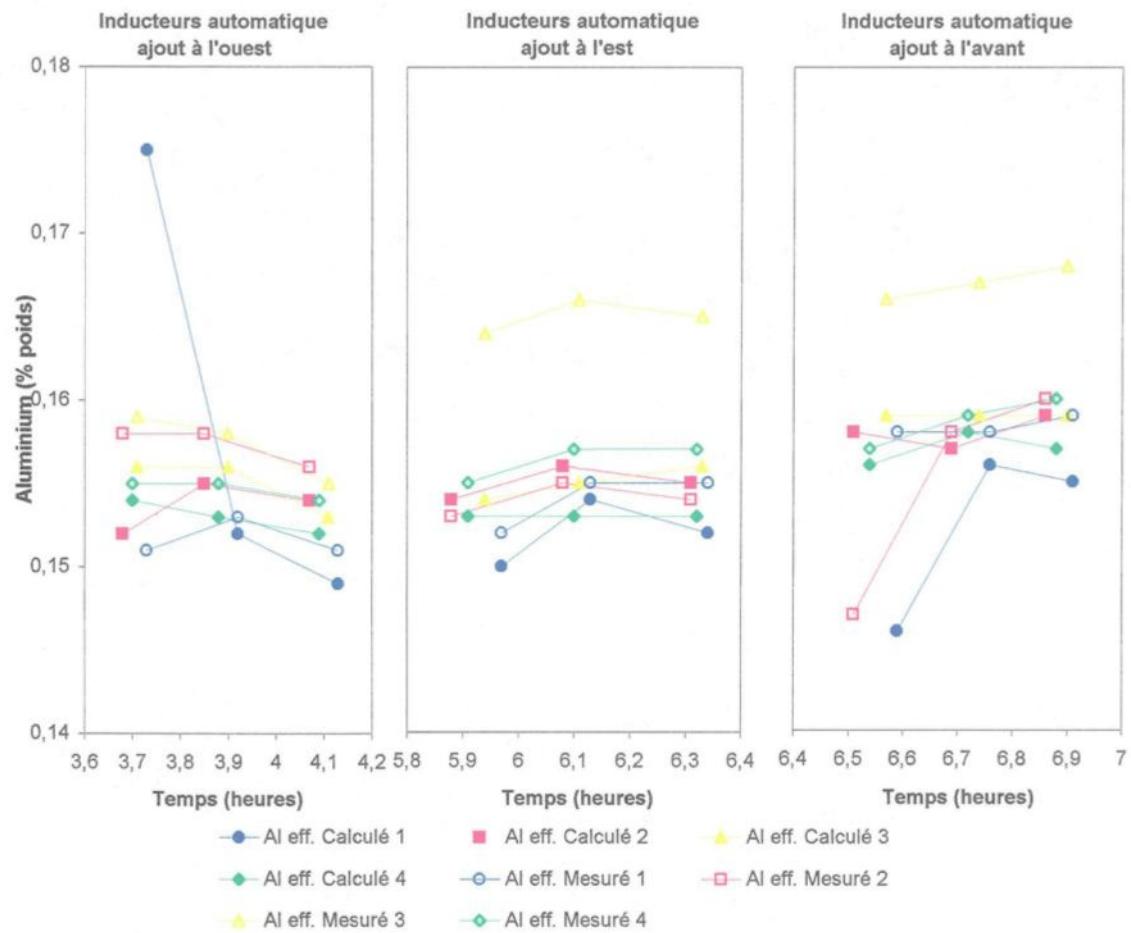


Figure 4.72 Comparaison entre les valeurs d'aluminium effectif calculées et mesurées, effet des additions de traceurs

4.3.4 Quatrième test: Transition de galvanisé allié à galvanisé

La dernière série de tests s'est effectuée pendant la variation de la composition du bain pour le changement de production de galvanisé allié à galvanisé. L'augmentation de la teneur en aluminium du bain s'est faite à l'aide d'ajouts de lingots jumbo contenant 0.75% poids Al et de petits lingots riches en aluminium (4% poids Al). Pendant cette période, huit échantillons ont été prélevés dans le bain pour chaque position des sondes et à des intervalles de temps réguliers d'une heure en moyenne. Cette série de tests a malencontreusement été affectée par des événements hors de notre contrôle tels qu'un arrêt complet de la ligne dû à des problèmes autres que la gestion du bain, et par une trop grande quantité de métal liquide dans la cuve ce qui entravait le déroulement habituel d'une telle manoeuvre. Le test a tout de même été complété malgré ces conditions imprévues.

4.3.4.1 Résultats des mesures des sondes Yamari

Le tableau 4.7 relate chacun des événements survenus lors du suivi de la transition de galvanisé allié à galvanisé. Lors de ce test, la vitesse de la feuille a varié de 2.03 m/s à 1.03 m/s (en excluant l'arrêt de la ligne) et sa température de 379°C à 465°C. En général, les additions de petits lingots riches en aluminium effectuées au bain ont été alternées avec les ajouts de lingots jumbo (0.75% poids Al).

La figure 4.73 montre l'enregistrement de la composition effective d'aluminium et de la température du bain pour chacune des sondes. Chaque barre verticale représente les modifications apportées au bain pendant la transition. La majorité des ces barres indiquent les additions effectuées. Au temps 6 heures, c'est l'arrêt de la ligne et au temps 8.76, c'est le démarrage de celle-ci qui sont indiquées. L'avant dernier trait vertical indique un augmentation imposée de 5.6° C de la température du bain.

Sur la figure 4.73, on peut voir de 0 à 9 heures la croissance graduelle de la teneur en aluminium qui passe, en moyenne de 0.125% à 0.145% poids Al. L'allure des courbes pour les sondes 1 et 2 est très irrégulière et présente de légères montées d'aluminium après chaque ajout, malgré la diminution locale de température due aux additions de jumbo. Les courbes des sondes 3 et 4 sont beaucoup plus lissées et présentent une montée en aluminium beaucoup plus évidente, surtout dans les premières cinq heures de l'opération. Encore une fois, cette observation indique un mélange plus efficace dans ces régions.

Tableau 4.7 Événements survenus lors des tests industriels, effet de la transition de galvanisé allié à galvanisé

Paramètres	Temps (heures)	Événement
Vitesse feuille: 1.57 m/s Température feuille: 465°C Puissance des inducteurs: # 1 : 109 kW # 2 : 104 kW	0.06 à 0.17	Échantillons T-1
Vitesse feuille: 2.03 m/s	0,34	Ajout d'un jumbo à l'arrière (0.47% poids Al)
	1,12	Ajout d'un jumbo à l'arrière (0.75% poids Al)
	1.36 à 1.44	Échantillons T-2
	1,57	20 lingots à l'arrière
	1,76	Écumage
	1,92	Ajout d'un jumbo à l'arrière (0.75% poids Al)
	2,2	Échantillons T-3
	2,32	Écumage
	2,7	20 lingots à l'arrière
	3,25	Échantillons T-4
	3,52	Ajout d'un jumbo à l'arrière (0.75% poids Al)
	3.85 à 4.07	20 lingots à l'ouest, près du snout
Vitesse feuille: 2.02 m/s	4,45	Échantillons T-5
	4,7	Nettoyage des rouleaux stabilisateurs
Vitesse feuille: 1.73 m/s	5,08	Écumage
	5,2	Ajout d'un jumbo à l'arrière (0.75% poids Al)
Vitesse feuille: 1.17 m/s	5.23 à 5.41	20 lingots à l'arrière
Vitesse feuille: 1.28 m/s	5,61	Diminution graduelle de la vitesse de la feuille
Vitesse feuille: 1.27 m/s	5,93	20 lingots à l'arrière

Tableau 4.7 (suite) Événements survenus lors des tests industriels, effet de la transition de galvanisé allié à galvanisé

Vitesse feuille: 0 m/s Puissance des inducteurs: # 1 : 205 kW # 2 : 199 kW	6	Arrêt complet de la ligne
	7,42	20 lingots à l'arrière
	8,74	Ajout d'un jumbo à l'arrière (0.75% poids Al)
Température: 379°C	8,76	Départ de la ligne
Vitesse feuille: 0.87 m/s Température: 497°C	8,84	Augmentation graduelle de la vitesse de la feuille
	8,93	
Vitesse feuille: 1.03 /ms	9,03	
Vitesse feuille: 1.13 m/s	9.21- 9.31	Échantillons T-6
	9,75	20 lingots à l'arrière
	9,91	Échantillons T-7
	10,23	Augmentation de 10°C de la température du bain
	10,53	Ajout d'un jumbo à l'arrière (0.75% poids Al)
	10.65-10.77	Échantillons T-8

4.3.4.2 Résultats des analyses

À la position de chacune des sondes, huit échantillons ont été prélevés à des intervalles allant de 42 à 78 minutes. Les échantillons ont été numérotés Ti-x où i va de 1 à 8 et x indique le numéro de la sonde près de laquelle a été prélevé l'échantillon.

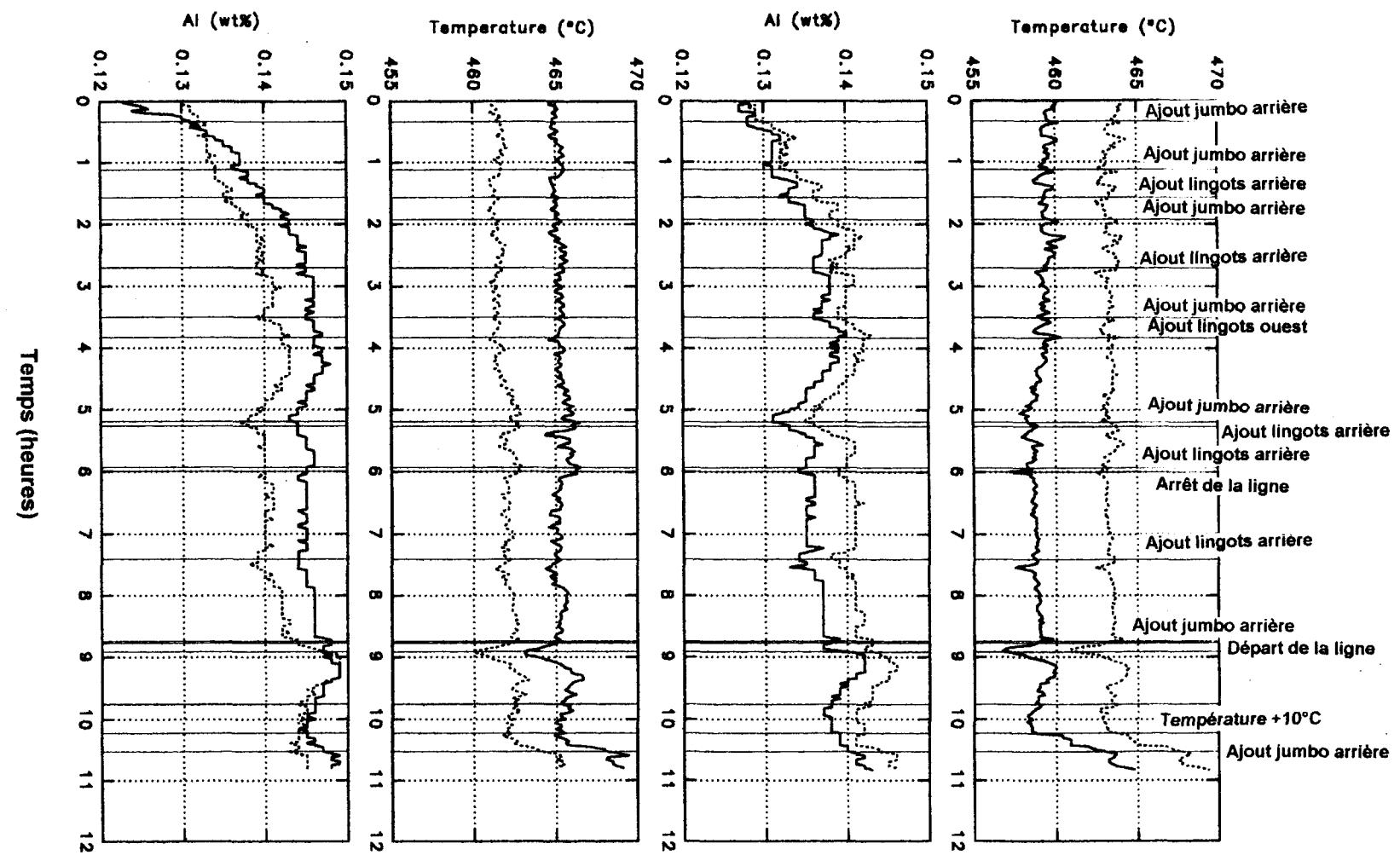


Figure 4.73 Mesures de l'aluminium et de la température, effet de la transition de galvanisé allié à galvanisé

Chacun de ces échantillons a été analysé par Cominco pour en connaître la composition en aluminium total et en fer total. Ensuite, à l'aide du logiciel DEAL (Determine Effective Aluminium), l'aluminium effectif et le fer dissout ont été calculés. On retrouve la liste des échantillons, le temps de prélèvement de ceux-ci lors de ces tests, la mesure en aluminium effectif par les sondes et les résultats des analyses au Tableau 4.8.

Tableau 4.8 Analyses des échantillons prélevés et mesures des sondes, effet de la transition de galvanisé allié à galvanisé

SAMPLE	TEMP (°C)	BATH AI (wt%)	BATH Fe (wt%)	EFF. AI DEAL (wt%)	EFF AI SENSORS (wt%)	SOL Fe (wt%)	Fe ₂ Al ₅ (vol%)	Delta (Vol%)
T1-1	460	0,13	0,04	0,129	0,127	0,03	0	0,08
T1-2	464	0,13	0,04	0,13	0,128	0,03	0	0,08
T1-3	465	0,13	0,04	0,131	0,126	0,04	0	0,01
T1-4	461	0,13	0,04	0,129	0,131	0,03	0	0,06
T2-1	459	0,14	0,04	0,133	0,134	0,03	0	0,114
T2-2	464	0,14	0,04	0,134	0,137	0,03	0	0,1
T2-3	465	0,14	0,04	0,132	0,14	0,04	0	0,1
T2-4	461	0,14	0,04	0,132	0,136	0,03	0	0,109
T3-1	461	0,14	0,04	0,135	0,138	0,03	0	0,107
T3-2	464	0,14	0,05	0,135	0,141	0,03	0	0,1
T3-3	465	0,14	0,04	0,137	0,144	0,03	0	0
T3-4	462	0,14	0,04	0,135	0,139	0,03	0	0,07

Tableau 4.8 (suite) Analyses des échantillons prélevés et mesures des sondes, effet de la transition de galvanisé allié à galvanisé

SAMPLE	TEMP (°C)	BATH Al (wt%)	BATH Fe (wt%)	EFF. AI DEAL (wt%)	EFF AI SENSORS (wt%)	SOL Fe (wt%)	Fe ₂ Al ₅ (vol%)	Delta (Vol%)
T4-1	459	0,14	0,04	0,135	0,137	0,03	0	0,05
T4-2	463	0,14	0,05	0,135	0,14	0,03	0	0,1
T4-3	466	0,14	0,04	0,137	0,146	0,03	0	0
T4-4	461	0,14	0,04	0,135	0,14	0,03	0	0,04
T5-1	459	0,13	0,04	0,135	0,137	0,03	0	0,06
T5-2	464	0,15	0,04	0,138	0,14	0,03	0	0
T5-3	465	0,15	0,04	0,137	0,146	0,03	0	0
T5-4	462	0,15	0,04	0,135	0,142	0,03	0	0
T6-1	460	0,16	0,04	0,141	0,142	0,03	0,1	0
T6-2	464	0,22	0,09	0,143	0,145	0,03	0,27	0
T6-3	466	0,17	0,06	0,144	0,149	0,03	0,11	0
T6-4	463	0,17	0,05	0,142	0,149	0,03	0,1	0
T7-1	458	0,16	0,04	0,142	0,137	0,03	0,1	0
T7-2	463	0,22	0,09	0,142	0,141	0,03	0,26	0
T7-3	465	0,16	0,04	0,146	0,145	0,03	0,1	0
T7-4	462	0,16	0,04	0,143	0,145	0,03	0,1	0
T8-1	463	0,16	0,04	0,146	0,141	0,03	0,1	0
T8-2	468	0,16	0,04	0,146	0,145	0,03	0,1	0
T8-3	469	0,16	0,04	0,147	0,149	0,03	0	0
T8-4	465	0,16	0,04	0,144	0,145	0,03	0	0

Les teneurs en aluminium total et effectif ont été retracées sous forme de graphique pour fins de comparaison (figure 4.74 et 4.75). La figure 4.74 illustre la variation de la teneur en aluminium total et effectif, mesurée et calculée pour les quatre positions de capteurs des huit échantillons. Sur ce premier graphique, on voit bien la montée de la concentration en aluminium. Cette fois ci, l'aluminium total est plus élevé près de la sonde 2 que près des trois autres. La teneur en aluminium total mesurée près des sondes 3 et 4 se suit de très près. De même, les analyses des échantillons prélevés par Bethlehem suivent de près les résultats donnés par Cominco.

La figure 4.75 représente les mêmes données mais seulement pour la teneur en aluminium effectif. Encore une fois, on observe l'augmentation graduelle de l'aluminium. Sur ces courbes, on observe qu'à basse concentration d'aluminium, les valeurs mesurées par les sondes et calculées à l'aide du logiciel DEAL sont très près les unes des autres. Par contre, lorsque cette teneur augmente, les valeurs lues par les sondes et calculées s'éloignent les unes des autres, ces premières ayant tendance à surestimer la valeur en aluminium (ou l'inverse). À la fin du graphe, lorsque la température du bain est augmentée (échantillons 8), les valeurs mesurées et calculées semblent se rapprocher de nouveau.

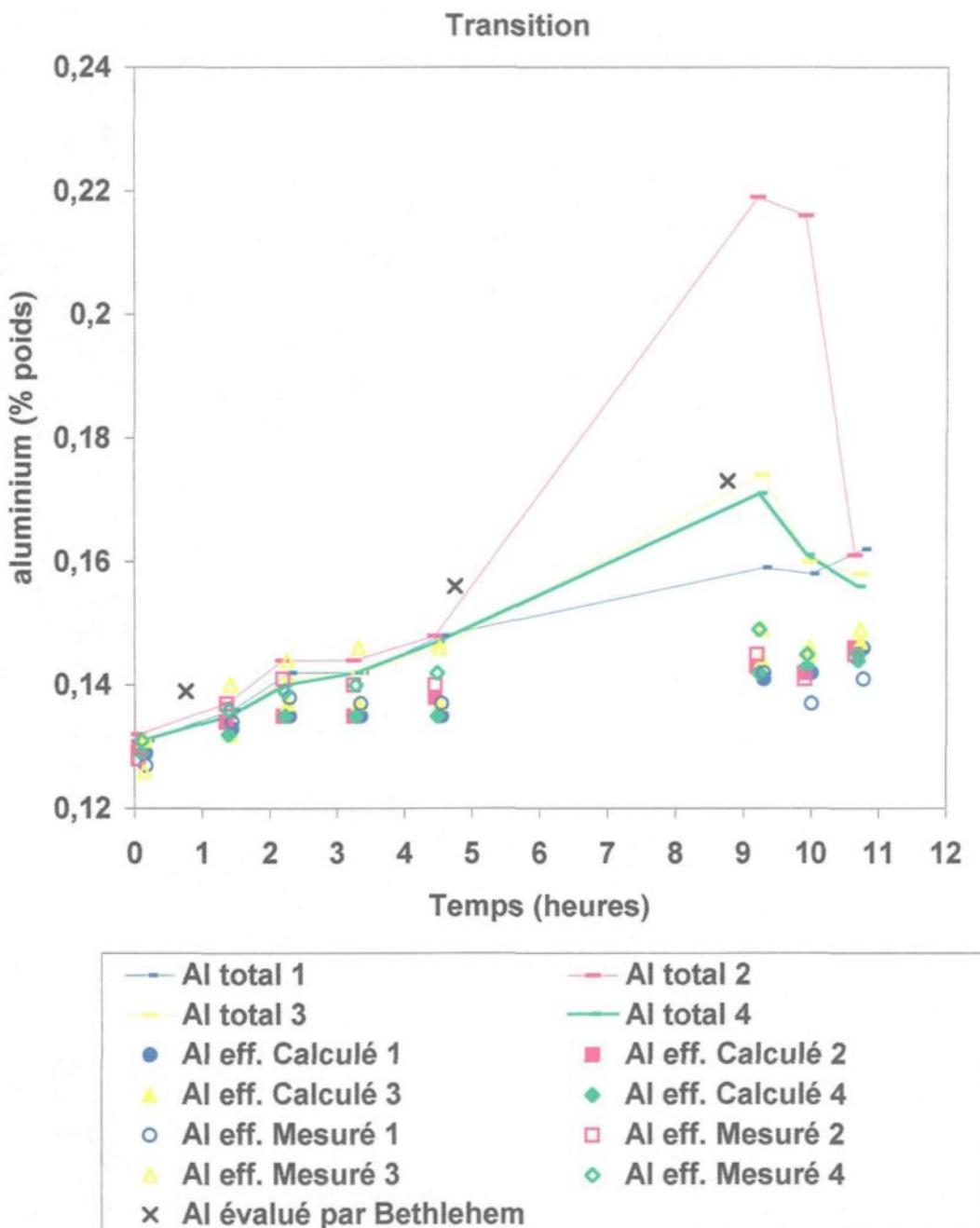


Figure 4.74 Comparaison entre l'Al effectif mesuré et les valeurs d'aluminium total et effectif calculées, effet de la transition de galvanisé allié à galvanisé

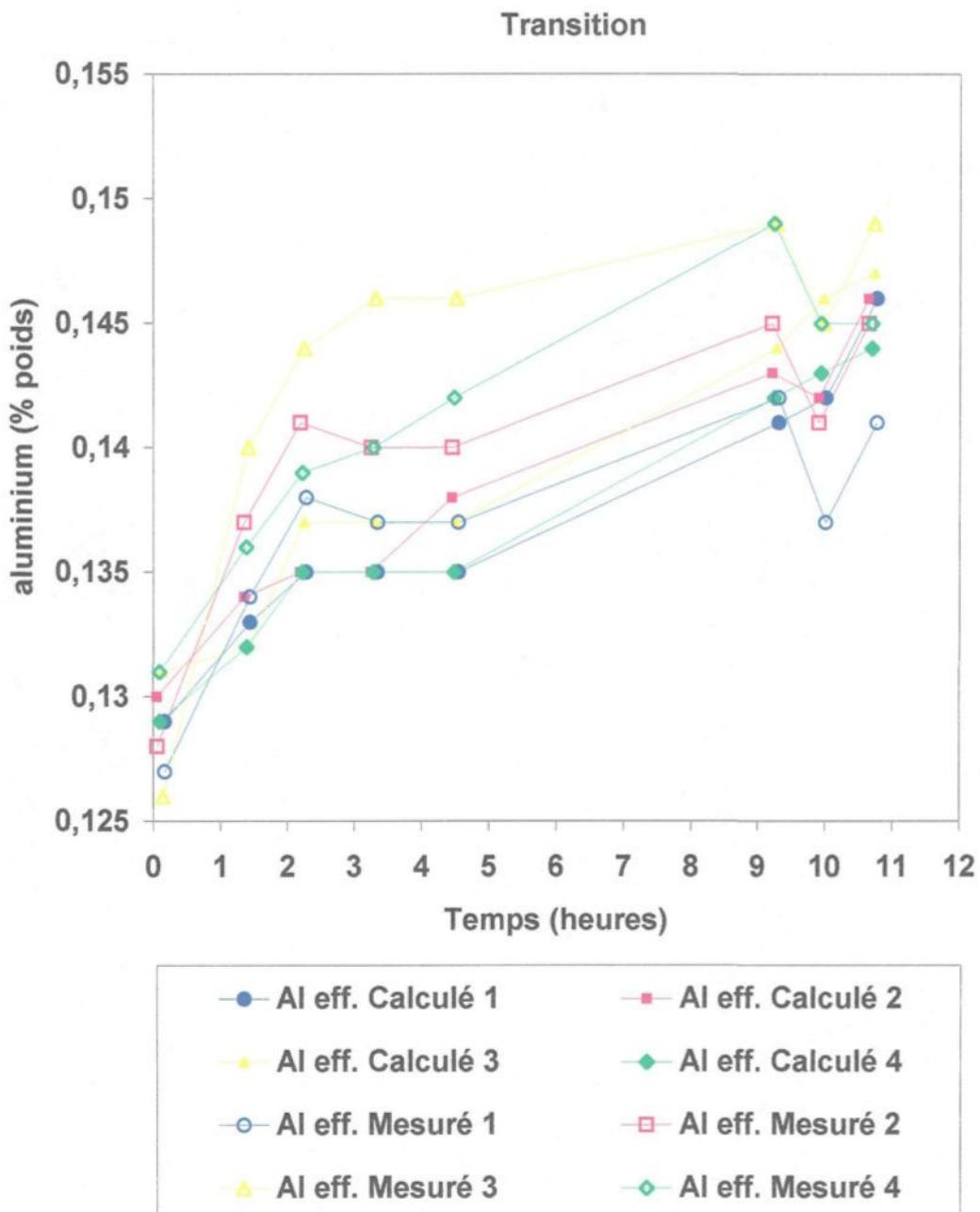


Figure 4.75 Comparaison entre les valeurs d'aluminium effectif calculées et mesurées, effet de la transition de galvanisé allié à galvanisé

4.3.5 Discussion sur les tests industriels

Les tests effectués sur la ligne de galvanisation de l'usine de Burns Harbor de Bethlehem Steel pour vérifier les calculs numériques de l'écoulement dans le bain ont permis de faire plusieurs observations. D'abord, la température du bain a une importance réelle sur la teneur en aluminium effectif du bain. Ensuite, l'utilisation de l'aluminium traceur dans le bain permet de caractériser la qualité du mélange pour les zones observées. Enfin, les analyses des échantillons prélevés lors des tests permet de mieux connaître la répartition de l'aluminium dans le bain.

4.3.5.1 Effet de la température

Dans les essais sans traceur, les courbes de la teneur en aluminium du bain obtenues indiquent que la variation du niveau d'aluminium dans le bain est synchronisée avec la température. Comme l'aluminium mesuré est l'aluminium effectif en solution dans le bain, on peut s'attendre à cet effet car cette solubilité augmente avec l'augmentation de la température même sans addition d'aluminium en accord avec le diagramme d'équilibre Fe-Zn-Al. Ainsi, les intermétalliques toujours présents dans le bain deviennent une source d'aluminium. Lorsque la température augmente, les intermétalliques se dissolvent dans le bain et lorsqu'elle diminue, ils se reforment. Cet équilibre semble être assez rapide, étant donné que les capteurs qui

sont près de la zone de chauffage ont enregistré des températures et des concentrations d'aluminium effectif en accord avec le diagramme de phase (Tang, 1998).

Un autre effet touchant la température dans le bain est la diminution locale de celle-ci lors de l'ajout de lingots jumbos. Cette diminution locale risque de créer plus d'intermétalliques aux endroits des additions, au moment des ajouts. Par contre, une température maintenue stable et uniforme dans le bain fera dissoudre ceux-ci assez rapidement.

Lors de l'augmentation de la capacité des inducteurs à 100%, un pic de température est observé d'abord aux capteurs 1 et 2 puis aux capteurs 3 et 4 après un délai d'au moins 3 minutes. Cette réponse est plus petite que le délai du temps de réponse du traceur d'aluminium dans les mêmes conditions de mixage du bain. Dans le cas du bain de galvanisation, la température peut aussi être utilisée comme traceur, cependant le chemin que celle-ci emprunte est différent de celui du traceur aluminium (passage par la plaque déflectrice par exemple), c'est pourquoi ces temps de réponse sont différents.

4.3.5.2 Mixage du bain

Les additions d'aluminium utilisé comme traceur ont permis de caractériser certaines zones de mixage du bain. Ainsi, la région arrière du bain est très peu agitée. Les courbes de température et de concentration d'aluminium effectif enregistrées par les sondes 1 et 2 sont en général plus chaotiques localement que celles des sondes 3 et 4. De plus, l'aluminium total mesuré dans les échantillons est souvent plus élevé pour la sonde 1 et/ou la sonde 2, ce qui indique une plus grande proportion d'intermétalliques. Ceux-ci se retrouvent à la surface et ne sont probablement pas remélangés dans l'ensemble du bain. De plus, bien qu'ils se trouvent dans la région d'addition qui risque de contenir plus d'intermétalliques, on enregistre une teneur en aluminium total élevée au capteur 2 lors des tests d'additions à l'est, l'ouest et à l'avant.

La zone avant présente un mixage plus agité tel que le montrent les courbes lisses des capteurs 3 et 4. Cette zone contient moins d'intermétalliques et ceci, même si on y effectue des additions.

4.3.5.2.1 Croisement des capteurs

Une remarque importante à effectuer sur les enregistrements des courbes de teneur en aluminium effectif et de la température en fonction du temps est la synchronisation des capteurs 1 et 4 et celle des capteurs 2 et 3. Bien que ceux-ci soient à l'opposé les uns des autres, on enregistre les même différences de température et de concentration en aluminium. On doit donc s'interroger sur la symétrie du bain.

L'asymétrie des mesures des capteurs peut provenir de plusieurs paramètres qui peuvent affecter l'écoulement:

- Un mouvement latéral de va et vient de la feuille sur le rouleau
- Un chauffage non symétrique des inducteurs qui crée une préférence de passage du fluide sur des côtés plutôt que sur l'autre, etc
- une asymétrie dans l'emplacement des appareils dans le bain
- un mauvais alignement des rouleaux
- etc

L'asymétrie de l'écoulement observée lors des tests industriels est en accord avec ce qui a été visualisé dans le modèle à eau. En effet, les figures 4.6 à 4.8

montrent que l'écoulement de l'eau dans le bain à eau n'est pas symétrique dans le sens de la profondeur. Il est donc très probable que de petites perturbations de l'écoulement entraînent un mixage variable selon la configuration de l'équipement du bain. Il est possible que cette asymétrie entraîne une différence de concentration d'aluminium dans le bain et ceci pourrait expliquer certaines petites différences de composition qui ont été observées dans la couche inhibitrice lors de certains tests (Dubois et Feron, 1993).

Cependant, l'asymétrie observée par les mesures d'aluminium effectif et de température lors des tests industriels peut aussi provenir de l'erreur sur la lecture qui doit se chiffrer à au moins $\pm 5^\circ\text{C}$ pour la température et à $\pm 0.003\%$ poids Al sur la teneur en aluminium.

4.3.5.3 Temps de mélange

Le temps de mélange du bain de galvanisation est le temps pris pour obtenir une composition en aluminium stable après une addition de traceur. D'après la figure 4.67, il semble que ces temps de mélange se situent aux alentours de 0.5 heure. L'ordre de grandeur de ce temps de mélange semble plus élevé que celui de 7.6 min estimé par Ajersch et Gagné (1995) dans une maquette à eau (voir section 2.2.1). Il n'est cependant pas possible de comparer rigoureusement ces mesures car les configuration de cuves sont très différentes et les vitesses de feuille le sont aussi. De

même, les temps de mélange estimés par la visualisation de l'écoulement dans la maquette à eau de ce projet ne permettent pas de relier directement ceux-ci avec les données industrielles amassées.

4.3.5.4 Endroit des additions

Les additions faites à l'arrière avec présence d'une plaque déflectrice font de sorte que celles-ci sont plus facilement captées par les sondes à cause du mouvement très lent dans cette zone. La plaque a pour effet d'imiter un bassin de mélange préliminaire. Les additions effectuées sur les côtés et à l'avant sont très rapidement mélangées dans le bain et sont plus difficilement détectables.

4.4 Discussion générale sur la validation de l'écoulement

Cette thèse de doctorat présente les résultats d'une étude portant sur la validation des calculs numériques de l'écoulement dans une cuve de galvanisation. Pour effectuer cette validation, un modèle à eau a été construit, l'écoulement visualisé à l'aide de cette maquette et des tests industriels de mesures d'aluminium en présence dans le bain et de température ont été effectués. De plus, des modifications ont été apportées au modèle numérique.

Plusieurs étapes ont dû être franchies pour effectuer les différents volets de la validation. Tout d'abord, la construction d'une maquette à eau a nécessité une conception souple afin de pouvoir effectuer des modifications de la configuration de la cuve et ainsi de vérifier l'effet de la présence ou l'absence des équipements se trouvant à l'intérieur de la cuve. Le visualisation à l'aide de faisceau laser a nécessité beaucoup d'essais et erreurs avant d'obtenir des images vidéo pouvant être traitées. Le traitement des enregistrements est aussi un travail très fastidieux, car les images issues des vidéos ont été visualisées une par une à l'aide d'un système de montage vidéo informatisé. Ces images ont été triées et certains des enregistrements ont dû être refaits plusieurs fois afin d'obtenir des images représentatives.

La visualisation à l'intérieur de la feuille a aussi été une étape complexe. Comme le rouleau principal est en aluminium, sa surface brillante reflétait le faisceau

laser empêchant ainsi d'avoir de bonnes images. Ce problème a été résolu par un traitement d'anodisation du rouleau qui a rendu cette surface matte et noire. Pour cette même section d'écoulement, une mince plaque de plexiglass a dû être installée à la surface de l'eau car l'eau réfléchissait le faisceau, rendant la visualisation instable.

Les visualisations de l'écoulement ont par contre permis de faire ressortir plusieurs points importants de l'écoulement dans le bain qui n'avaient jamais été observés jusqu'ici:

- L'effet des changements de configuration du bain: avec deux, un ou aucun rouleaux stabilisateurs, avec et sans plaque déflectrice, avec angle de courroie de 32° et 45° ,
- La présence d'un écoulement non symétrique.
- L'écoulement à l'intérieur de la cloche,
- Les calculs de temps de mélange en fonction des configurations et de la vitesse de la feuille

4.4.1 Comparaison de l'écoulement visualisé à l'aide du modèle à eau avec les modèles à eau de la littérature

L'écoulement visualisé à l'aide de la maquette à eau est très semblable à celui observé par Ajersch, Gagné et Paré (1993) (voir figures 2.5 à 2.7). Cette similarité n'est pas surprenante car ces deux modèles possèdent la même géométrie à des

échelles différentes (1/2 et 1/5 d'un bain réel). En comparant les visualisations faites dans ce projet et celles rapportées par Ajersch, Gagné et Paré (1993), il est intéressant de voir que même si elles ont été effectuées pour des nombres de Reynolds différents, l'écoulement visualisé possède les mêmes tendances. L'hypothèse faite dans le présent projet voulant qu'un nombre de Reynolds de 10^5 est adéquat pour représenter l'écoulement turbulent dans la cuve se retrouve renforcée.

En général, l'orientation de l'écoulement observé à l'extérieur de la feuille est le même pour tous les modèles à eau rapportés dans la littérature. C'est au niveau des sens d'écoulement à l'intérieur de la feuille qu'il y a complication. En effet, les modèles de Kato et al (1995, figure 2.14) et d'Igushi et al (1996, figures 2.15 et 2.16) rapportent des sens d'écoulement différents à la surface du bain de ceux observés dans ce projet et par Ajersch, Gagné et Paré (1993). Cette différence d'orientation d'écoulement est attribuable à la géométrie du bain. Par exemple, pour le modèle de Kato et al (1995), le rouleau principal est plus grand en diamètre par rapport au volume de bain que pour le modèle étudié dans ce projet. De plus, la profondeur dans laquelle est immergé le rouleau principal est moins grande. La même observation peut être faite pour le modèle d'Igushi et al (1996). En plus, celui-ci ne possède pas de rouleaux stabilisateurs ni de cloche. Toutes ces différences de configurations ont une grande importance sur les sens d'écoulements dans le bain car l'écoulement est créé par le mouvement des rouleaux et de la feuille et est affecté par les instruments immobiles dans le bain (bras des rouleaux, cloche).

4.4.2 Comparaison de l'écoulement visualisé à l'aide du modèle à eau avec les modèles numériques

L'écoulement visualisé à l'aide de la maquette à eau construite dans le cadre de ce projet est très semblable à celui calculé numériquement (section 4.2 Modèle numérique). À l'extérieur de la feuille, les sens d'écoulement sont les mêmes. À l'intérieur de la feuille, même si l'écoulement était difficile à visualiser, il a été observé dans le modèle à eau le même patron d'écoulement. Par exemple, à la surface du bain à l'intérieur de la feuille, le modèle numérique montre qu'il y a une partie du fluide qui se dirige vers l'avant et une partie du fluide qui se dirige vers l'arrière (figure 4.56). La même observation a été faite sur l'écoulement de la maquette à eau, même si elle est difficilement visible à l'aide de la figure 4.10.

Le modèle numérique rapporté par Gagné et Gaug (1998) illustre aussi le même genre d'écoulement tout autant à l'extérieur de la feuille qu'à l'intérieur de celle-ci (figures 2.27 et 2.28). Cependant, la boucle d'écoulement calculée par ces auteurs à l'intérieur de la feuille semble différente des observations faites dans le modèle à eau.

L'écoulement calculé à l'aide du modèle numérique de Hétu et Perrault (1998) est différent de celui observé pour les mêmes raisons que précédemment: la géométrie du bain est différente, i.e. le diamètre du rouleau principal est plus grand,

la profondeur de son insertion dans le bain est plus petite, etc. Cependant, ce modèle et le modèle à eau observé dans ce projet montrent tous les deux que la plaque déflectrice isole l'écoulement de la section arrière en faisant de celle-ci une zone de pré-mélange.

4.4.3 Discussion sur les mesures de vitesse et les calculs de turbulence effectués à l'aide du modèle à eau

Les prises de mesures de vitesse dans le bain à l'aide de la technique de vélocimétrie laser a aussi été un travail très long. Plus de 900 mesures ont été effectuées à travers le bain, et chacune d'elle pouvait prendre plus de 10 minutes. De plus, le bain a dû être nettoyé fréquemment car la contamination de celui-ci par des poussières en suspension rendait les lectures difficiles après un certain temps de fonctionnement du montage expérimental. Le positionnement des prises de mesures dans le bain a dû être effectué de façon méthodique afin d'évaluer correctement l'endroit où le croisement des faisceaux laser se trouvait dans l'eau de la cuve. Ainsi, la sonde optique a été fixée sur une table graduée qui permettait d'enregistrer les déplacements effectués dans les trois coordonnées.

D'autres difficultés ont été éprouvées lors des prises de mesure de vitesse à l'aide de la technique de vélocimétrie laser dans l'écoulement du bain à eau:

- détermination de l'orientation des vitesses

- mesures de vitesses dans les zones de transition (changement d'orientation des vitesses)
- mesures de vitesse dans un axe lorsque la grandeur de la vitesse dans cet axe est beaucoup plus petite que la grandeur de la vitesse dans l'axe principal

La difficulté de l'évaluation de l'orientation de la vitesse a été surmontée par l'observation attentive de l'écoulement au moment des prises de mesures et par l'utilisation de filtres adéquats (voir Chapitre 3). Par contre, beaucoup de vitesses n'ont pu être lues car leur grandeur était trop petite par rapport à la grandeur de la vitesse dans l'autre axe.

Néanmoins, les vitesses enregistrées le long des différentes droites dans le bain à eau donnent des renseignements très utiles pour la modélisation. D'abord, la couche limite d'écoulement près de la feuille est très étroite et le gradient de vitesse très abrupt. Ceci implique que lors des modélisations numériques du bain, on doit utiliser un modèle de turbulence qui permet de bien illustrer cette mince couche près de la feuille. Il est important de bien caractériser et modéliser cette couche limite d'écoulement si, pour les développements futurs de la modélisation numérique, on veut ajouter l'effet thermique et le transfert de masse. Ensuite, les vitesses mesurées dans la cuve à eau montrent que leur grandeur est très rapidement réduite à mesure qu'on s'éloigne de la feuille et des rouleaux. Ceci implique que l'écoulement est

beaucoup moins turbulent dans les zones éloignées et qu'un modèle numérique doit illustrer cette grande diminution de mouvement loin de l'avant et du milieu du bain.

D'ailleurs, cet effet est mis en valeur par les calculs de turbulence effectués à l'aide des mesures de vitesse prises dans le bain. Les résultats de ces calculs montrent que la turbulence est grande à l'avant et au centre du bain et très faible en s'éloignant de ces régions.

Les travaux d'Iguchi et al (1996) rapportent les mêmes observations générales que celles faites dans ce projet. Les mesures de vitesse et les calculs de turbulence qu'ils ont effectués sont du même ordre de grandeur que ce qui a été rapporté dans ce projet. Les auteurs ont eu la même difficulté en ce qui a trait aux mesures de vitesse dont la grandeur est très petite par rapport au sens d'écoulement principal. Par exemple, à la surface du bain, seulement les composantes x de la vitesse ont été mesurées par Iguchi et al (1996) (figure 2.18). En général, les calculs de turbulence qu'ils ont effectués sont du même ordre de grandeur que les calculs faits dans ce projet (Iguchi et al: $(\overline{u'v'}) \sim 15 \text{ à } 3000 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}^2$, comparé à: $(\overline{u'v'}) \sim 5 \text{ à } 1200 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}^2$).

4.4.4 Comparaison des temps de mélange et des temps d'apparition de traceur dans les différentes zones

Peu d'études ont été effectuées pour estimer le temps de mélange d'une addition dans la cuve de galvanisation. Le tableau 4.9 résume les temps de mélange et d'apparition de traceur observés par Ajersch, Gagné et Paré (1995) lors des tests de traceur de HCl et ces mêmes temps observés à l'aide du modèle à eau (avec fluorescéine comme traceur) de ce projet et des tests industriels (avec Al comme traceur).

Le temps de mélange est défini comme le temps requis afin d'atteindre l'homogénéisation de la concentration après l'ajout d'un traceur sous forme d'impulsion. Tel que vu à la section 4.1.2, le temps de mélange est fonction de la vitesse de la feuille (nombre de Reynolds) et de la configuration du bain. De plus, ce temps de mélange sera fonction du traceur utilisé, et de la manière et, probablement, de la position où il a été injecté au début. Ainsi, il est difficile de comparer entre eux les temps de mélange rapportés dans le tableau 4.9. Le modèle à eau construit dans ce projet possède la même configuration que celui de Ajersch, Gagné et Paré (1995) mais n'a pas été caractérisé pour le même nombre de Reynolds et le même traceur. Cependant, on peut dire que le temps de mélange plus rapide observé par ces auteurs est cohérent avec le nombre de Reynolds plus élevé que celui utilisé dans ce projet.

Le temps d'apparition est ici défini comme étant le délai pris par le traceur pour se rendre d'une zone à une autre dans le bain. Par exemple, au tableau 4.9, le temps pris pour détecter à l'avant du bain un traceur qui a été injecté à l'arrière est rapporté. On voit que les temps de mélange et d'apparition du traceur à l'avant du bain pour les deux modèles à eau sont séparés d'un intervalle de 8 secondes. Pour ce qui est du temps de détection à l'avant du traceur aluminium injecté à l'arrière du bain lors des tests industriels, il n'est pas possible de faire de comparaison ici étant donné que les similarités ne sont pas conservées.

Tableau 4.9 Résumé des temps de mélange et d'apparition évalués à l'aide des différents modèles

Modèle	Re^*L	Temps de mélange (injection: impulsion)	Temps d'apparition (Arrière → Avant)
Ajersch, Gagné et Paré (1995)	10^6	60 secondes	15 secondes
Tests industriels	10^7	-	12 minutes
Modèle à eau	10^5	68 secondes	23 secondes

CHAPITRE 5

CONCLUSIONS

Cette thèse de doctorat présente les résultats d'une étude portant sur la validation des calculs numériques de l'écoulement dans une cuve de galvanisation. Dans un premier temps, pour effectuer cette validation, un modèle à eau a été construit et l'écoulement visualisé à l'aide de cette maquette. Cette maquette a été construite de façon à pouvoir modifier facilement des paramètres qui peuvent influencer l'écoulement dans la cuve de galvanisation. Ainsi, les rouleaux stabilisateurs pouvaient être présents ou non, l'angle de la courroie pouvait être modifié, une plaque déflectrice pouvait être ajoutée et la vitesse de la feuille pouvait être variée. Ce modèle à eau est aussi pourvu d'un couteau à air qui a été utilisé afin de vérifier son effet sur l'écoulement à l'intérieur de la cuve.

La visualisation de l'écoulement dans cette maquette à eau pour plusieurs configurations a permis de voir que la géométrie de l'équipement immergé dans le bain ainsi que son emplacement affectent de façon considérable l'écoulement. Ainsi, la gestion d'un bain de galvanisation peut être affectée par une mauvaise configuration de l'équipement du bain. Par exemple, les zones de mixages retrouvées dans le bain sont différentes en fonction des configurations et ces zones de mixage peuvent

affecter la répartition de l'aluminium après les additions de lingots tout autant que les endroits où se retrouveront les intermétalliques. Il est très probable que l'écoulement de certains bains présente des boucles d'écoulement qui emprisonnent les intermétalliques en présence et soit responsable des problèmes de collage de ces particules sur la feuille.

Le modèle à eau a servi à visualiser l'écoulement dans la cuve à l'aide d'un faisceau de laser utilisant la fluorescéine comme traceur. De nombreux régimes d'écoulement ont été enregistrés sur cassette vidéo. L'observation de l'écoulement montre que la présence ou l'absence des rouleaux affecte l'écoulement, particulièrement pour les temps de mélange de la cuve. De la même façon, la présence d'une plaque déflectrice modifie les temps de mélange et agit comme une section de prémélange. L'angle d'inclinaison de la courroie modifie aussi l'écoulement en agrandissant la zone morte de l'arrière. Les observations ont aussi montré que l'écoulement est parfois asymétrique. À partir des observations faites dans le modèle à eau, il est possible de dire que la configuration du bain affectera le temps de mélange, et la façon dont le mélange se fait. Autrement dit, pour avoir toujours le même apport d'aluminium dans le bain et un mélange le plus rapide possible, un design approprié de cuve est important.

L'étude de la présence du couteau à air et de son influence sur l'écoulement dans le bain a permis de confirmer une étude faite par Ajersch et Binet (1996) qui portait sur le même sujet. Dans cette étude, il était recommandé de valider l'absence d'influence des couteaux à air sur l'écoulement dans le bain par des visualisations expérimentales. C'est ce qui a été fait ici et il a été confirmé par ce projet que les couteaux à air ne perturbent pas de façon critique l'écoulement de la cuve et qu'ils ne contribuaient pas de manière significative au mélange. Il est donc inutile d'inclure leur présence au modèle numérique. Il est cependant très important de bien contrôler la pression, la hauteur, le diamètre du nez des couteaux, etc en industrie afin de limiter la perturbation que les couteaux à air peuvent causer à la surface du bain.

Le modèle à eau a été utilisé pour mesurer des vitesses le long de droites dans l'écoulement du bain. Ces mesures de vitesses ont été comparées à la modélisation numérique de la cuve de galvanisation. Les résultats obtenus sont très intéressants, car c'est la première fois que des données quantitatives sont utilisées pour vérifier les calculs numériques. Les comparaisons montrent que le champs calculé numériquement et les vitesses mesurées expérimentalement possèdent en général les mêmes sens d'écoulement et des grandeurs semblables. La principale différence entre les mesures et les calculs provient des gradients de vitesse mesurés qui sont plus abrupts que ceux calculés. Suite à cette observation, il est recommandé d'améliorer le modèle numérique par le choix d'un meilleur modèle de turbulence ainsi que par un maillage plus détaillé. D'ailleurs, les calculs de turbulence issus des

mesures de vitesse peuvent aider à orienter le choix d'un modèle de turbulence adéquat. Ces calculs de turbulence ont aussi montré que l'écoulement est beaucoup plus turbulent près de la feuille et des rouleaux que dans le reste du bain. De plus, au centre du bain l'écoulement est plus turbulent qu'au bas du bain.

Le modèle numérique rapporté dans le cadre de ce projet a subi des améliorations: un modèle simple de turbulence a été ajouté et la présence de la gorge qui relie les inducteurs a été modélisée. L'ajout des inducteurs à la modélisation numérique montre que ceux-ci peuvent affecter l'écoulement seulement de façon marginale à l'arrière du bain. Il est suggéré d'inclure l'effet thermique au modèle pour vérifier si cet effet reste négligeable. En toute probabilité, l'effet thermique sera très important.

Les tests industriels entrepris pour ce projet sont sans contredit d'une grande contribution aux études portant sur le bain de galvanisation. La mesure d'aluminium en présence dans le bain à l'aide des sondes Yamari a été faite pour la première fois en milieu industriel actif dans le cadre de ce projet. Ces tests industriels ont permis de confirmer que la température affecte la teneur en aluminium du bain et la formation des intermétalliques. Les mesures de l'aluminium effectif ont permis de voir que la région arrière du bain est très peu agitée et que celle de l'avant l'est plus. Les mesures d'aluminium effectif dans le bain ainsi que les mesures de température effectuées à l'aide des sondes YAMARI ont aussi permis de voir que la présence

d'une plaque déflectrice agit tel un bain de prémélange. L'asymétrie du bain est aussi observée par les différences de lecture des sondes des côtés similaires.

Ces tests industriels ont permis de quantifier pendant plus de trois jours les changements d'aluminium en présence dans le bain et de température imposés au système en cours de production. Les courbes enregistrées ont permis d'extraire des données sur le comportement de l'aluminium effectif et de connaître sa disponibilité en fonction de changements de paramètres de fonctionnement du bain (température, additions). Ces tests ont permis de voir que l'écoulement dans le bain n'est pas le seul responsable de la répartition de l'aluminium, mais que la température et l'équilibre des phases dans celui-ci sont critiques pour obtenir une bonne gestion du bain. Cependant, l'écoulement du bain doit être bien compris au niveau de la formation des intermétalliques, car il risque d'influencer leur répartition dans la cuve.

Finalement, cette étude de l'écoulement dans le bain de galvanisation permet de dire que la configuration du bain est importante pour obtenir un mélange rapide et homogène. Les différences observées par les modélisations numériques de plusieurs auteurs proviennent surtout du fait que les configurations sont variables et que les modèles de turbulence utilisés sont différents. Enfin, jusqu'à maintenant le transport de chaleur a toujours été négligé dans les modèles numériques. En guise de suggestion pour travaux ultérieurs, il serait pertinent de l'ajouter au modèle et de compléter cette modélisation thermique par un ajout du transfert de matière entre le

zinc, l'aluminium et le fer. La réalisation d'un tel modèle, qui serait beaucoup plus complet et serait d'une très grande utilité pour la gestion des cuves de galvanisation, nécessite beaucoup d'études parallèles concernant la thermodynamique et la cinétique de formation de la couche inhibitrice et des intermétalliques.

BIBLIOGRAPHIE

ABE M., ADANIYA T., SHOJI M., YANO H., (1980) Study on gas wiping mechanism for continuous galvanizing line, Tetsu-to-Hagane, 7, 835-84.

ADAMS G.R., TANG N.-Y., (1993) Studies on the inhibition of alloy formation in hot-dip galvanized coatings, The Physical Metallurgy of Zinc Coated Steel, édité par A.R. Marder, TMS, 41-54

ADAMS G.R., KOLISNYK P.S., TANG N.-Y., (1997) New technologies for continuous galvanizing bath management, SEAISI Quaterly, Vol. 26.4, 53-63

ADAMS G.R., KOLISNYK P.S., TANG N.-Y., (1995) On determining effective aluminum in continuous galvanizing baths, Galvatech'95, 17-21 septembre, Chicago, Illinois, Iron & Steel Society, 777-782

ADAMS G.R., QIANG, N., TANG N. -Y., Applications of AI sensors in continuous galvanizing, Sensors and Modeling in Materials Processing: Techniques and Applications, Edité par S. Viswanathan, R.G. Reddy and J.C. Malas, The Minerals, Metals & Materials Society.

ADAMS G.R., TANG N.Y., (1993) Studies on the inhibition of alloy formation in hot-dip galvanized coatings, *The Physical Metallurgy of Zinc Coated Steel*, édité par A.R. Marder, TMS, 41-54

ADANIYA T., HARA T., OGAWA M., TAJIRI Y., YAMASHITA M., (1984) Development of a new gas wiping process for high-speed chemical treatment, no 105.

AJERSCH F., BINET, C., Application of mixing models to evaluate the transport of aluminum in a continuous galvanizing bath, Galvatech'98, Tokyo, Japon, 648-653.

AJERSCH F., BINET C., (1997) Computer aids for galvanizing bath management: determination of wiping knife and inductor influence an zinc flow, ILZRO program ZCO-8, project ZCO-8-3, Final report, Montréal.

AJERSCH F., BINET C., GAUTHIER M., (1995) Mathematical modeling of aluminum transport in galvanizing baths, ILZRO project ZM-410, Final report, Presentation to Steering Committee, Montréal.

AJERSCH F., BINET C., GOODWIN F.E., KOLINSNYK P.S. (1998) Validation studies of the numerical simulation of flow in the bethlehem steel, burns harbor galvanizing bath, Galvatech'98, Tokyo, Japon, 642-647.

AJERSCH F., BINET C., PARÉ A., (1995) Numerical simulation of 3-Dimensional flow in a continuous strip galvanizing bath, Galvatech'95, Chicago, 695-706.

AJERSCH F., GAGNÉ M., (1995) Galvanizing bath water model tests by monitoring pH changes from localized acid additions., Galvatech'95, Chicago, 687-694.

AJERSCH F., GAGNÉ M., PARÉ A., (1993) Fluid flow modeling of a galvanizing bath for continuous coating of steel sheet, CIM Conference Proceedings, 2nd Int. Symp. On computer Software on Chemical and Extractive Metallurgy, C.W. Bale and G.A. Irons ed., 305-318.

AJERSCH F., GAUTHIER M., (1996) Mechanism of formation and characterisation of dross particles in zinc galvanizing baths, Projet C.D.T. P2026, Centre de technologie Noranda, mars.

AJERSCH F., TRÉPANIER L. (1999) Computer aids for galvanizing bath management, Physical properties of galvanizing drosses, ILZRO project ZCO-8-2 Final report, Montréal, avril.

ANDREE W., EGGERS A., LÜDTKE U., MÜHLBAUER A., NACKE B., WALTER A., (1991) Improvement of the operational behavior of double-loop high performance channel induction furnaces by optimising the melt flow, Magnetohydrodynamics in

Process Metallurgy, The Minerals, Metals & Materials Society, pp 55-61.

ARNALSTEEN M., BUCHLIN J.-M., DUBOIS M., RIETHMULLER M.L., (1995) The gas-jet wiping limit: the splashing phenomenon, Galvatech'95, Chicago, pp. 667-673.

BÉLISLE S., (1993) Effect of galvanizing parameters on the aluminum content of galvanized coatings, The Physical Metallurgy of Zinc Coated Steel, The Minerals, Metals & Materials Society, 65-77.

BÉLISLE S., BOSTON S.L., BRUMMIT G.G., GUTTMAN H., (1992) The deportment of aluminum in continuous galvanizing baths, Galvatech'92, Amsterdam. 55-61.

BÉLISLE S., GAGNÉ M., GUTTMAN H. (1991) The management of continuous galvanizing baths with emphasis on aluminum. Proc. Third Int. Zinc Coated Sheet Conference, Barcelone, Espagne.

BÉLISLE S., GAGNÉ M., LEZON V., (1989) The solubility of iron in continuous hot dip galvanizing baths, Galvanizers Association Annual Meeting, Monterrey, Mexique.

BINET C., (1996) Modélisation de l'écoulement du zinc liquide dans une cuve de galvanisation d'acier. Mémoire de maîtrise és Sciences appliquées, École Polytechnique de Montréal, Département de Métallurgie et de Génie des Matériaux.

BORZILLO A.R., HAHN W.C., (1969) Growth of the inhibiting aluminum-rich alloy layer during galvanizing in zinc that contains aluminum, Trans. ASM, 62, 729.

CAMERON D.I., ORMAY M.K., (1961) The effects of agitation, cooling and aluminum on the alloying in hot dipping in zinc, 6th International Conference on Hot Dip Galvanizing, European General Galvanizers Association, London, 276-316.

DEAL, Yamari Al Sensors Instruction Manual (continuous galvanizing applications), Cominco Ltd.

DUBOIS M., FERON S., (1993) Al pick up on industrial galvanizing sheets, The Physical Metallurgy of Zinc Coated Steel, The Minerals, Metals & Materials Society, 55-63.

DUBOIS M., SÉGERS L., TOUSSAINT P., WINAND R., (1995) Short time investigation of hot dip galvanizing of steel under controlled hydrodynamics, Galvatech'98, Tokyo, Japon, 141-146.

DUBOIS M., SÉGERS L., TOUSSAINT P., VERNIN Ph., WINAND R., (1995) Experimental study and mathematical modeling of zinc ingots melting behavior in the continuous hot dip galvanizing process, Galvatech'95, Chicago, 663-666.

EGGERS A., MÜHLBAUER A., PITZER, SCHULZE, WICKER H., (1991) Interrelationship between melt flow and operational behavior of single-loop channal inductor, Magnetohydrodynamics in Process Metallurgy, The Minerals, Metals & Materials Society, 11-14.

ELLEN C. H., TU C. V., (1983) An analysis of jet stripping of molten metallic coatings, Eighth Australasian Fluid Mechanics Conference, University of Newcastle, N.S.W., 28 nov./ 2dec, 2C.4-2C-7.

ELLEN C. H., TU C. V., (1984) An analysis of jet stripping of liquid coatings, Journal of Fluids Engineering, vol. 106, dec., 399-404.

ENDBERG G., KIUSALAAS R., KLANG H., SCHEDIN E., SCHÖN L., (1989) Control of texture and formation of intermetallic phases in continuously hot-dip galvanized coatings, Galvatech'98, Tokyo, Japon, 485-492

ESPENHAHN M., KOOTZ T., NIKOLEIZIG A., WEBER F., (1978) Fundamentals of the jet process for hot-dip galvanizing, Stahl u. Eisen 98, Nr.7, april, 336-342

FELDMAN F., FRICKE R., MÜHLBAUER A., WICKER H., (1988) Channel geometry and fluid flow behavior in channel induction furnaces, Materials Science and Technology, vol.4, nov. 1988, 1001-1005.

FIDAP 7.0, (1993) Theory Manual, Revision 7.0, Fluid dynamics International, inc., Evanston, IL, USA.

FUKATSU N., IGUCHI Y., KAWAMURA K., KIMURA H., O-HASHI T., YAMAGUCHI S., (1995) Development of Al sensor in Zn bath for continuous galvanizing processes, Galvatech'95, Chicago, 647-655.

GAGNÉ M., GAUG M., (1998) Numerical modeling of fluid flow patterns in a continuous galvanizing bath, Galvatech'98, Tokyo, Japon, 90-95.

GAGNÉ M., GUTTMAN H., (1992) Survey of galvanizing bath operating practices, preliminary report, Noranda Technology Center, Pointe Claire, QC.

GAUTHIER M., (1996) Croissance de la couche inhibitrice FeAlZn lors de la galvanisation en continu, Mémoire de Maîtrise Ès Sciences Appliquées, École Polytechnique de Montréal, juin.

GEIGER D.R., PORIER G.H., (1994) Transport Phenomena in Material Processing, The Minerals, Metals & Materials Society, USA, 571-610.

GRAFF H. F., THORNTON J. A., (1976) An analytical description of the jet finishing process for hot-dip metallic coatings on strip, Metallurgical Transactions B, dec 76, 607-618.

HARVEY G.J., MERCER P.D., (1973) Aluminum-rich alloy layers formed during the hot dip galvanizing of low carbon steel, Metallurgical Transactions, fev 4, 619.

HÉTU J.-F., PERRAULT M. (1998). Analysis of the flow in a continuous galvanizing bath, NRC-CNRC, IMI, 23 octobre.

HISAMATSU Y., YAMAGUCHI H., (1974) Reaction of dross formation in continuous galvanizing, Tetsu-to-Hagané, 60, 96-103.

HRBEK A., (1961) The effect of speed on the thickness of the coating produced during metallizing in liquid metals, Metal finishing Journal, aug., 298-302.

IGUCHI Y., MAKINO H., SAKATOKU A., YAMAGUCHI S., (1995) Phase stability of dross phases in equilibrium with liquid Zn mesured by Al sensor, Galvatech'95, Chicago, 787-794.

IGUCHI M., KUROBE J., MATSUBARA S., MORITA Z-I., NAKAMOTO K., (1995) Cold model experiment of fluid flow phenomena in hot dip plating bath, Tetsu-to-Hagané, vol 81, no 7, 733-738.

KATO C., KOUMURA H., MOCHIZUKI K., MORITO N., (1995) Dross formation and flow phenomena in molten zinc bath, Galvatech'95, 801-806.

LANDAU L.D., LEVICH V. G., (1942) Acta Physiochemica USSR, Vol 17, no 41

LAVIOSA V., MILANI A., (1996) Improving coating weight consistency, Progress report 1, ILZRO-2-3, July 31.

LEPRETRE Y. (1996) Étude des mécanismes réactionnels de la galvanisation, Thèse de doctorat, Université de Paris-sud Centre d'Orsay, Orsay, novembre.

MAILLET (1990) Instruction Manual, Model 9230 Colorlink™ Multicolor receiver.

MAILLET (1990) Instruction Manuel, FIND.

PERRY H. H., (1968) Chemical Engineer's Handbook, McGraw Hill, New York, . 5-18.

SCHLICHTING H., (1960) Boundary layer theory, 4th ed., McGraw Hill, New York

TALLMADGE J.A., WHITE D.A., (1956). Theory of drag out of liquids on flat plates,
Chemical Engineering Science, Vol 20.

TANG N.-Y. (1995) Modeling Al Enrichment in galvanized coatings, Metallurgical and Materials Transactions A, 26A, juillet

TANG N.-Y. (1998) Predicting aluminum level of continuous galvanizing baths,
Galvatech'98, Tokyo, Japon, 654-658.

TOUSSAINT P. (1997) Contribution à l'étude de la formation de la couche d'inhibition de l'acier galvanisé en continu, Thèse de doctorat, MTL, septembre.

TUCK E. O., (1983) Continuous coating with gravity and jet stripping, Phys. Fluids, 26, (9), sept. 83, 2352-2358.

ANNEXE A:

Programme FORTRAN pour le calcul de turbulence

```

program moyenne

integer i,a(10000),b(10000),test,N,M,P
real*8 x(10000),y(10000),xsous(10000),ysous(10000)
real*8 xx(10000),yy(10000)
real*8 xmoy,ymoy,xrms,yrms
character*20 fichier,fichier1

write(*,*) 'nom du 1er fichier'
read(*,*) fichier

write(*,*) 'nom du 2nd fichier'
read(*,*) fichier1

i=0
xmoy=0.
ymoy=0.
xrms=0.
yrms=0.

open(unit=1,file=fichier,status='unknown')
test=1
dowhile (test.eq.1)
  i=i+1
  read(1,*) a(i),b(i),x(i),xx(i)
  write(*,*) a(i),b(i),x(i),xx(i)
  if (a(i).eq.100000) test=2
enddo
N=i-1

i=0
open(unit=2,file=fichier1,status='unknown')
test=1
dowhile (test.eq.1)
  i=i+1
  read(2,*) a(i),b(i),y(i),yy(i)
  write(*,*) a(i),b(i),y(i),yy(i)
  if (a(i).eq.100000) test=2
enddo
M=i-1

do i=1,N
  xmoy=xmoy+x(i)
enddo

do i=1,M
  ymoy=ymoy+y(i)
enddo

xmoy=xmoy/dfloat(N)
ymoy=ymoy/dfloat(M)

do i=1,N
  xsous(i)=x(i)-xmoy
  xrms=xrms+xsous(i)**2
enddo

do i=1,M

```

```
ysous(i)=y(i)-ymoy
yrms=yrms+ysous(i)**2
enddo

P=min(N,M)

do i=1,P
  xp=xp+xsous(i)*ysous(i)
enddo
xp=xp/float(P)

xrms=dsqrt(xrms/dfloat(N))
yrms=dsqrt(yrms/dfloat(M))

write(*,*) 'nb de points',N,M,P
write(*,*) 'xrms=',xrms
write(*,*) 'yrms=',yrms
write(*,*) 'xy=',xp

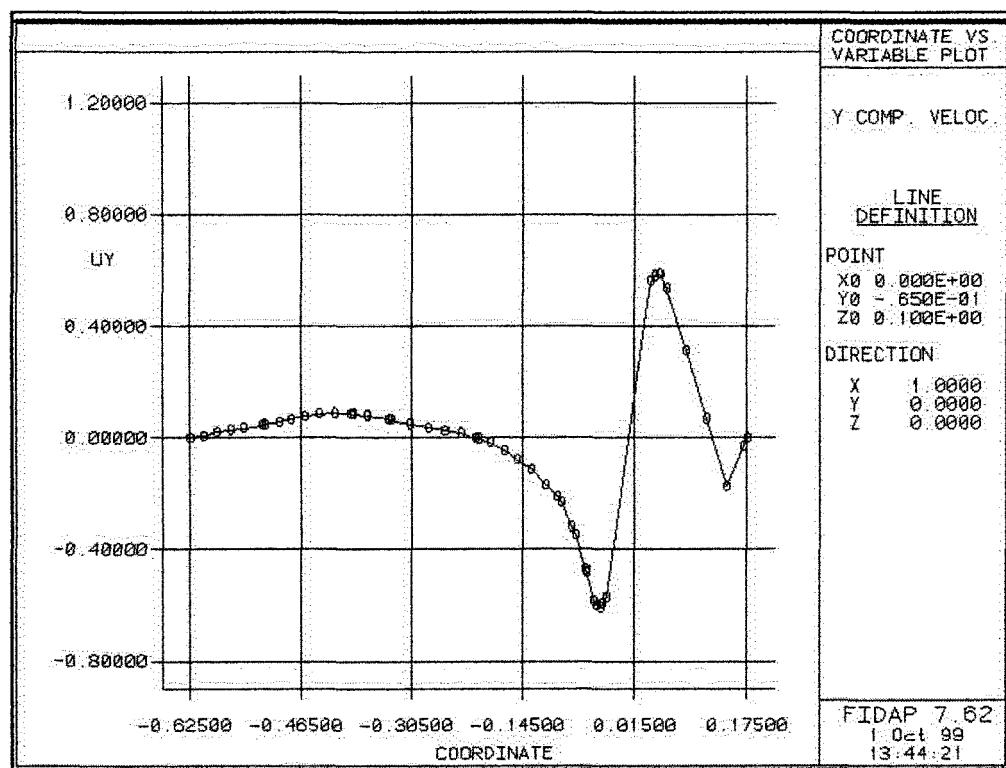
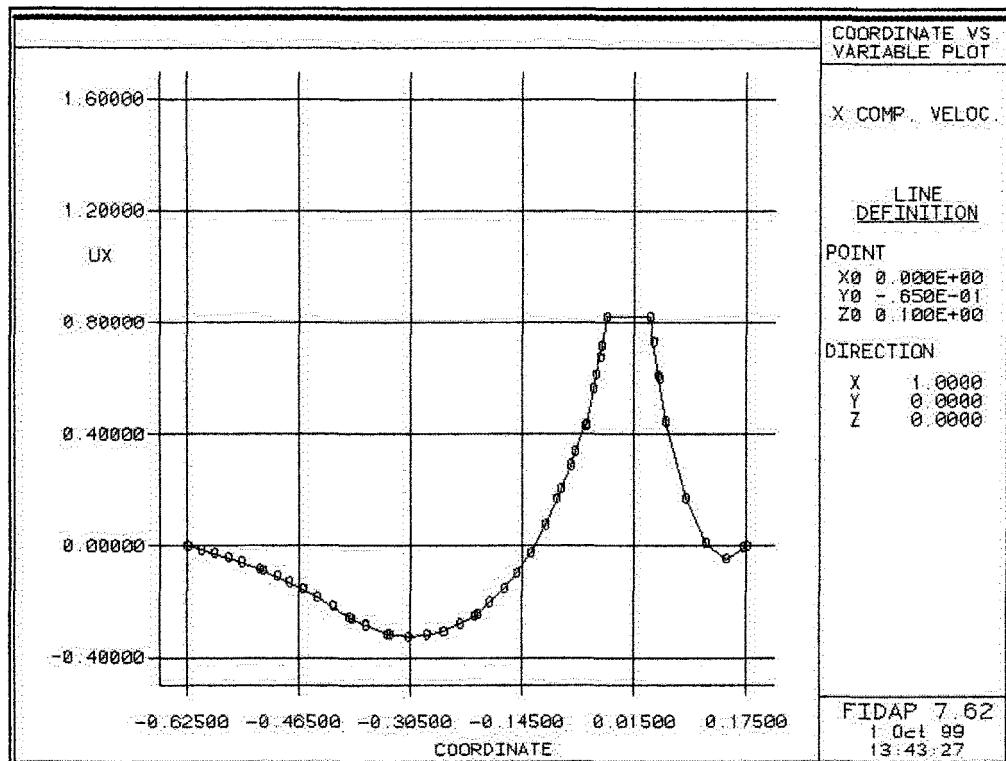
end
```

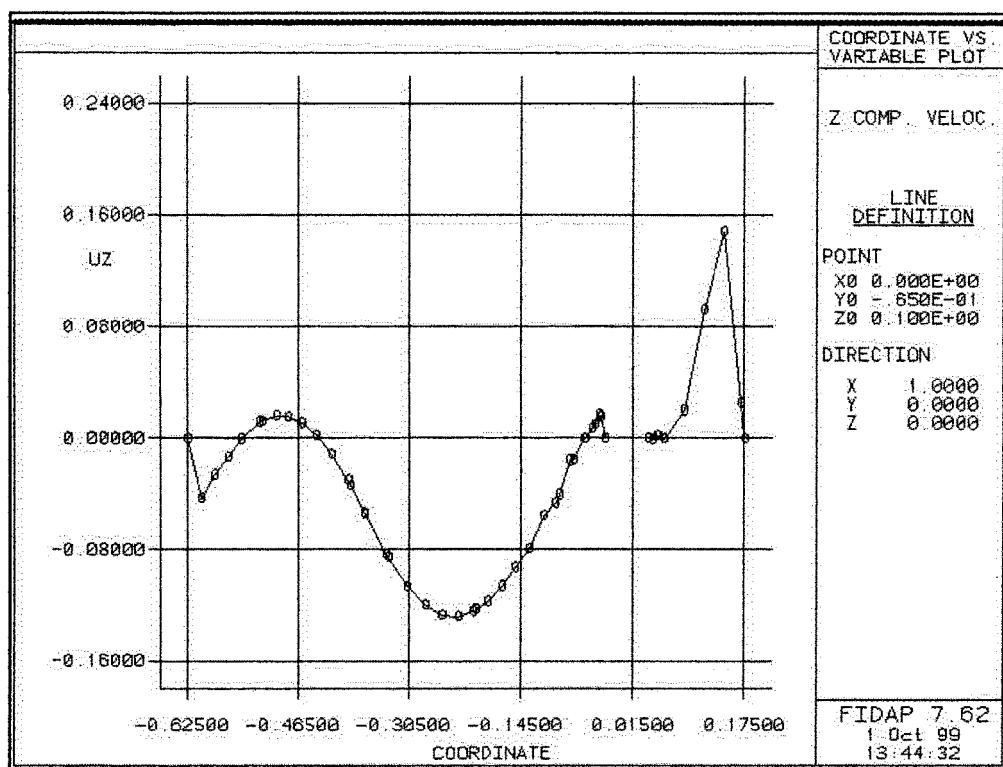
ANNEXE B:

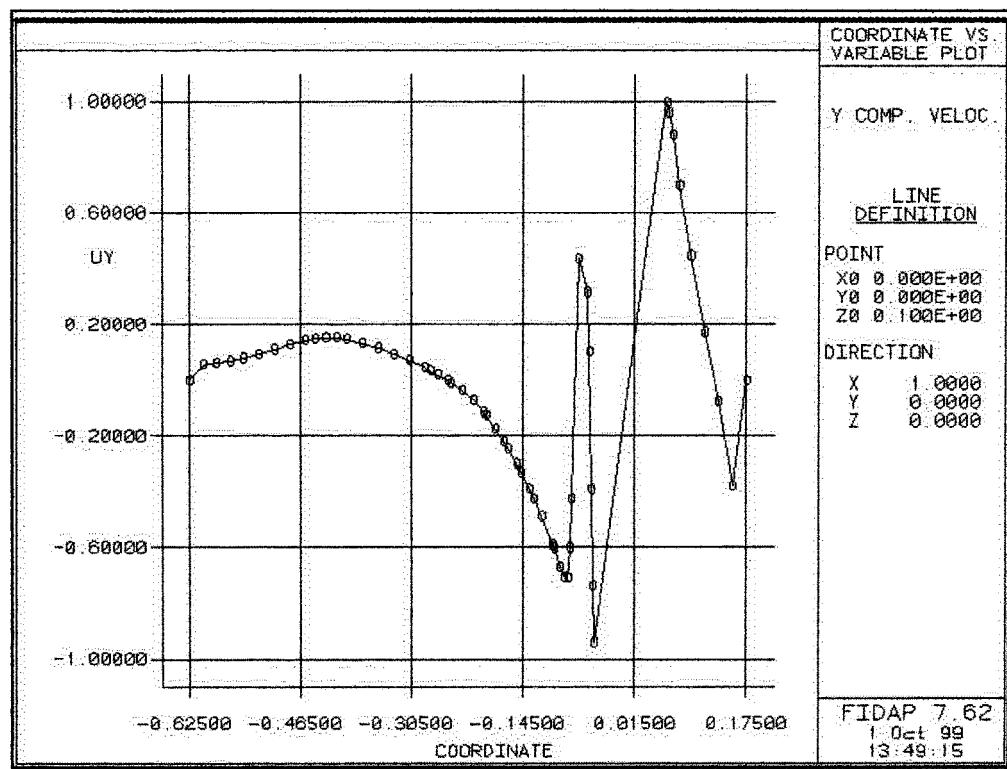
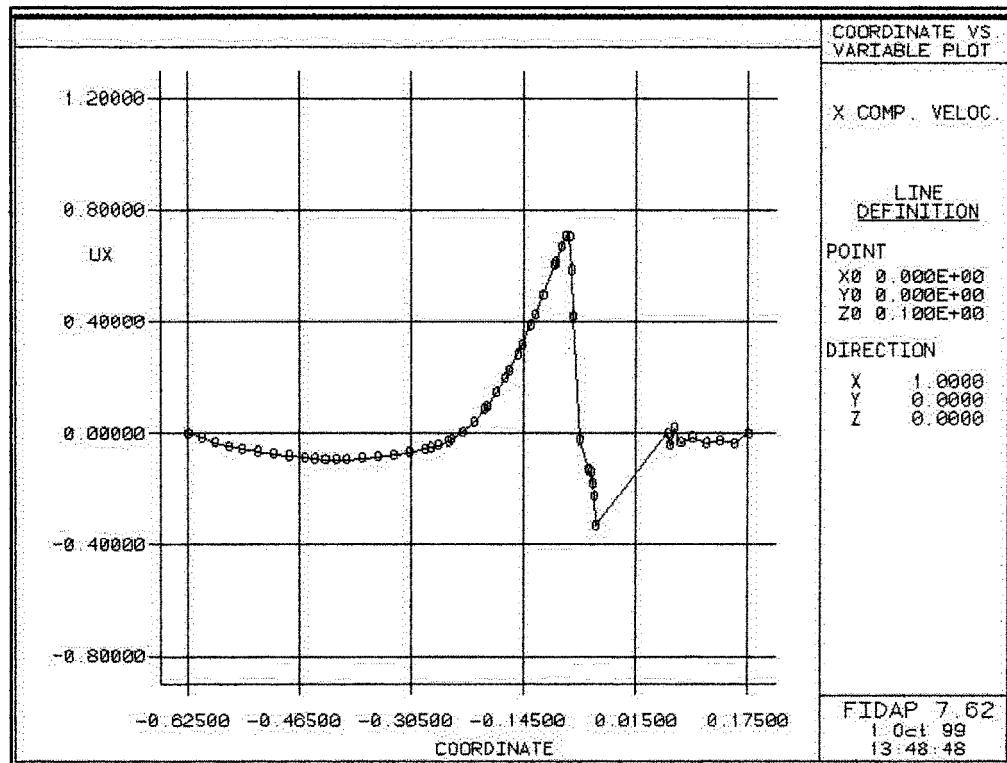
Calculs de vitesse le long de droites

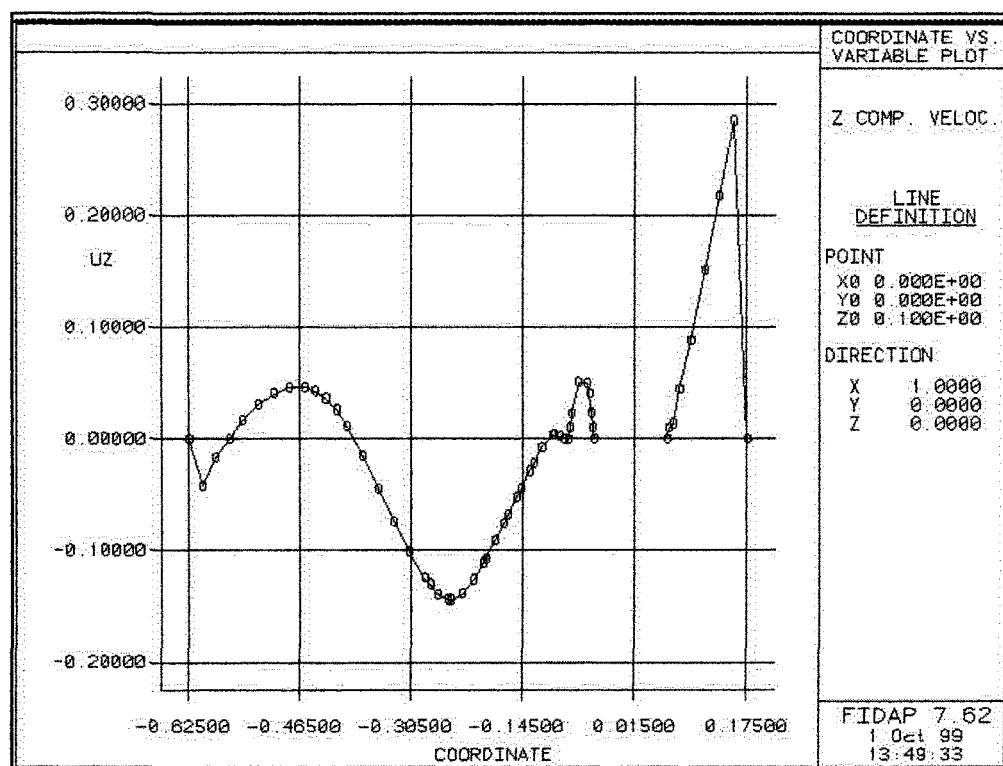
Position équivalente des droites par rapport au modèle à eau

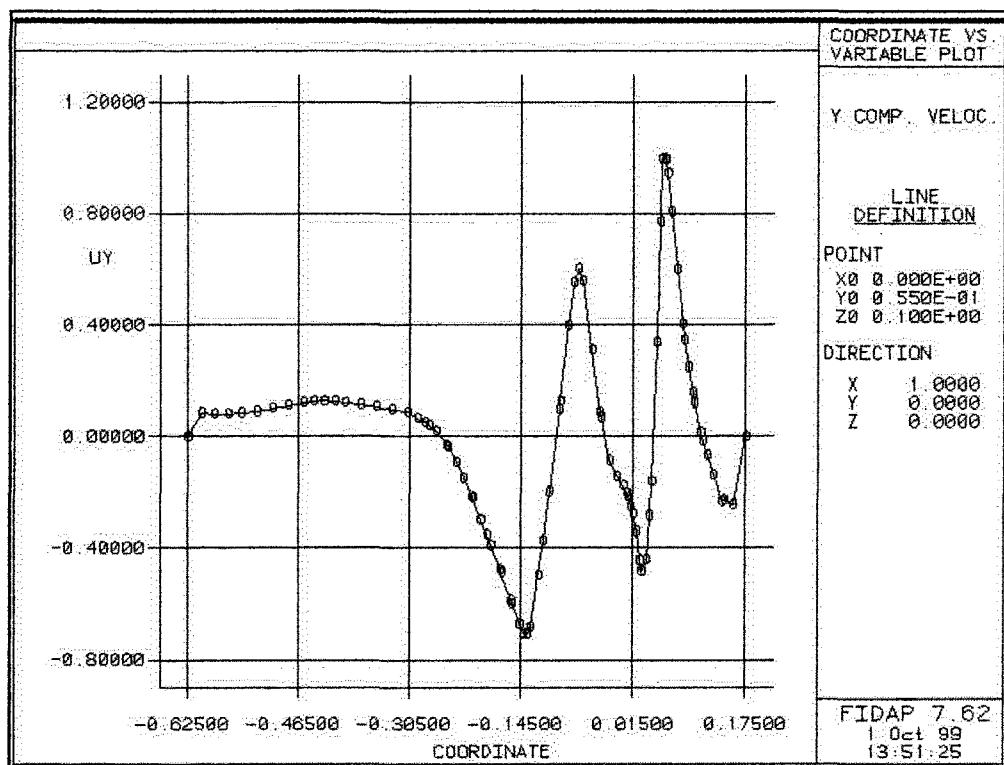
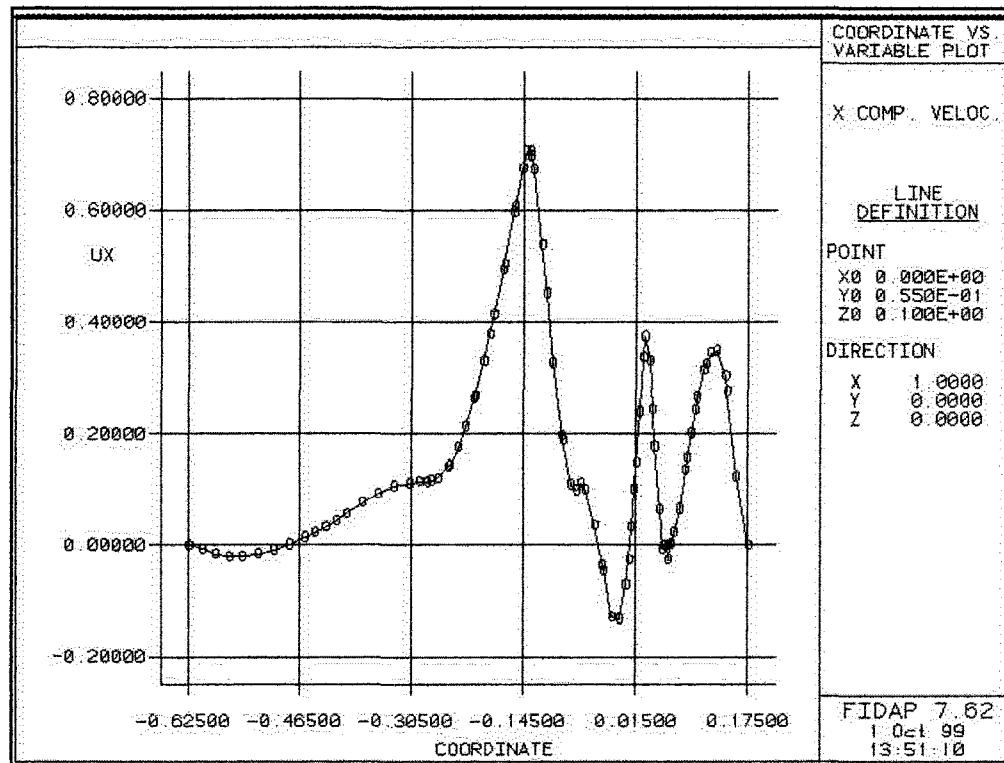
PAGE	POSITION EQUIVALENTE		COMPOSANTES DE LA		
	Y (cm)	Z (cm)	X	Y	Z
344	6	12.5	✓	✓	
345	6	12.5			✓
346	12.5	12.5	✓	✓	
347	12.5	12.5			✓
348	18	12.5	✓	✓	
349	18	12.5			✓
350	22.5	12.5	✓	✓	
351	22.5	12.5			✓
352	30	12.5	✓	✓	
353	30	12.5			✓
354	34.5	12.5	✓	✓	
355	34.5	12.5			✓
356	6	22.5	✓	✓	
357	6	22.5			✓
358	12.5	22.5	✓	✓	
359	12.5	22.5			✓
360	18	22.5	✓	✓	
361	18	22.5			✓
362	22.5	22.5	✓	✓	
363	22.5	22.5			✓
364	30	22.5	✓	✓	
365	30	22.5			✓
366	34.5	22.5	✓	✓	
367	34.5	22.5			✓
368	6	3	✓	✓	
369	6	3			✓
370	12.5	3	✓	✓	
371	12.5	3			✓
372	18	3	✓	✓	
373	18	3			✓
374	22.5	3	✓	✓	
375	22.5	3			✓
376	30	3	✓	✓	
377	30	3			✓
378	34.5	3	✓	✓	
379	34.5	3			✓

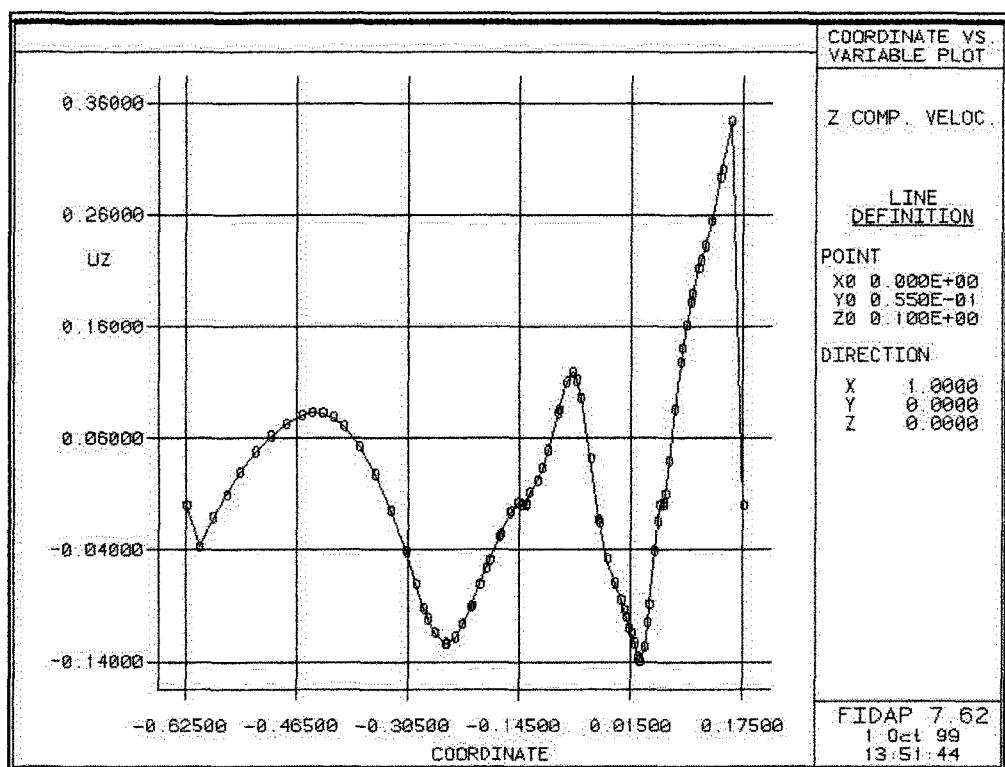


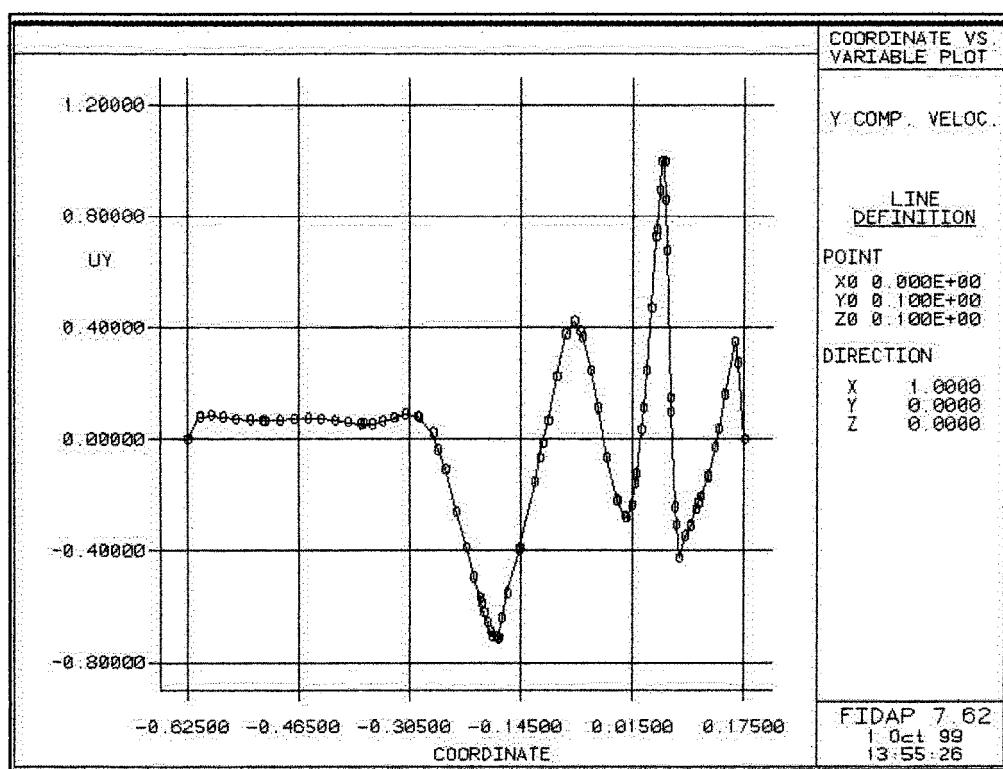
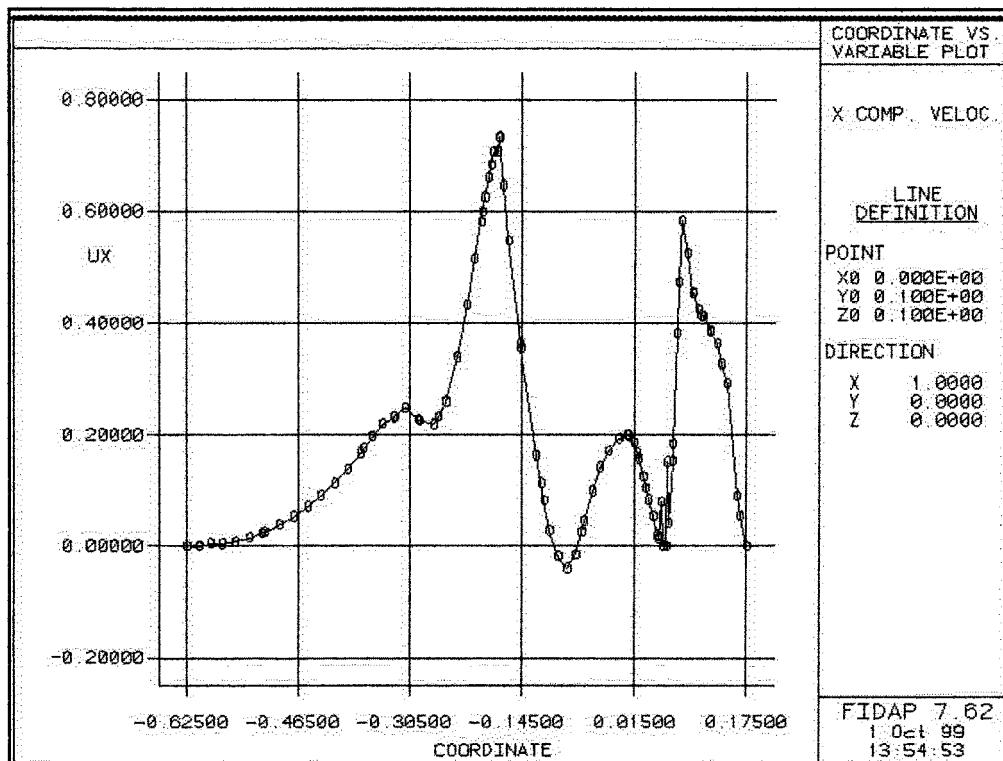


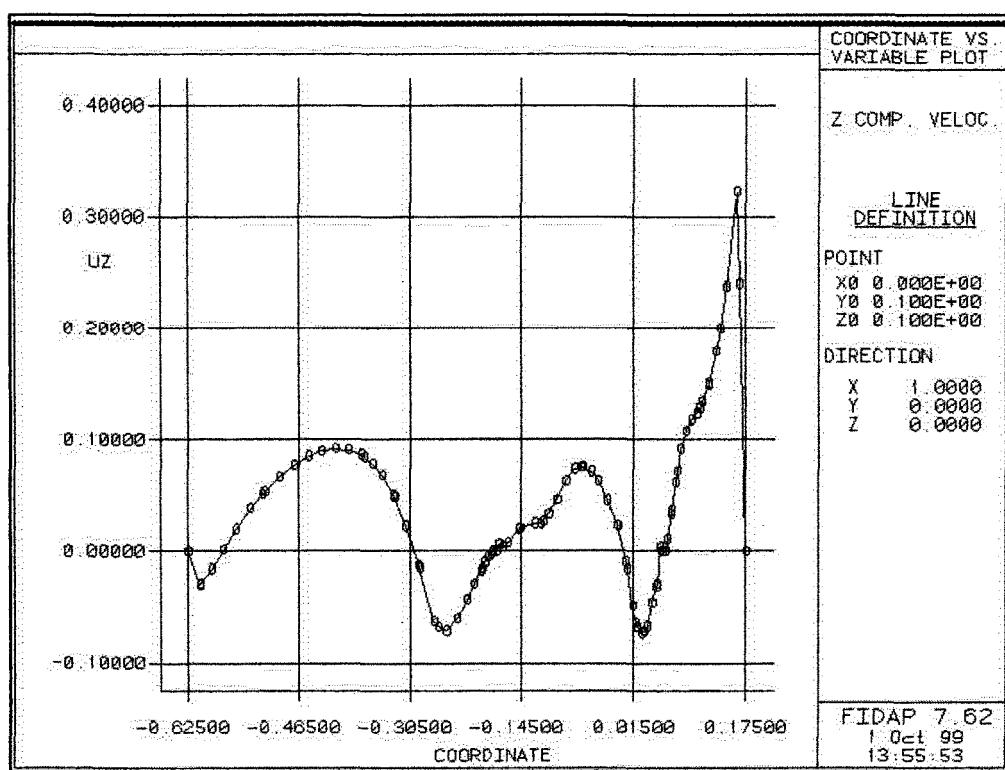


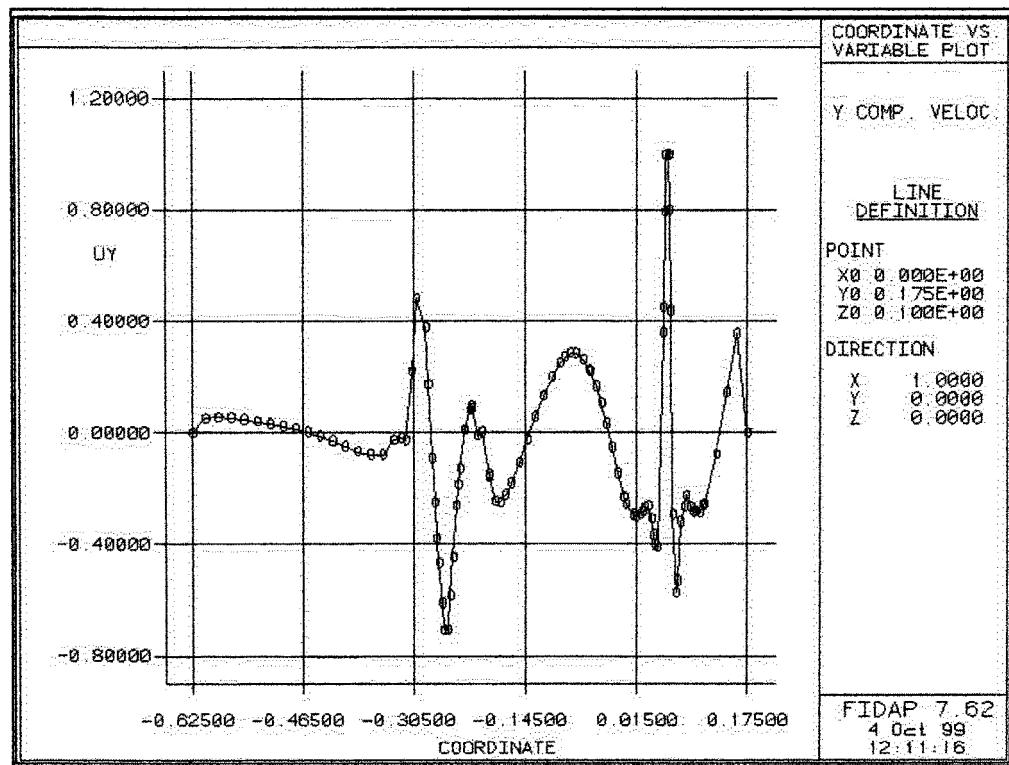
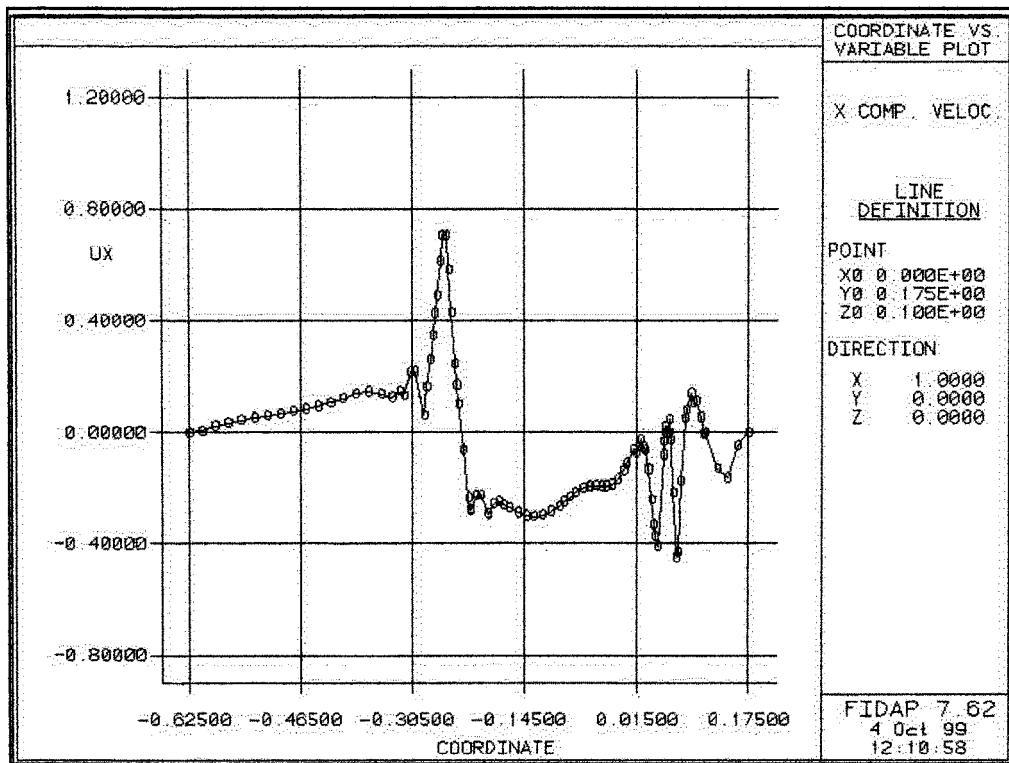


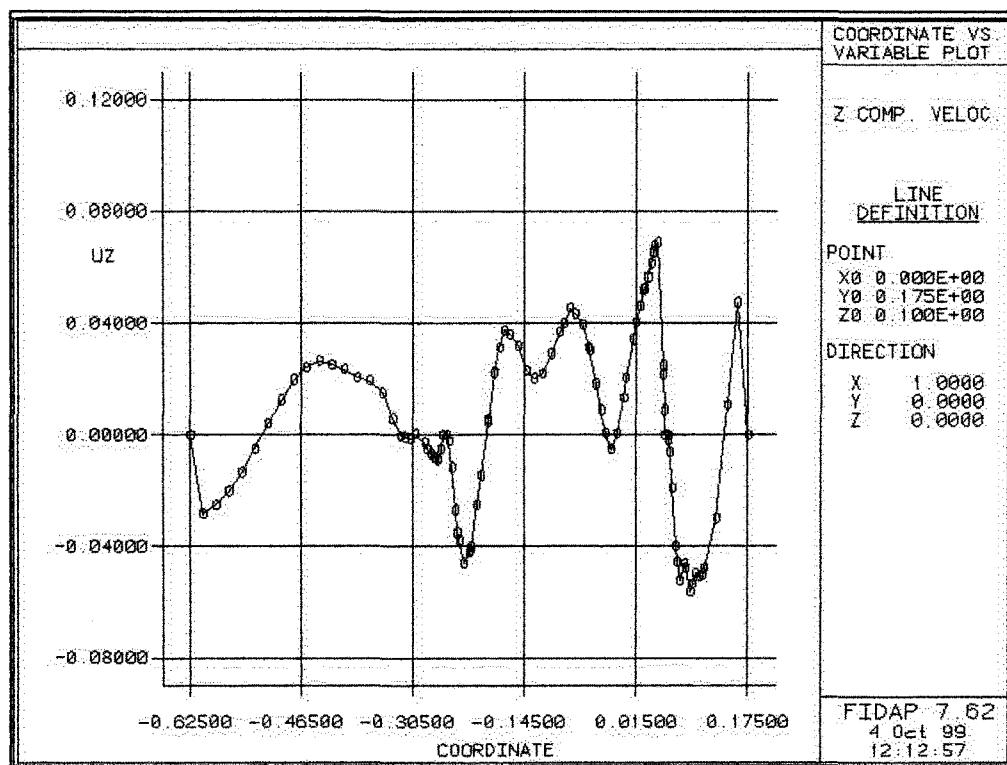


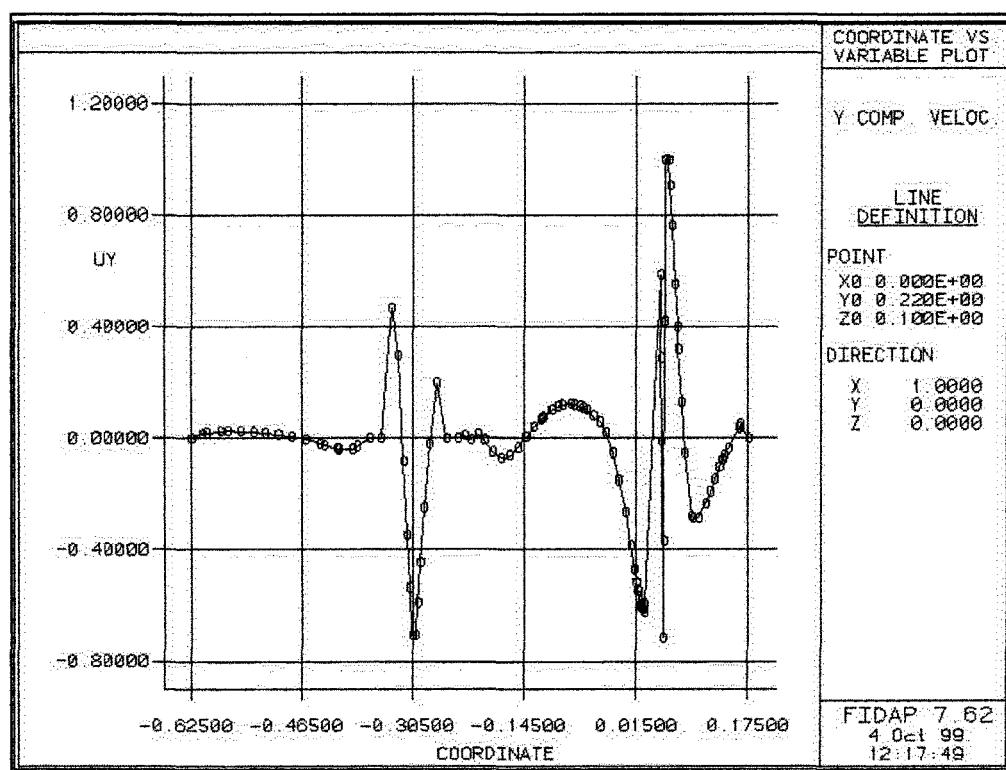
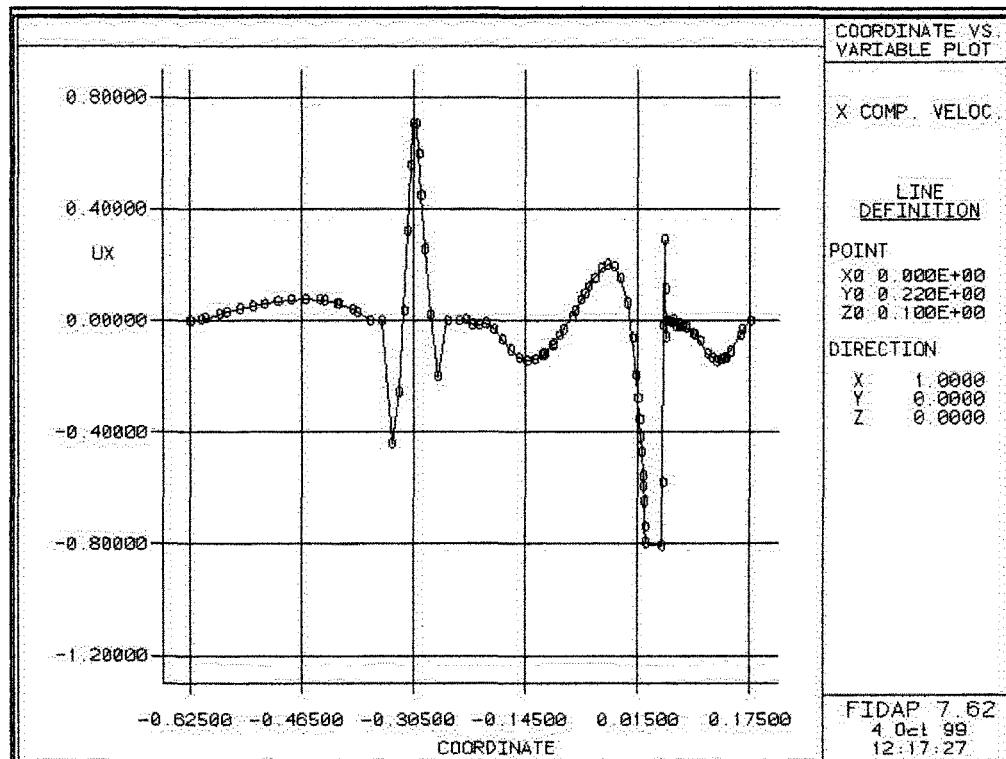


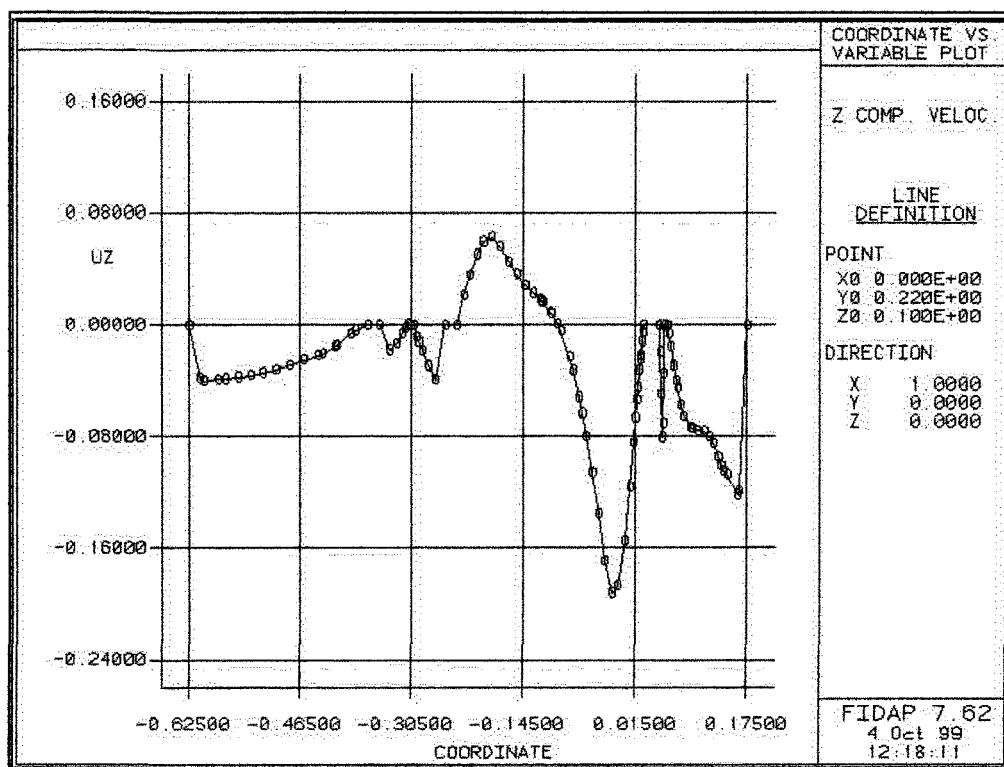


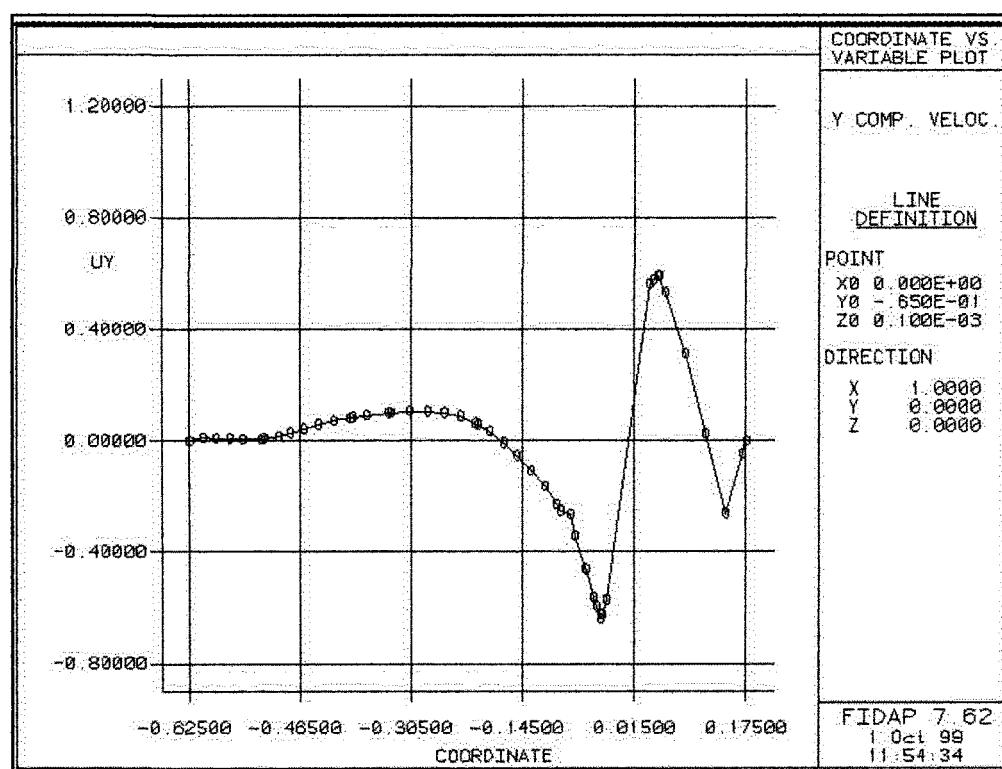
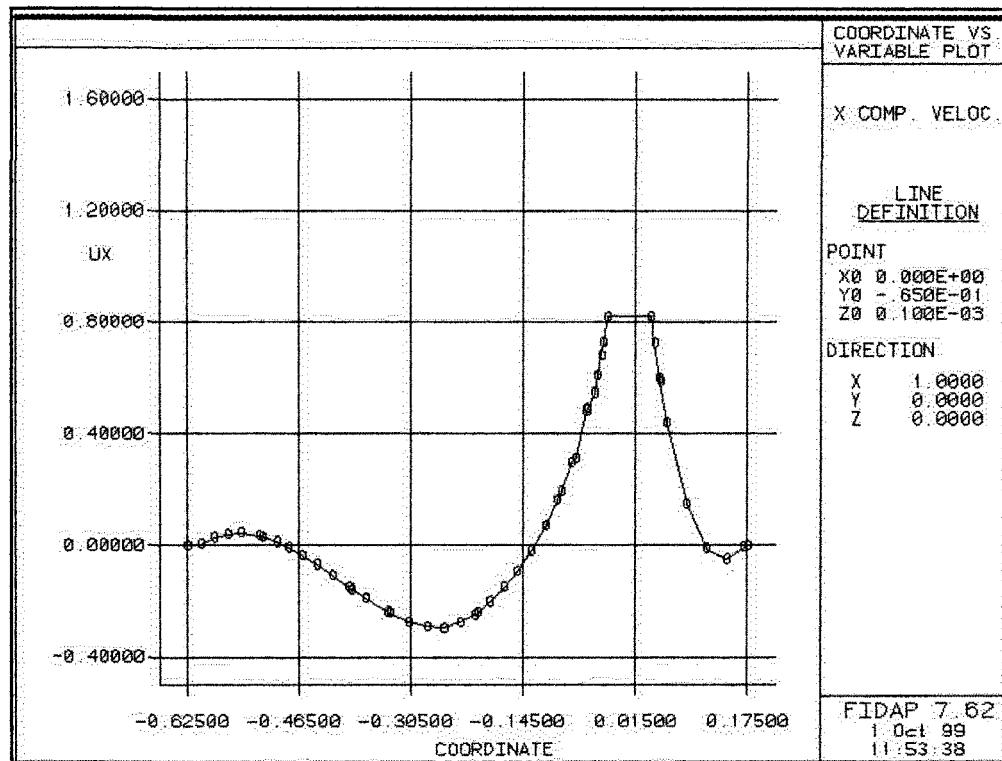


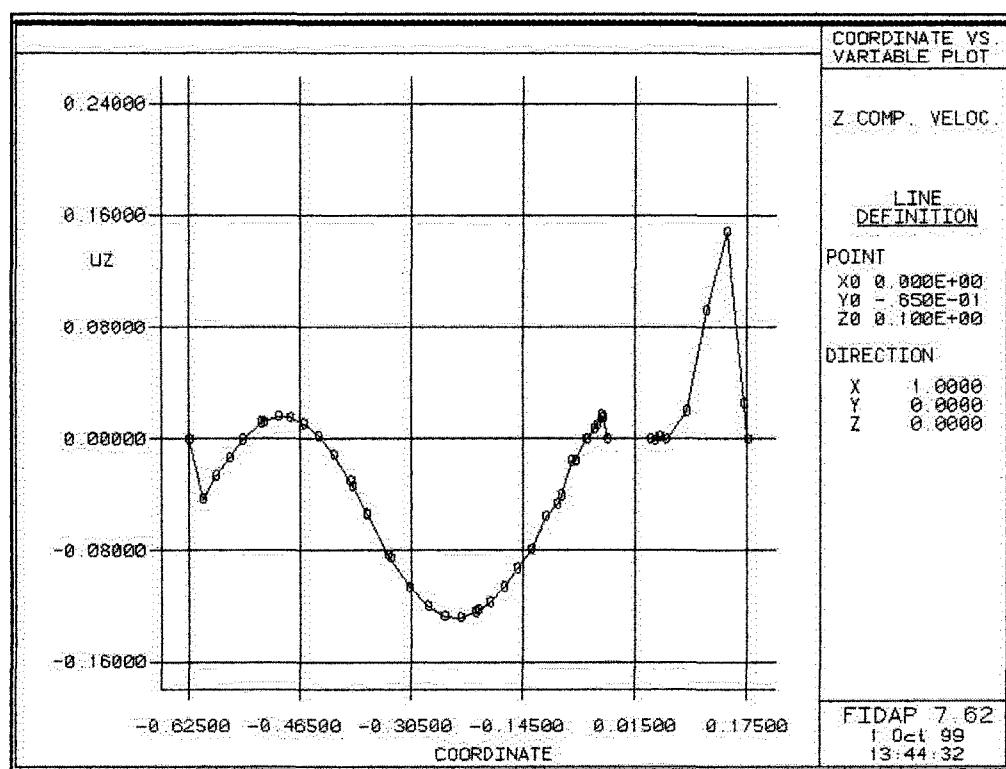


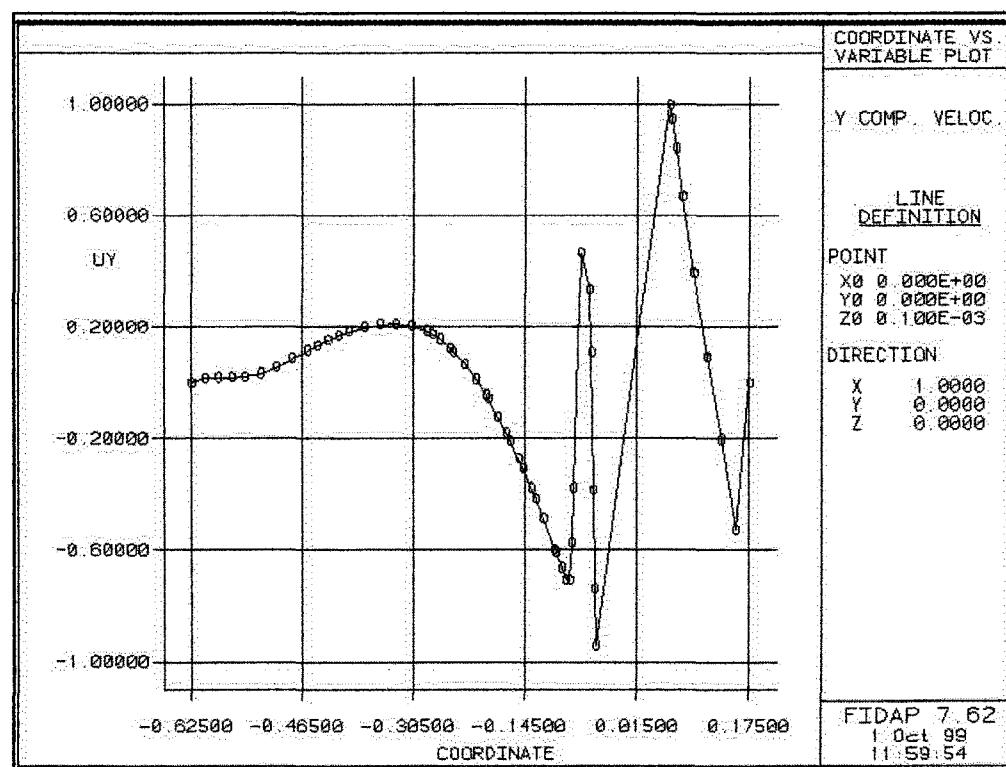
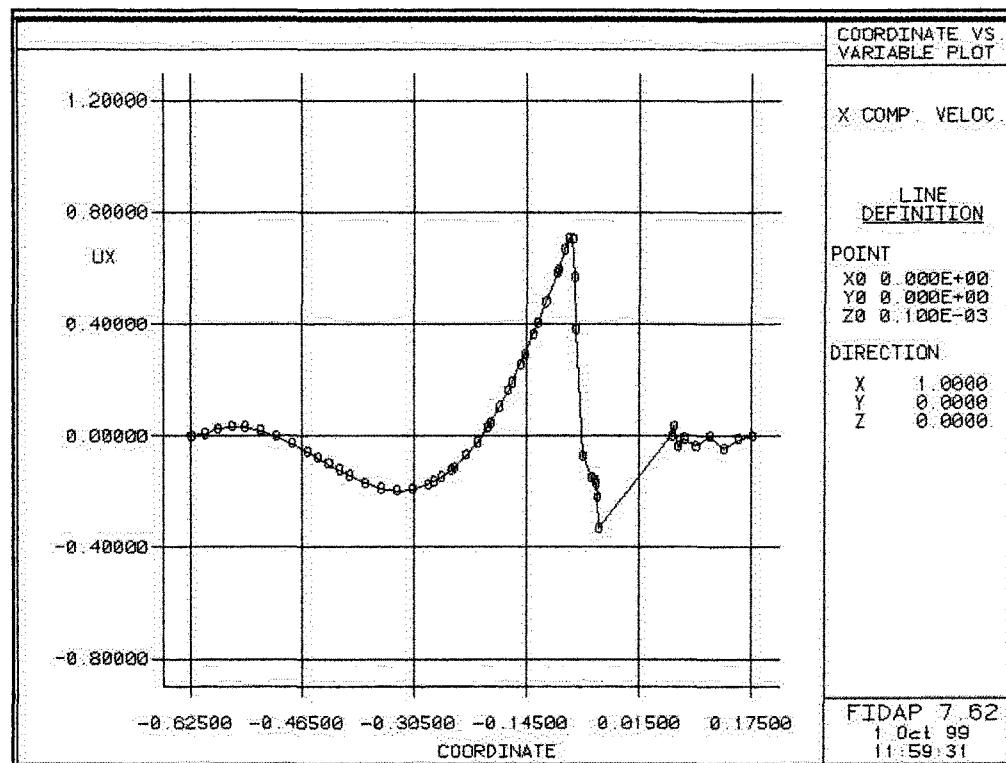


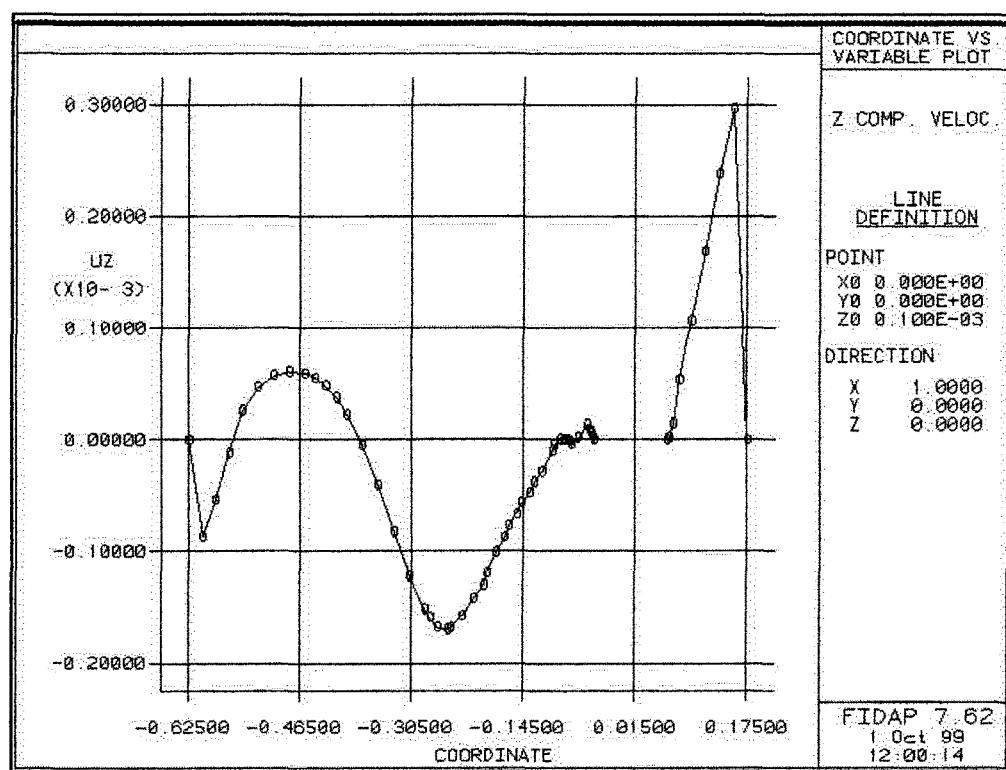


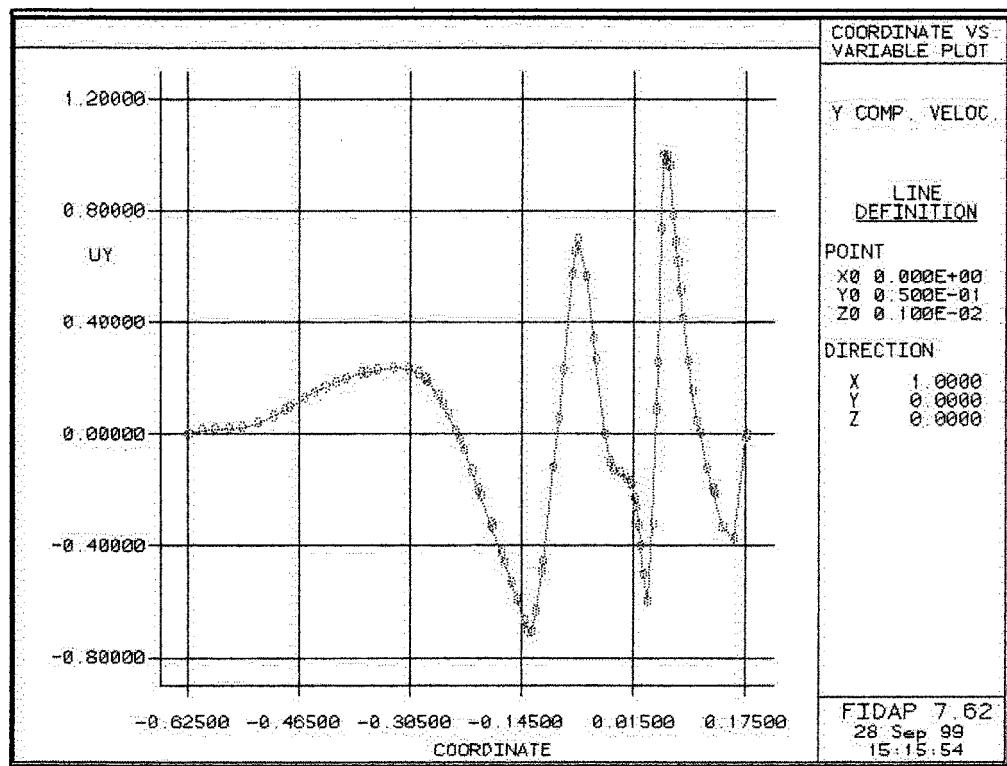
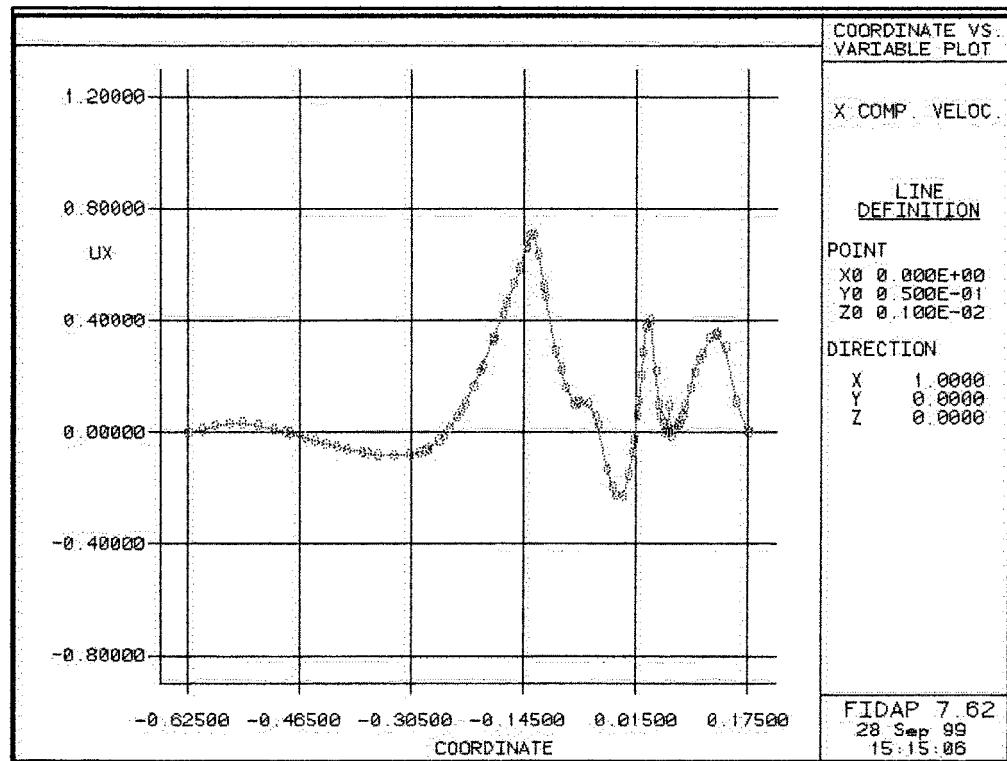


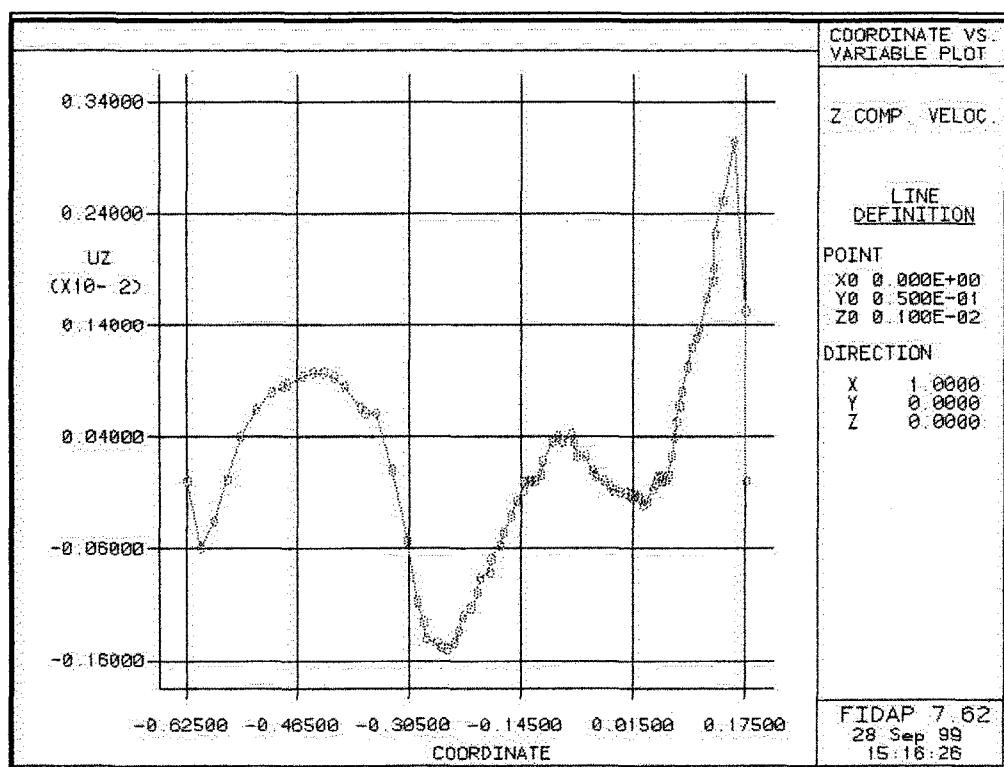


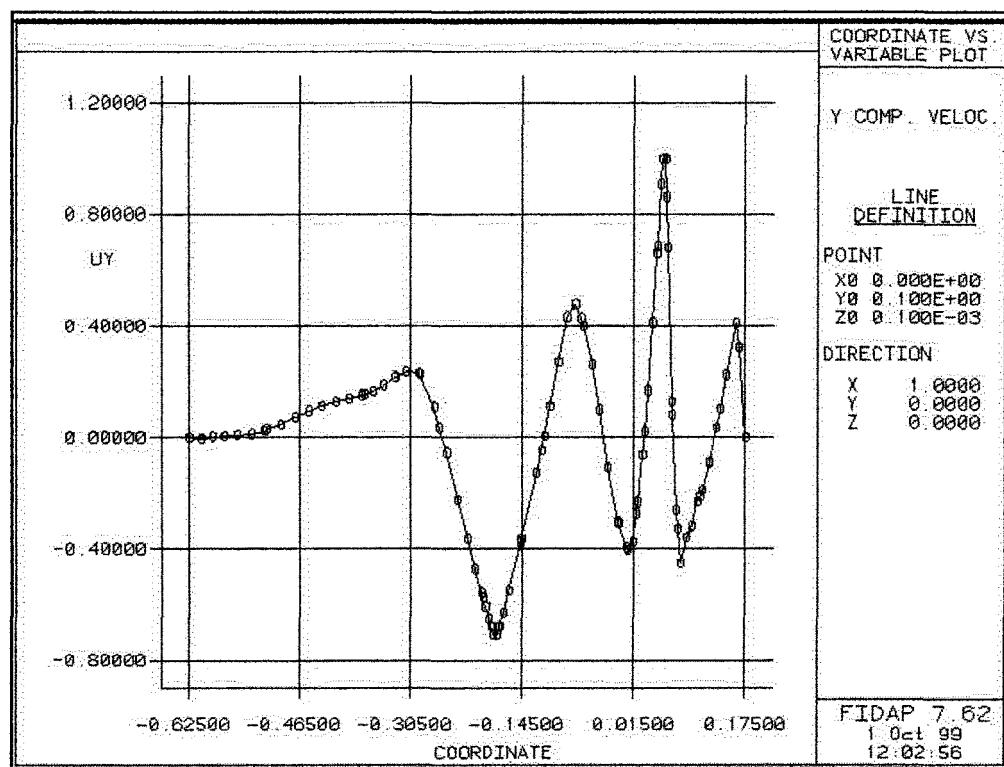
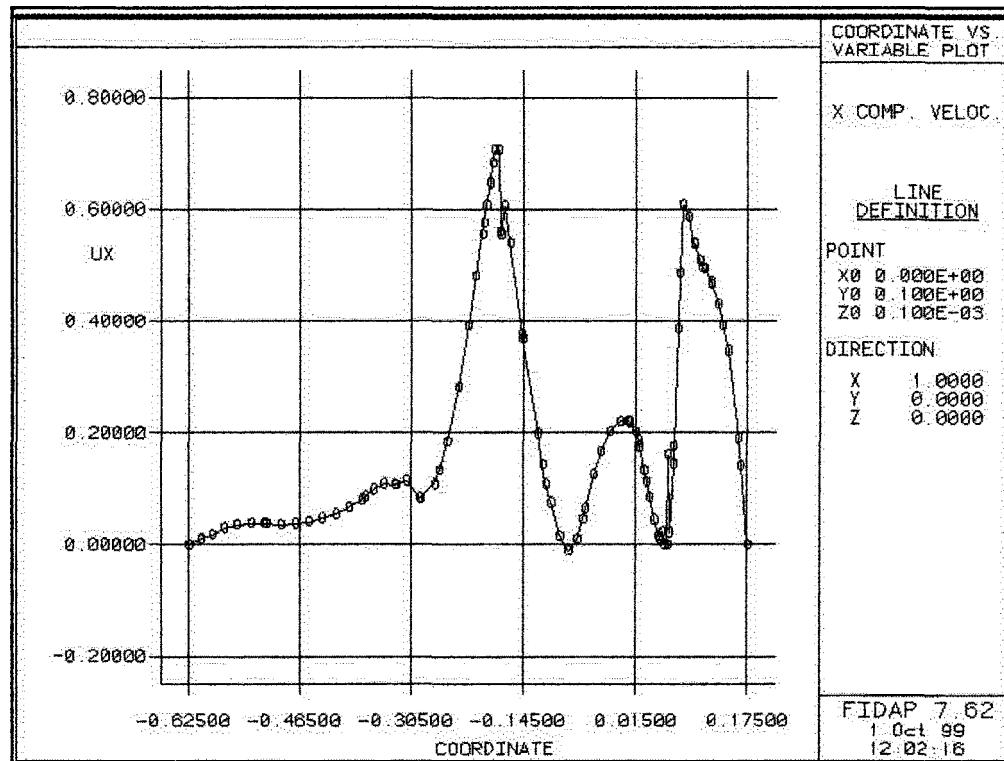


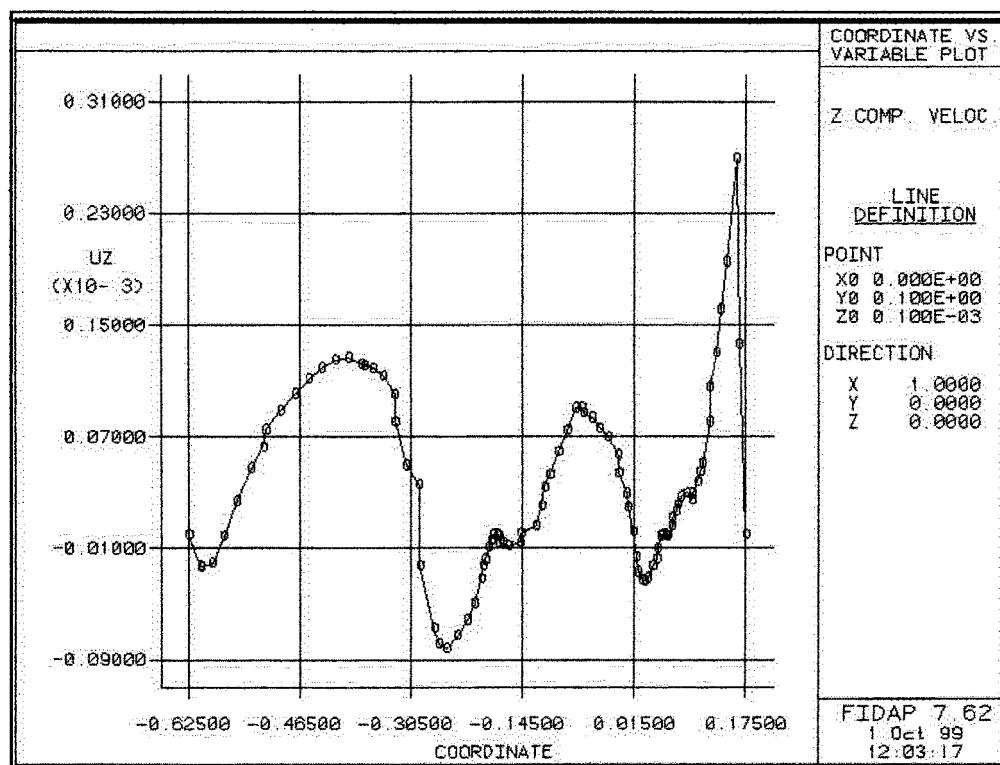


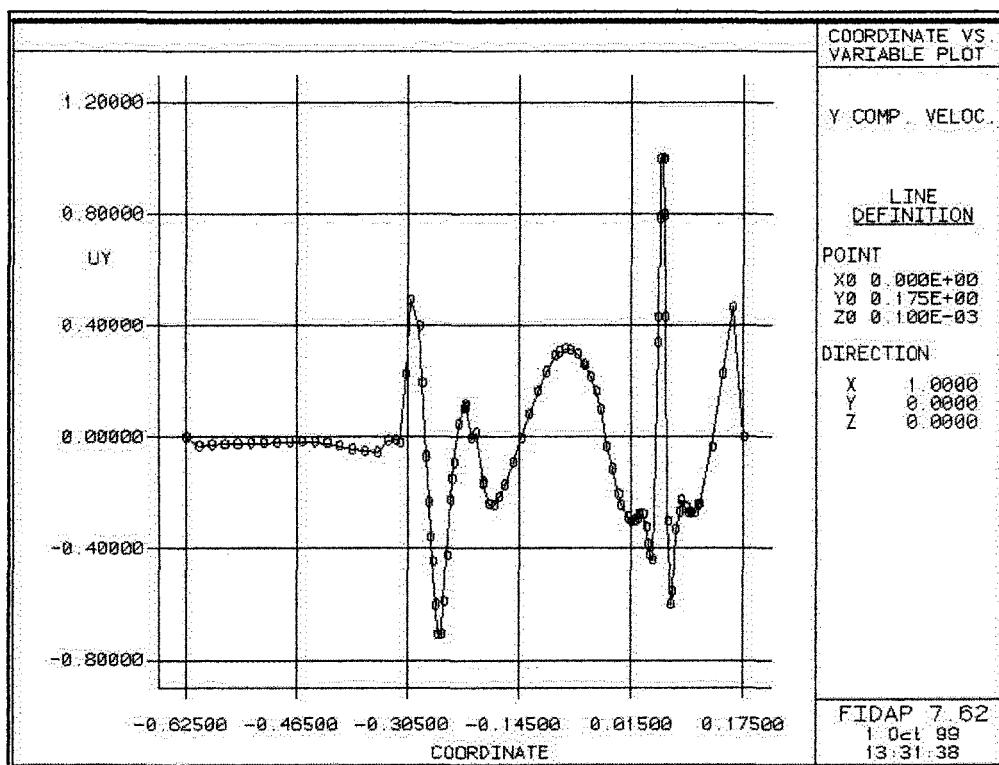
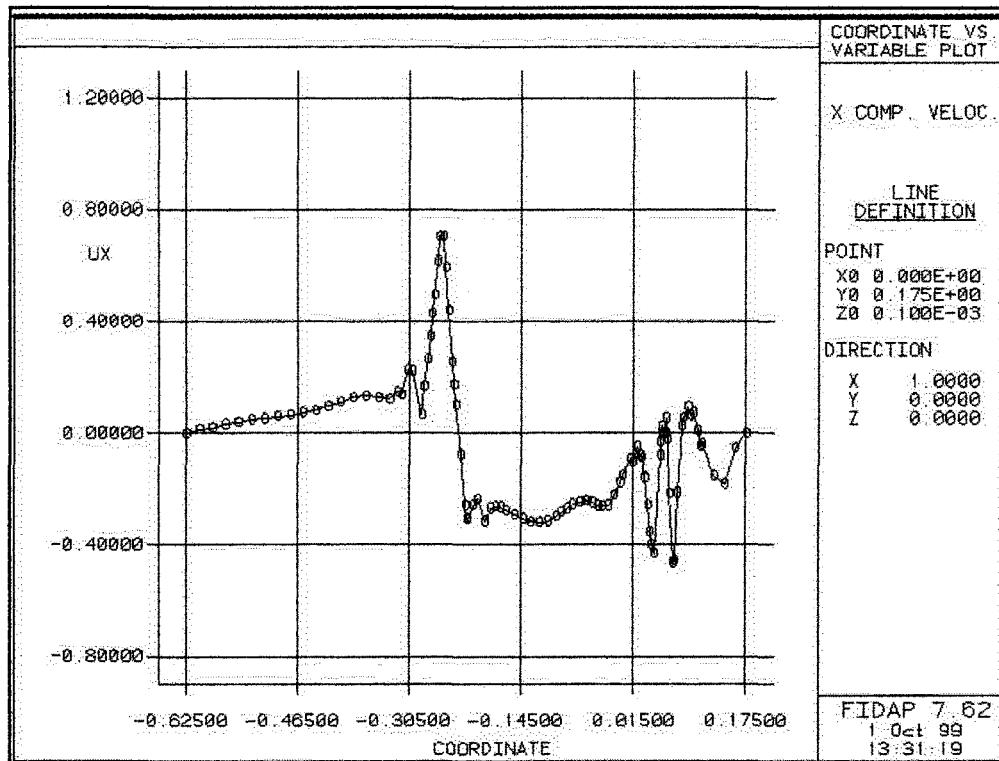


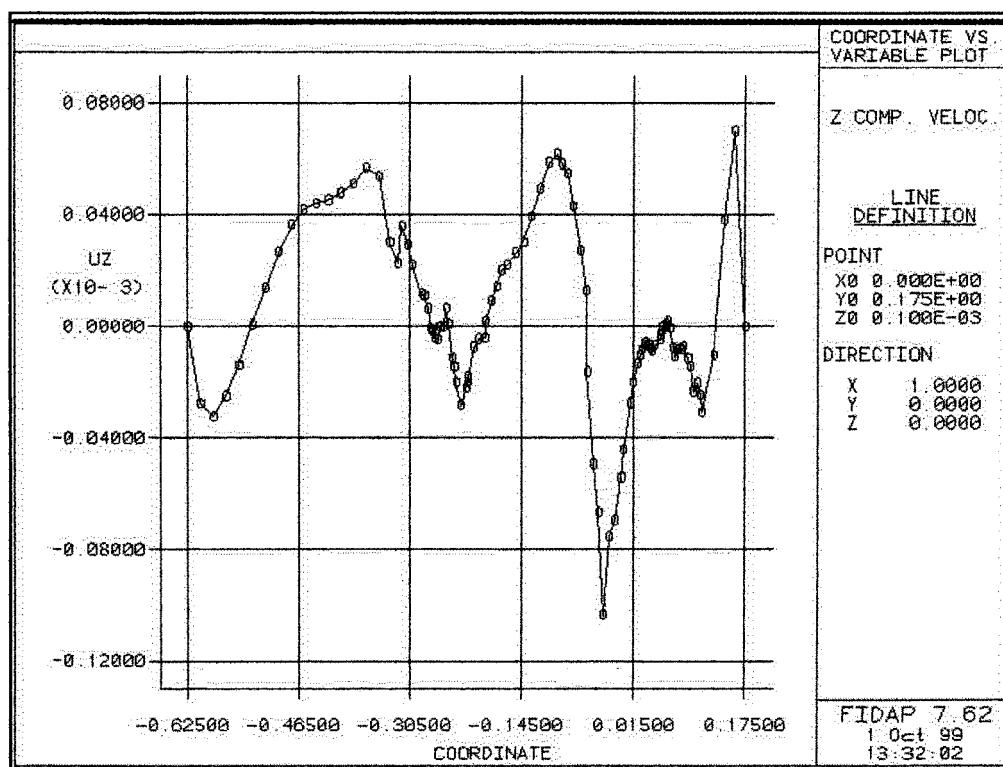


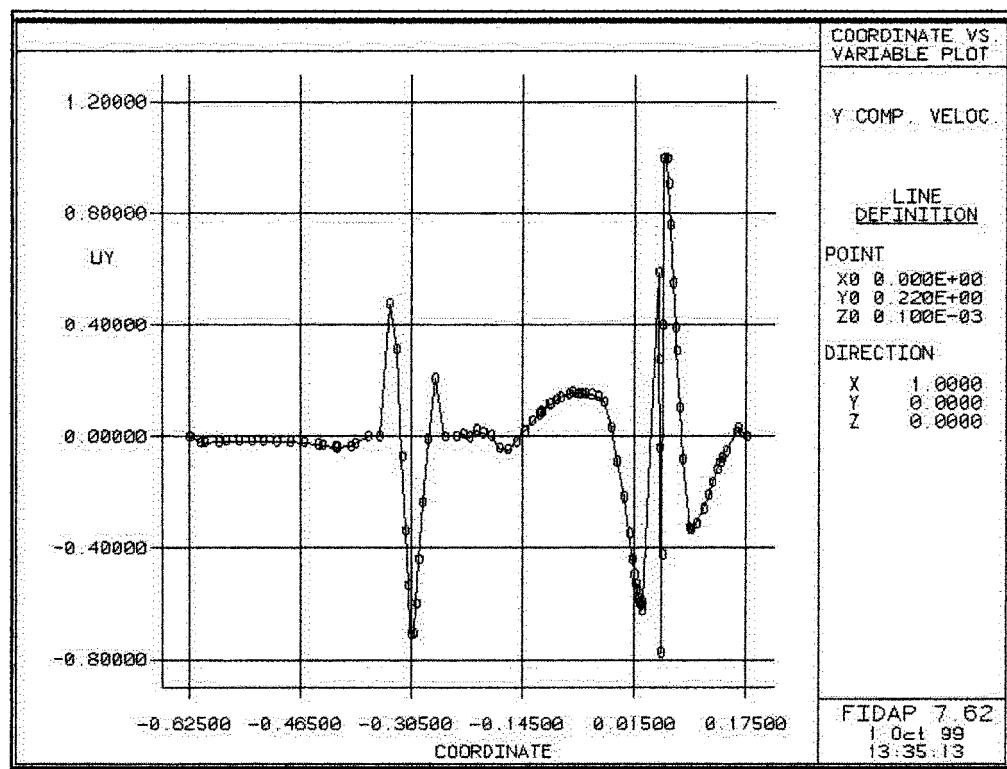
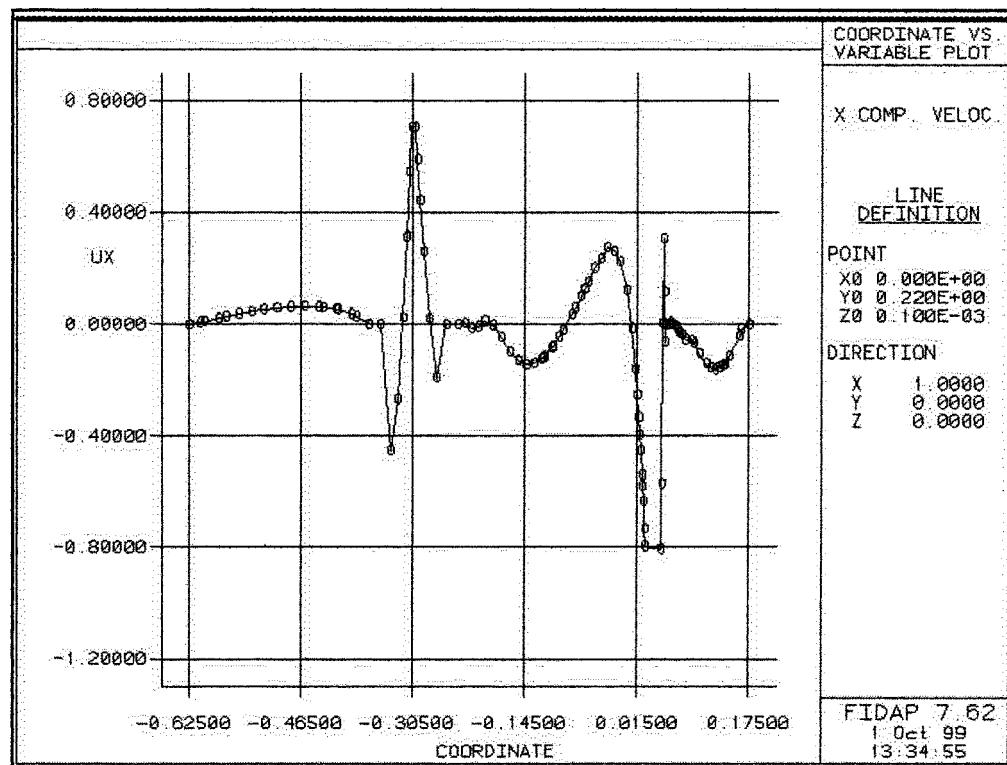


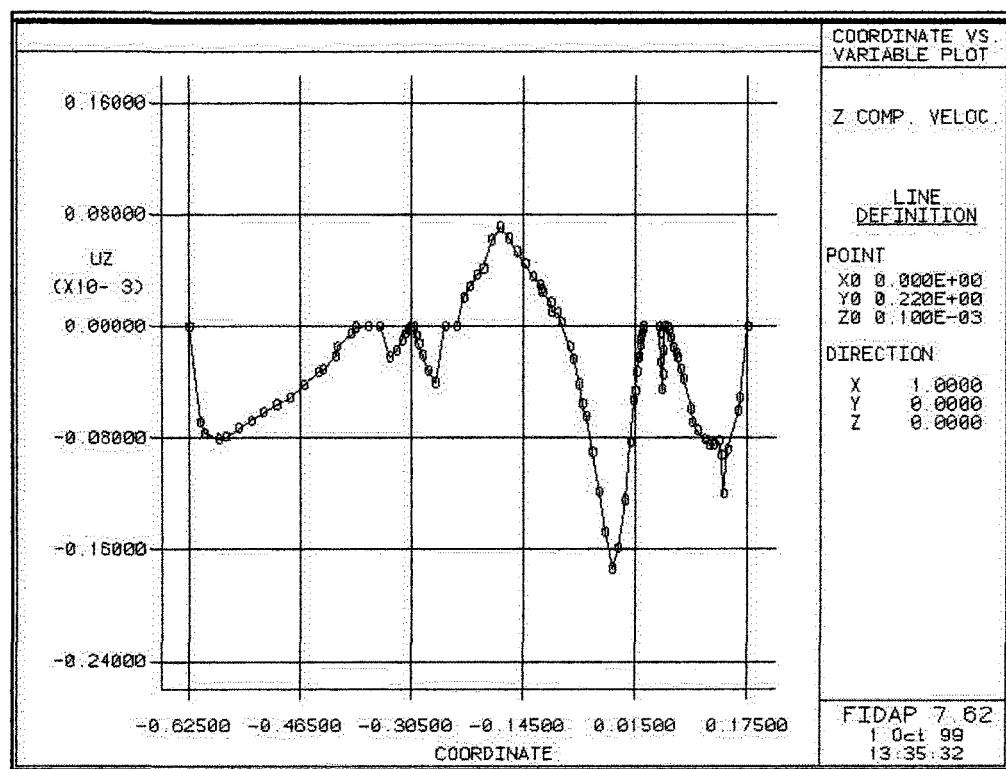


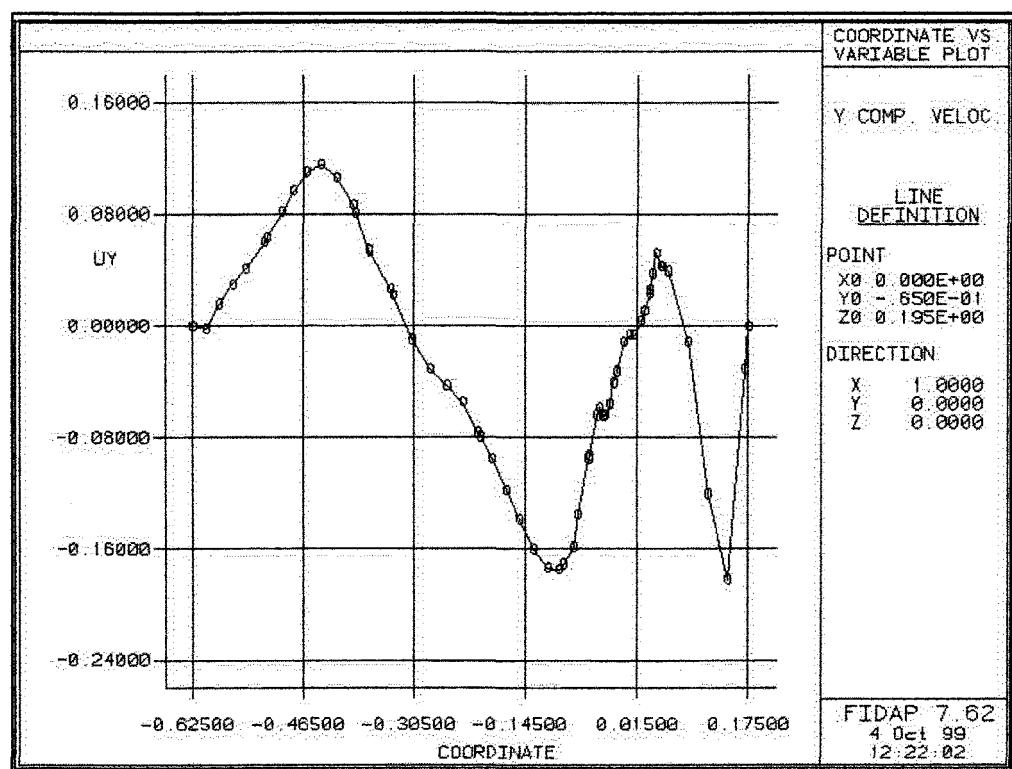
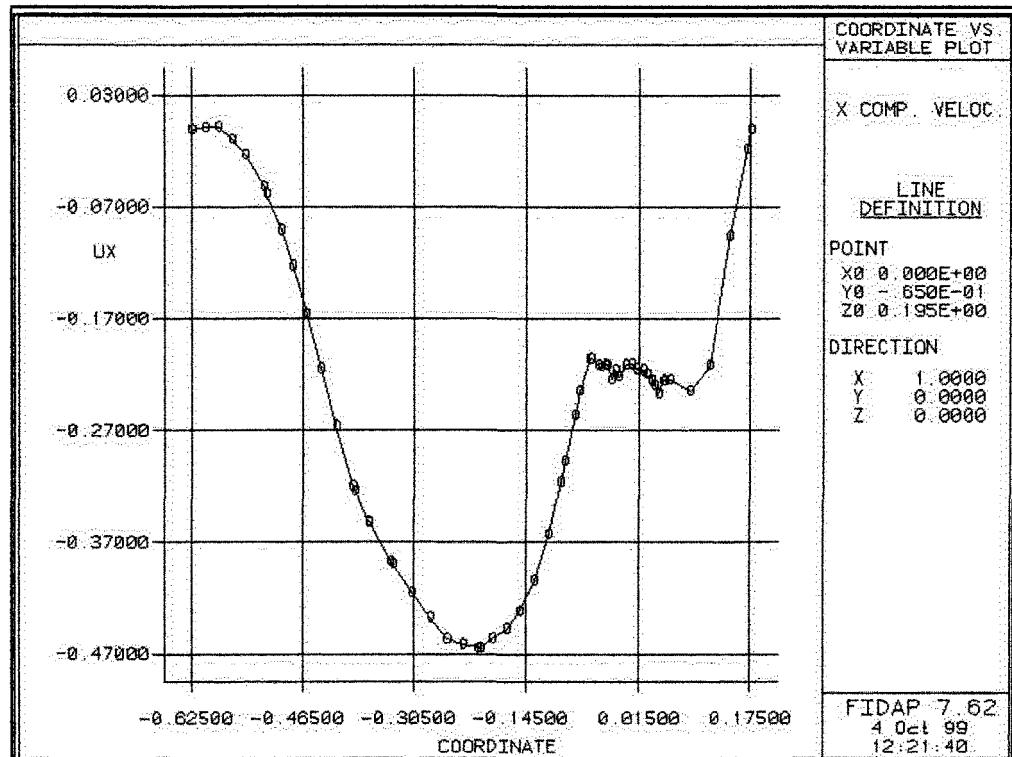


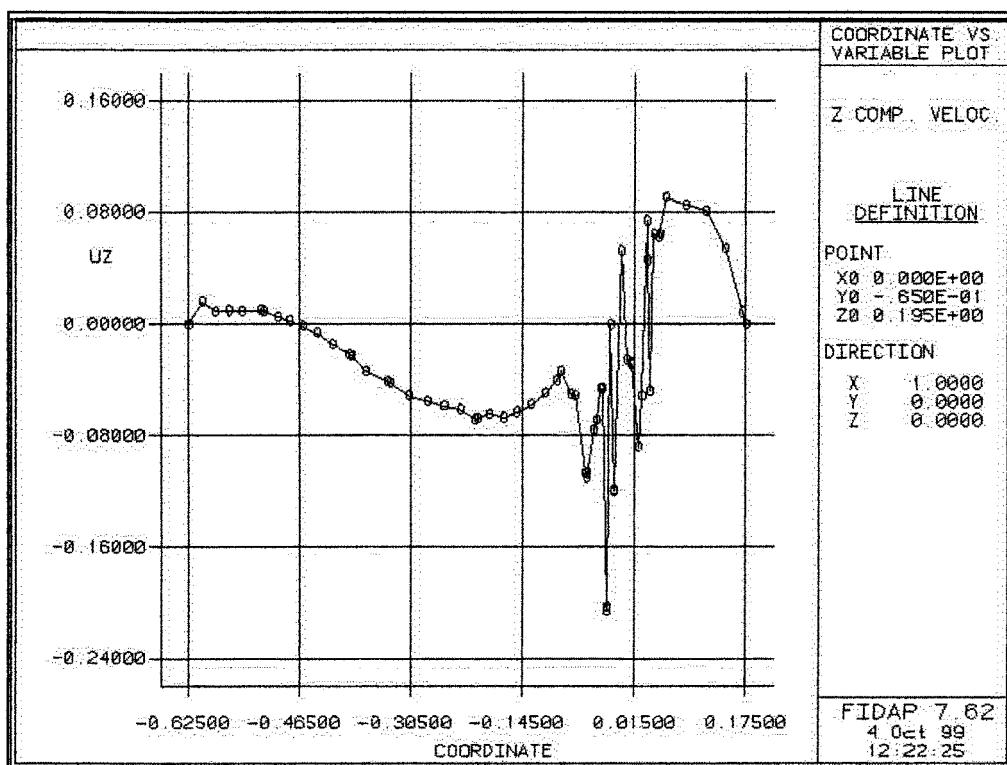


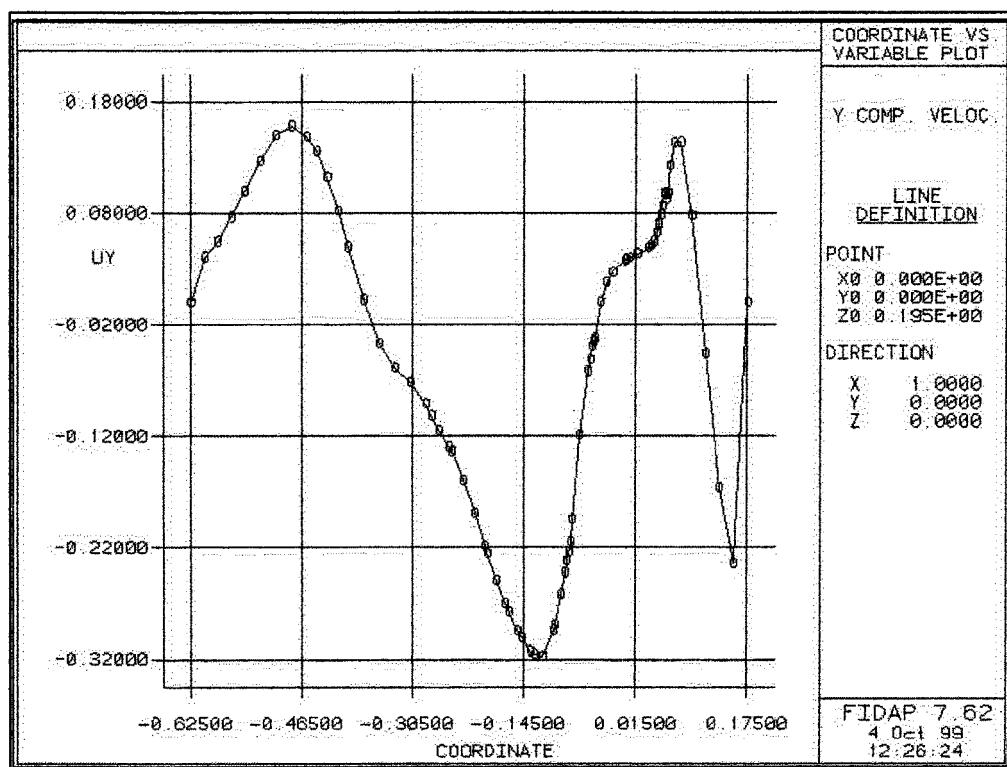
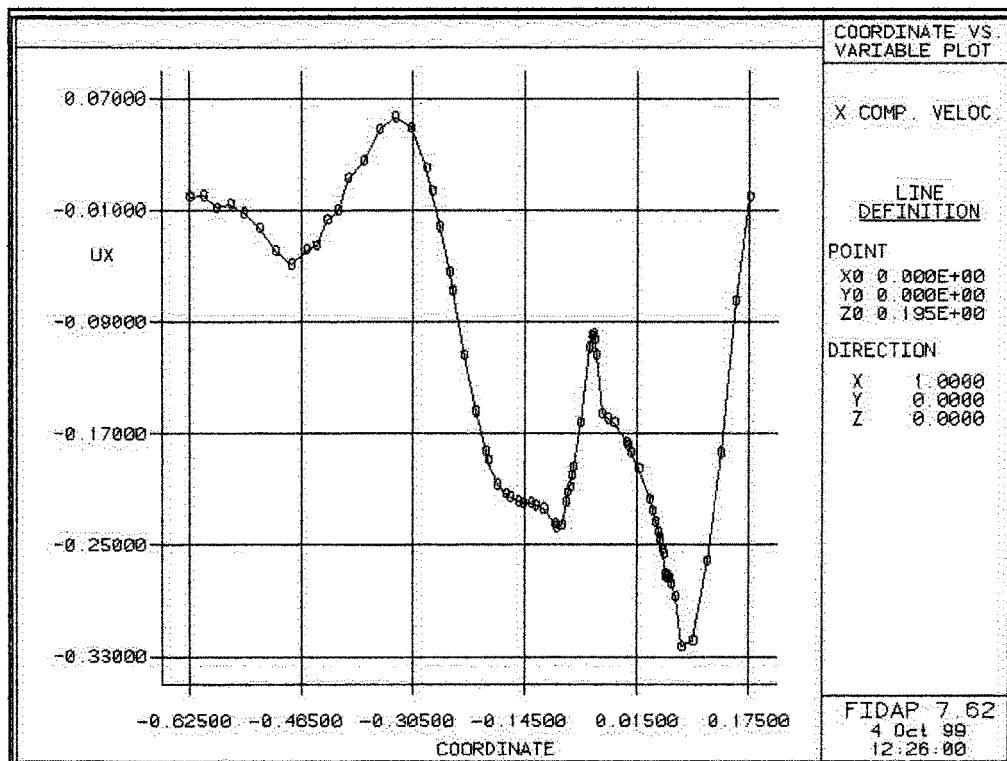


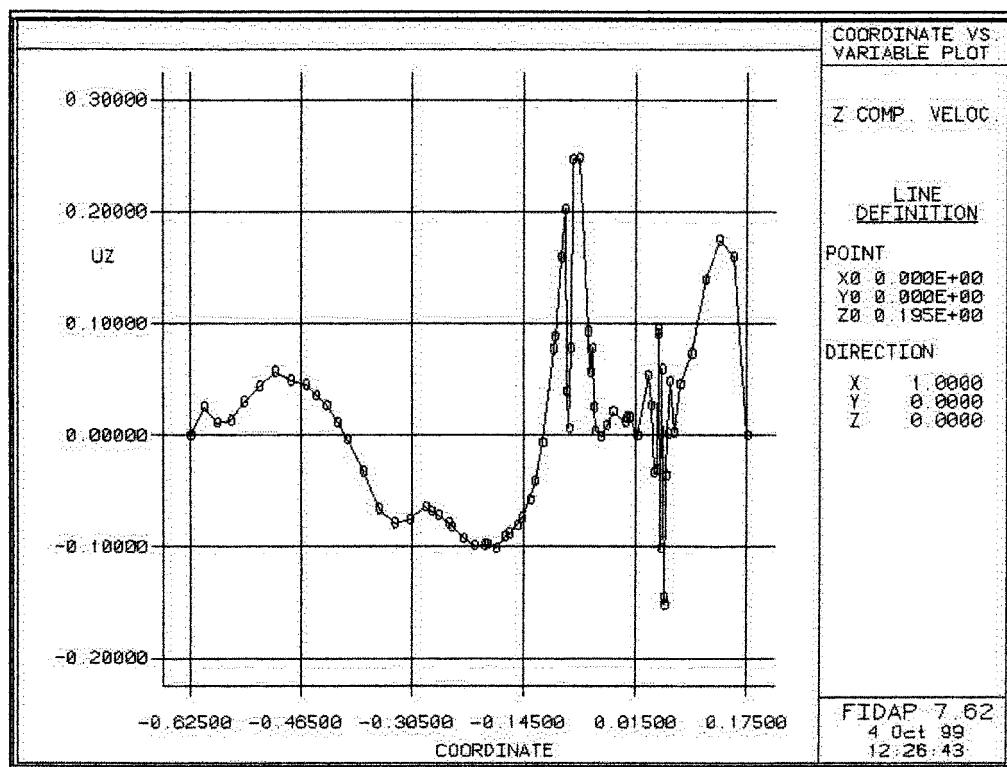


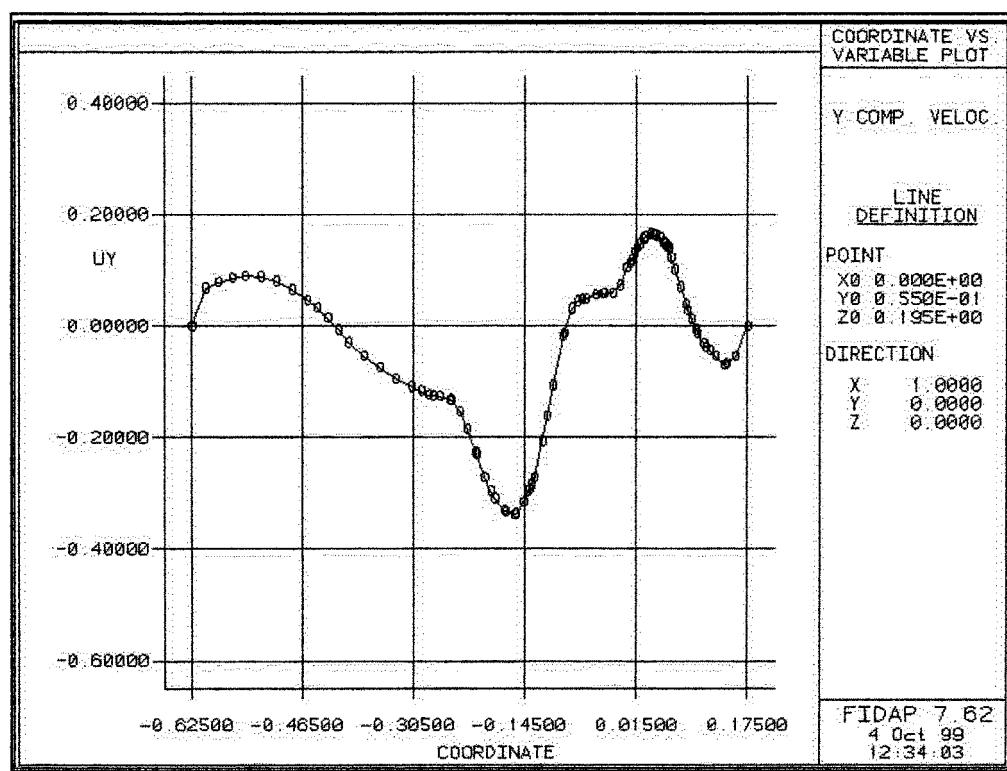
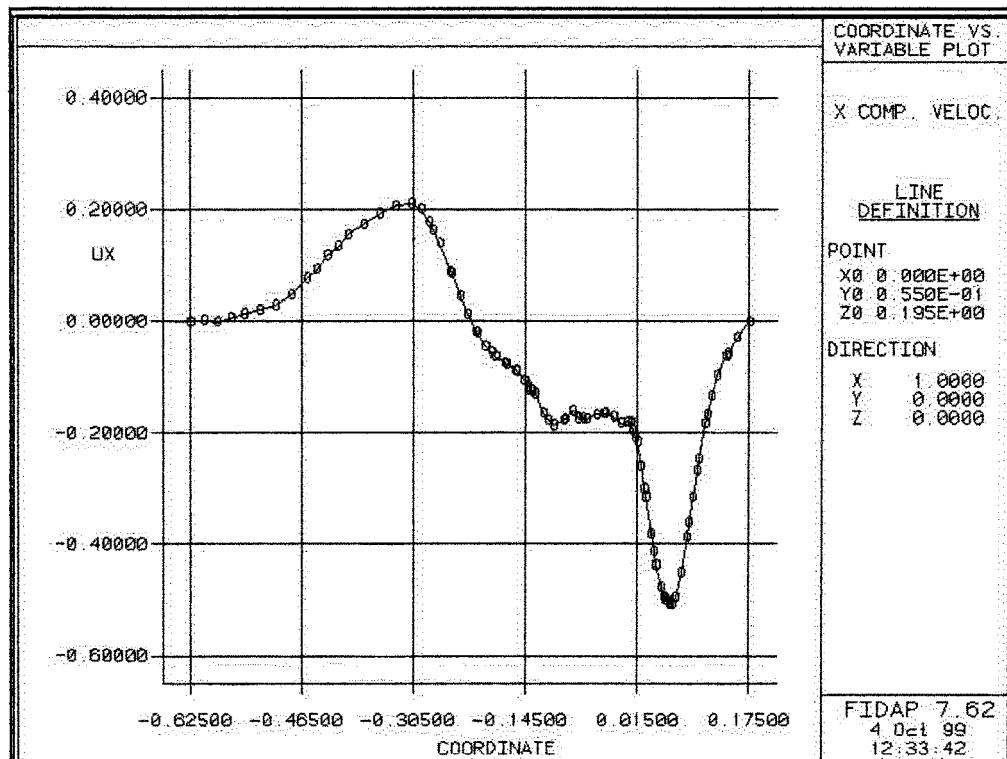


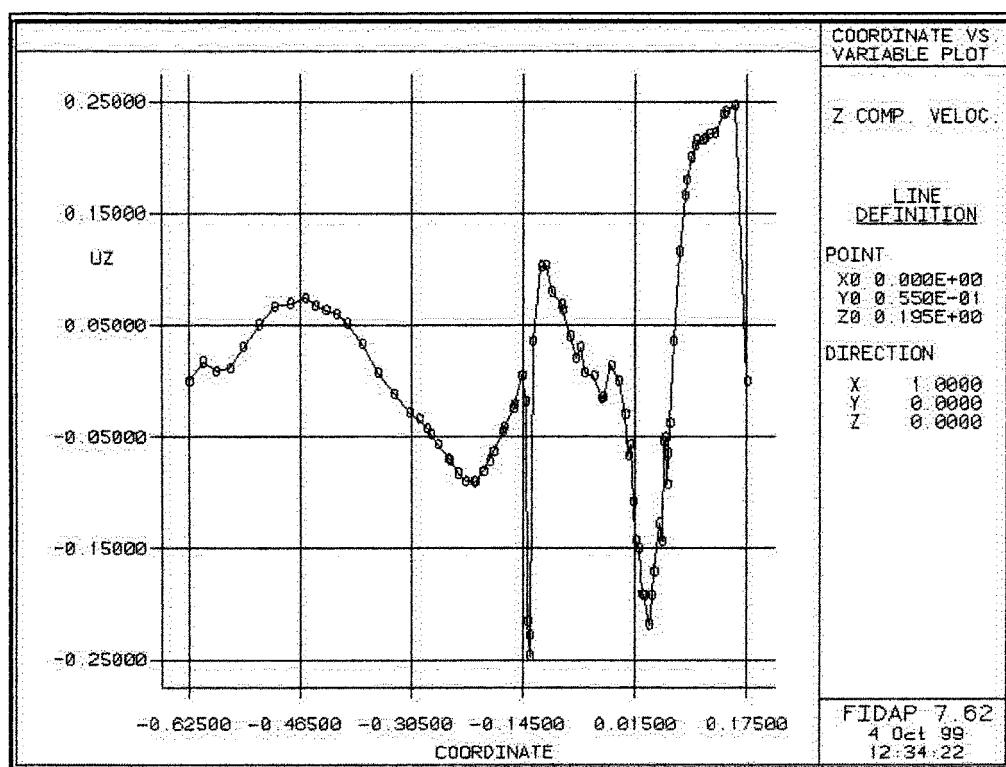


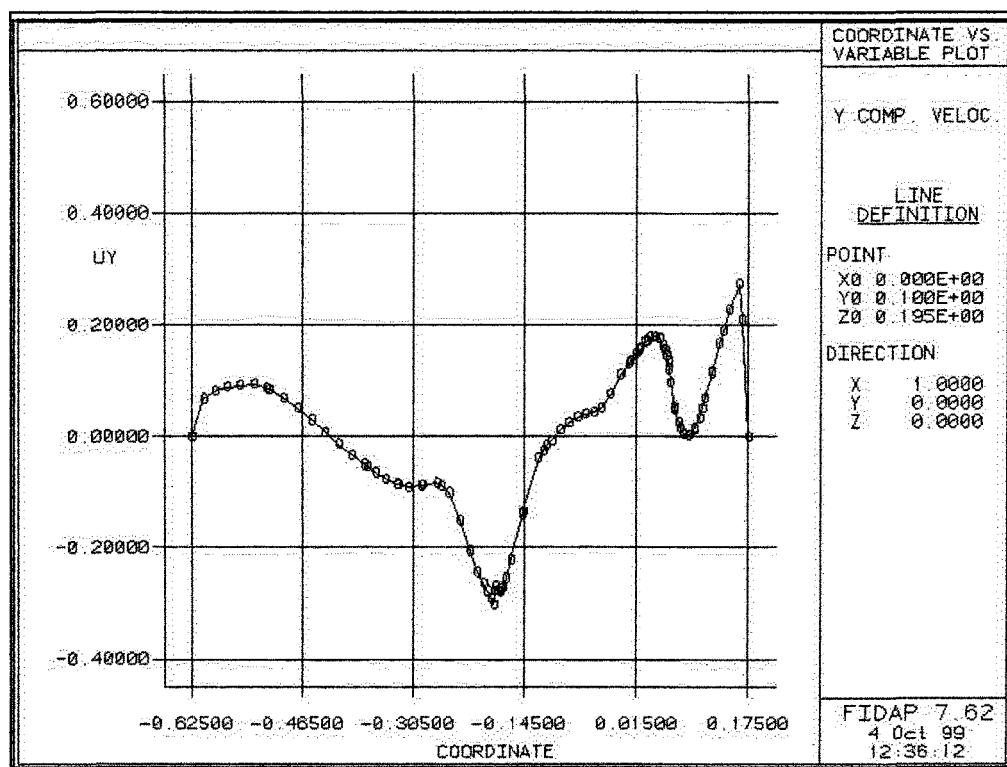
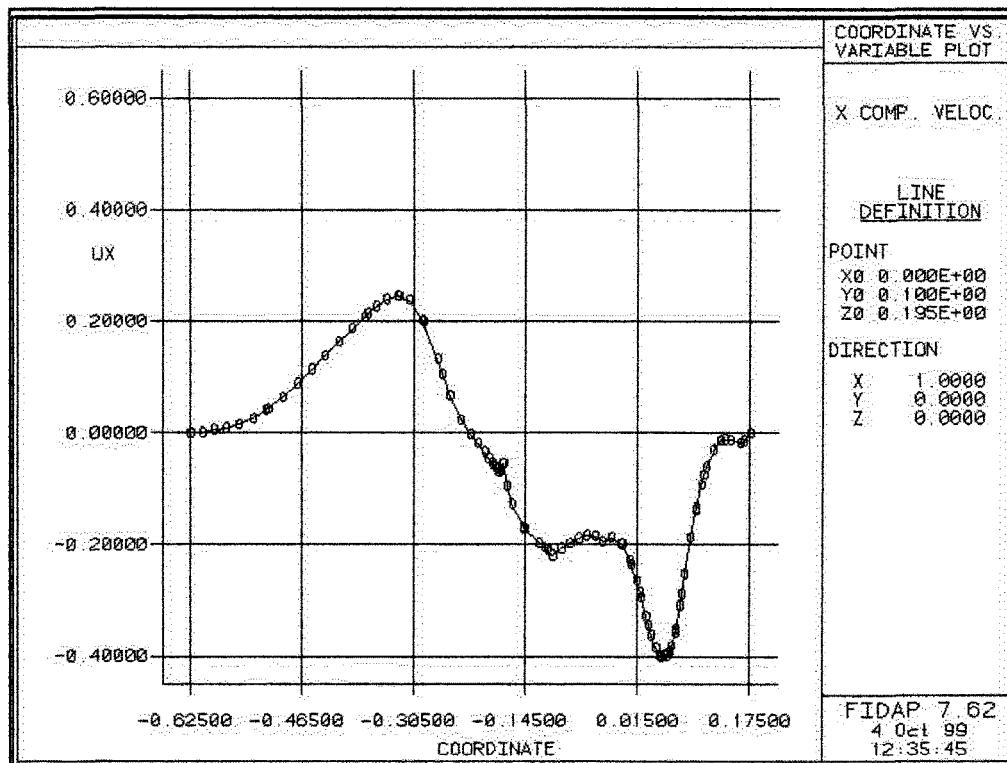


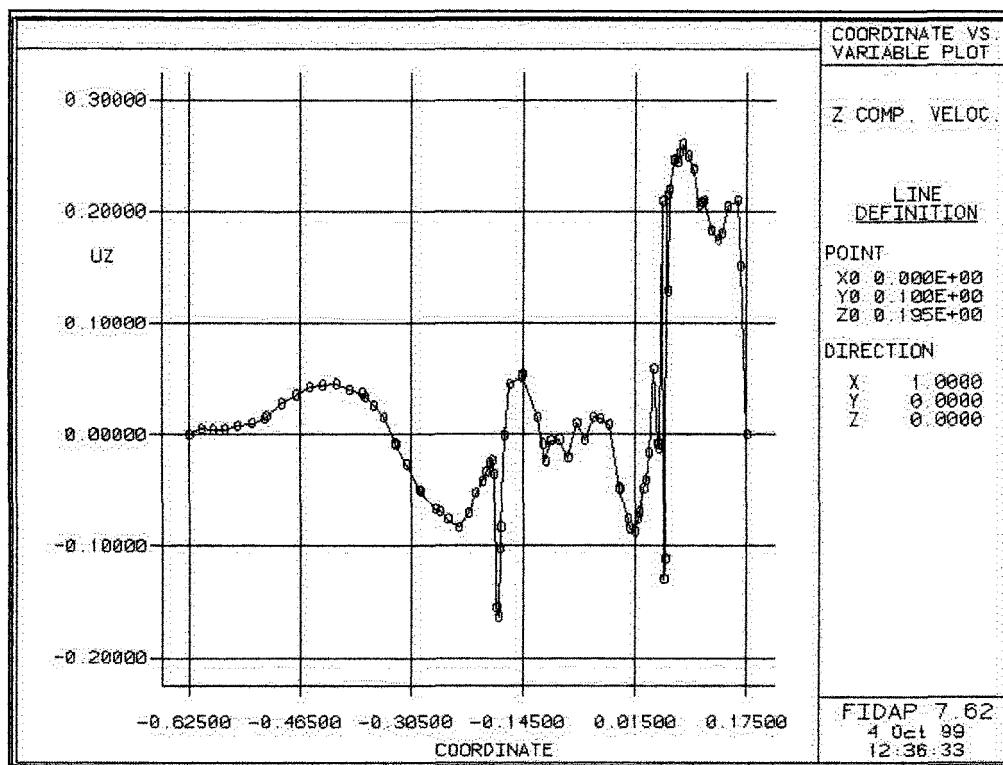


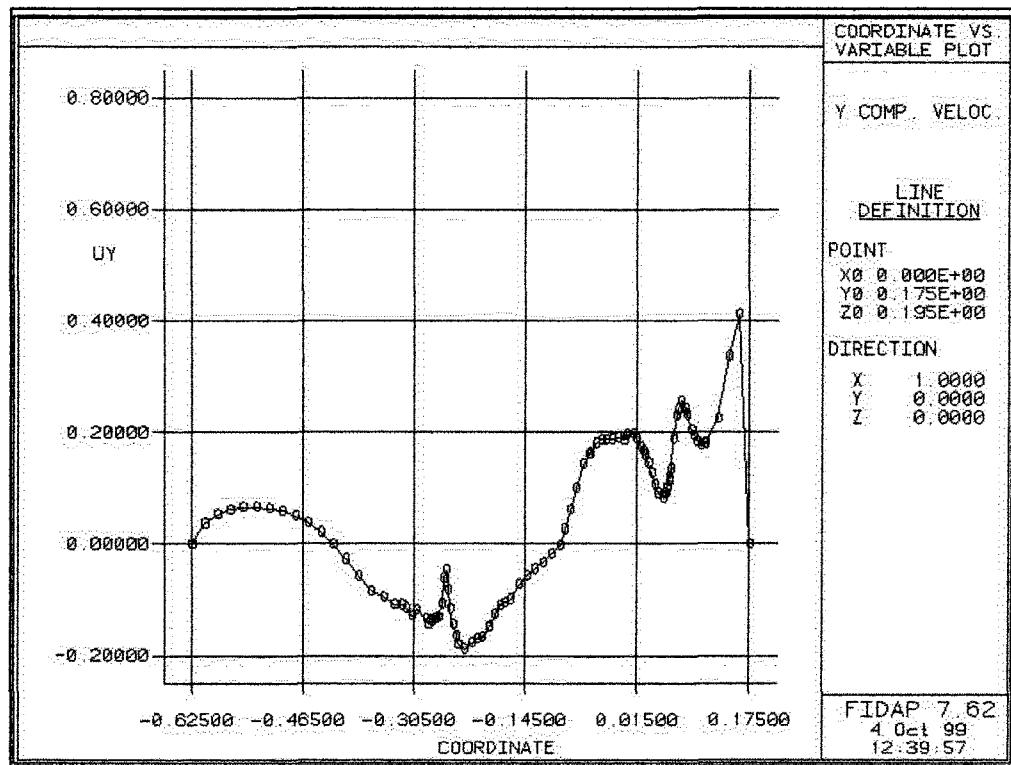
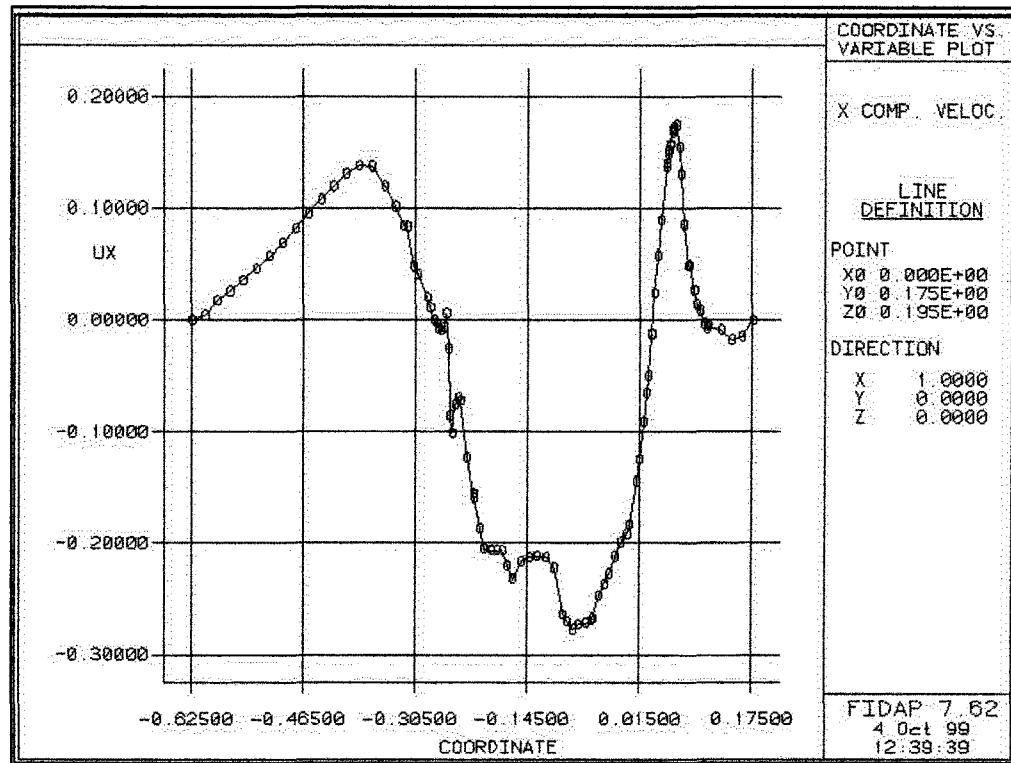


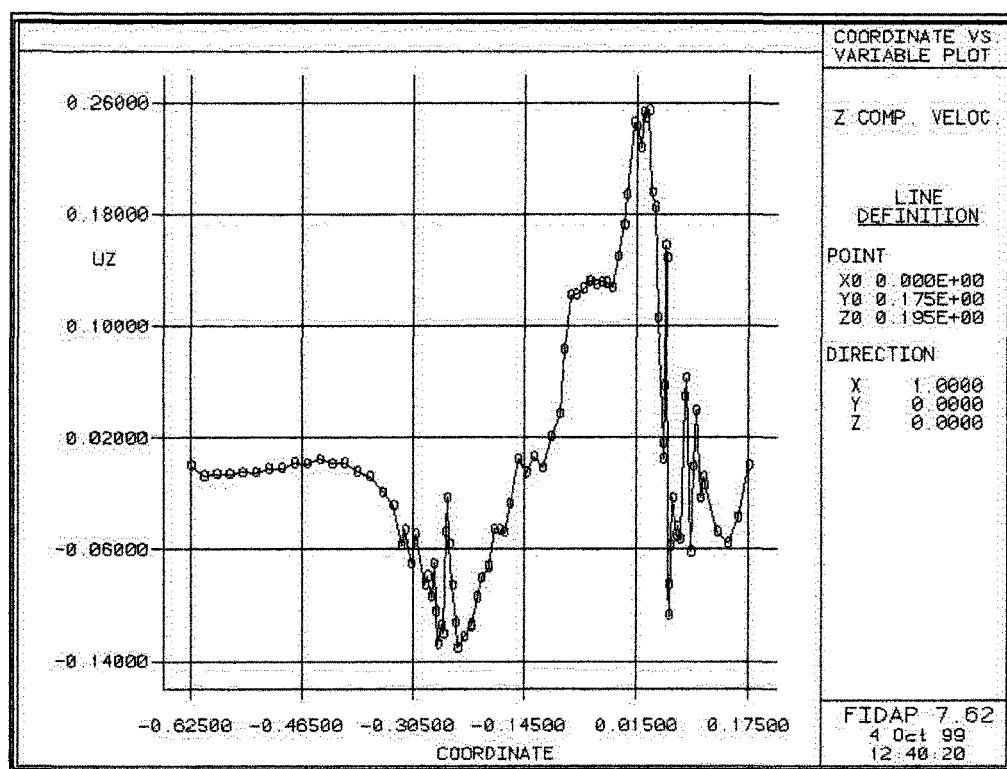


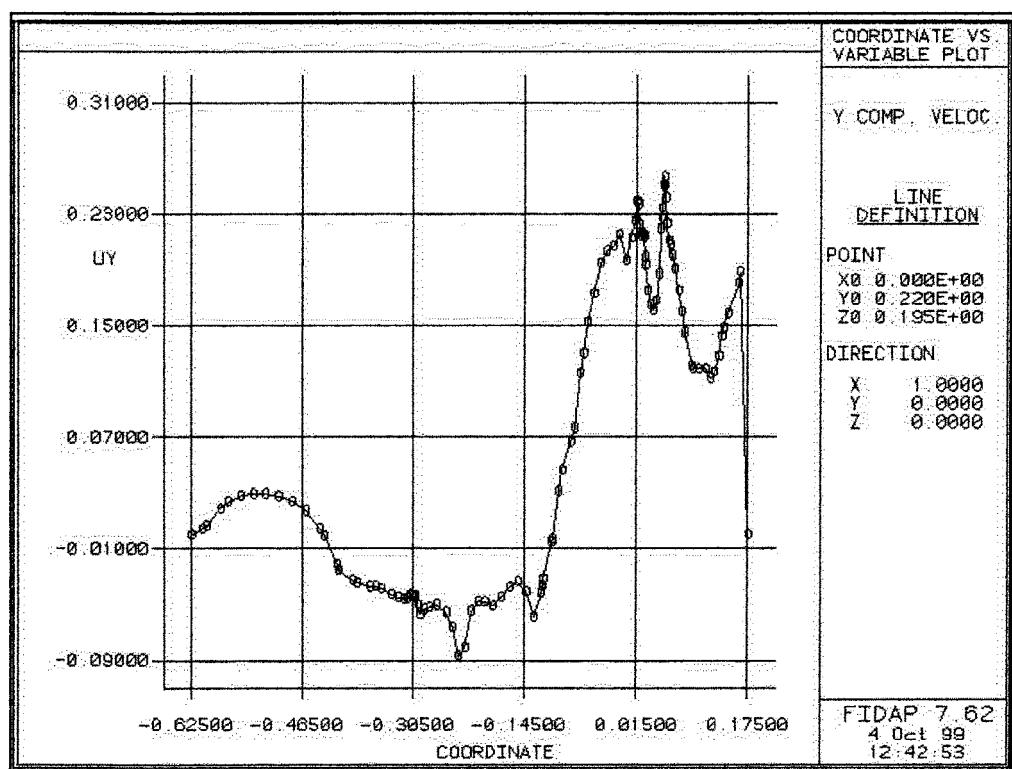
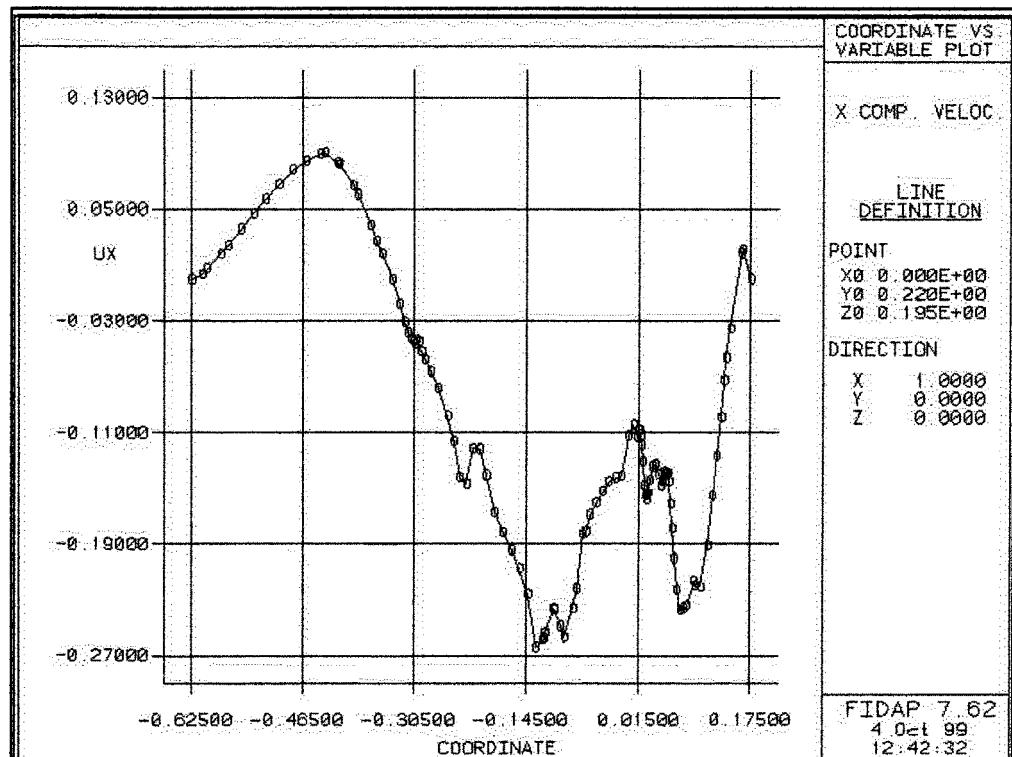


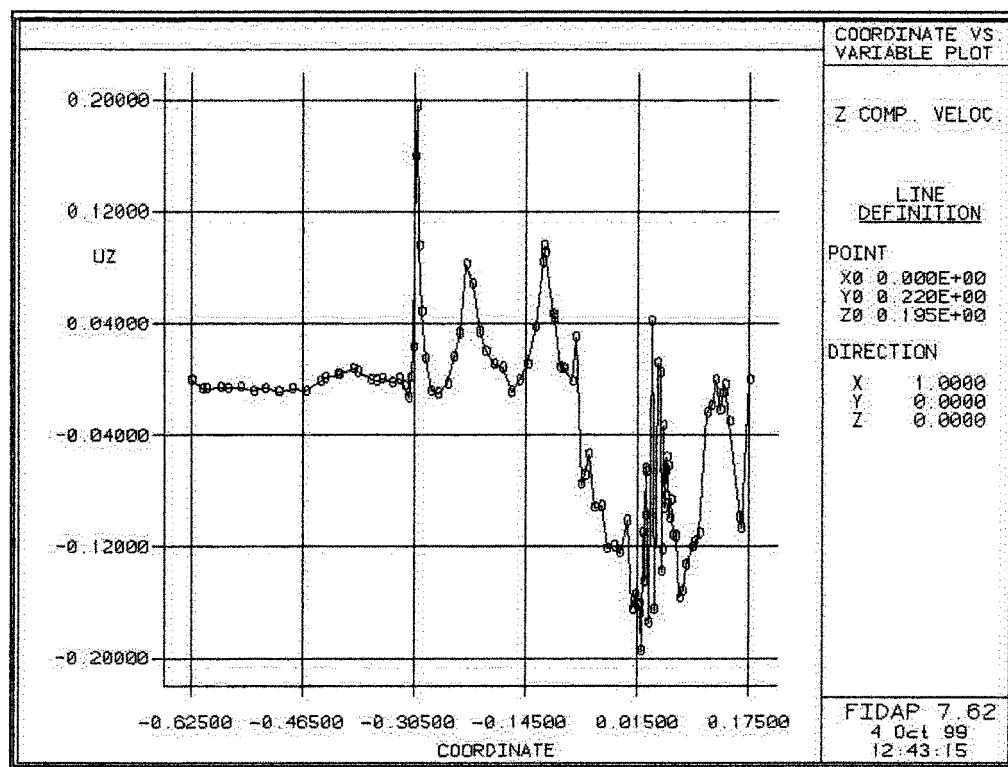












ANNEXE C:

Mesures d'aluminium effectif et de température

