



**HAL**  
open science

# Caractérisation par PIV de l'écoulement dans un échangeur thermique

Thierry M. Faure

► **To cite this version:**

Thierry M. Faure. Caractérisation par PIV de l'écoulement dans un échangeur thermique. 2004.  
hal-00118478

**HAL Id: hal-00118478**

**<https://hal.science/hal-00118478v1>**

Submitted on 5 Dec 2006

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



# **Caractérisation par PIV de l'écoulement dans un échangeur thermique**

Rapport d'essais phases 1 et 2

Janvier 2004

Rédacteur : Thierry FAURE

LIMS-CNRS UPR 3251 B.P.133 91403 ORSAY Cedex

# Table des matières

<b>Introduction .....</b>	<b>3</b>
<b>I Modifications du dispositif expérimental .....</b>	<b>4</b>
<b>I-1 Maquette.....</b>	<b>4</b>
<b>I-2 Support de caméra .....</b>	<b>4</b>
<b>I-3 Nappe laser.....</b>	<b>4</b>
<b>I-4 Banc hydraulique .....</b>	<b>4</b>
<b>II Mesures de pression .....</b>	<b>6</b>
<b>III Mesures de vitesse.....</b>	<b>7</b>
<b>III-1 Calcul du grandissement .....</b>	<b>7</b>
<b>III-2 Paramètres expérimentaux.....</b>	<b>7</b>
<b>III-2-1 Choix des débits.....</b>	<b>7</b>
<b>III-2-2 Réglage de la nappe laser .....</b>	<b>7</b>
<b>III-2-3 Conditions expérimentales.....</b>	<b>8</b>
<b>III-3 Méthode de filtrage des images .....</b>	<b>8</b>
<b>III-4 Résultats .....</b>	<b>10</b>
<b>Conclusion .....</b>	<b>27</b>
<b>Références .....</b>	<b>28</b>

# Introduction

L'étude générale de l'écoulement dans une maquette d'échangeur thermique faisant partie d'une structure d'accélérateur linéaire de protons, menée au Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur en collaboration avec l'Institut de Physique Nucléaire d'Orsay, se décompose en trois phases successives :

1. mesure de la différence de pression entre l'entrée et la sortie de la maquette,
2. mesure du champ moyen de vitesse dans un tube isolé,
3. mesures du champ moyen de vitesse dans chacun des tubes de la maquette.

L'objectif de ce rapport d'essais est de présenter les résultats obtenus pour les phases 1 et 2. Un rapport d'essais sera livré à l'issue de la phase 3 et un rapport de synthèse finale présentera l'analyse de l'ensemble des résultats.

# I Modifications du dispositif expérimental

## I-1 Maquette

Un certain nombre de modifications géométriques ont été apportées à la maquette préliminaire constituée d'un seul tube (Sato, 2003). Nous ne reprendrons pas ici l'ensemble de la description du banc d'essais, mais ne citerons que les modifications apportées. L'ensemble des essais est réalisé sur la maquette définitive constituée (de droite à gauche, figure 1) :

- d'un tube isolé avec une entrée et une sortie,
- des six tubes parallèles, alimentés entre eux par une même entrée et une même sortie,
- d'un tube contenant la mire.

Le diamètre intérieur de chacun de ces tubes, réalisés en verre, est de 4 mm, et leur diamètre extérieur de 6 mm. Le diamètre de la section d'entrée alimentant les six tubes parallèles est de 8 mm.

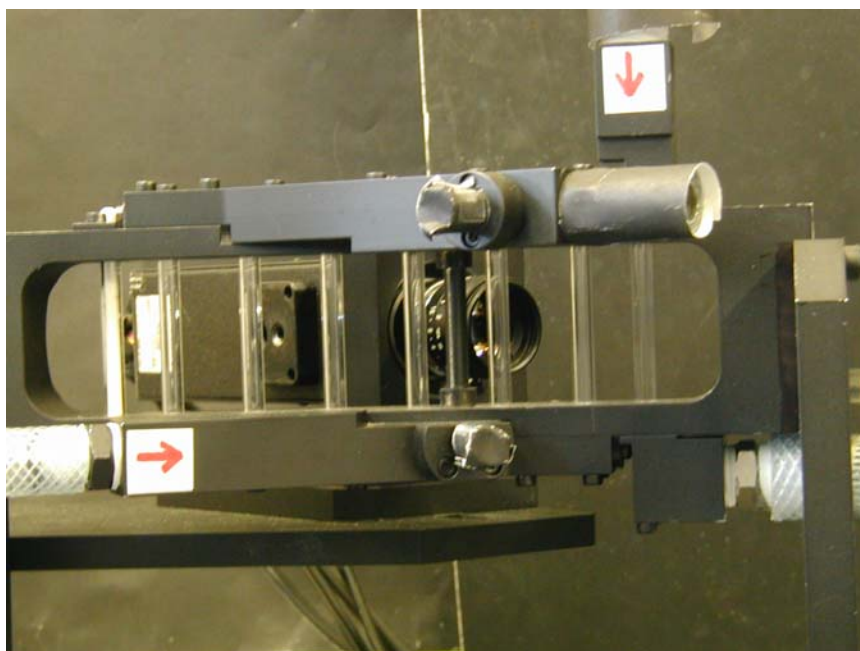


Figure 1 : Photo de la maquette.

## I-2 Support de caméra

L'amélioration principale, par rapport à la maquette préliminaire, est le montage de la caméra sur une bague permettant un réglage précis de son orientation par rapport au tube.

## I-3 Nappe laser

Afin de permettre la focalisation de la nappe laser sur la génératrice des tubes, il a été nécessaire d'ajouter une bague allonge de 20 mm entre la lentille de focalisation et la lentille cylindrique de la tête d'émission laser. Cet ajout permet une grande flexibilité du système et le choix continu d'une distance de focalisation de la nappe laser entre 200 et 1000 mm.

## I-4 Banc hydraulique

Des modifications ont été apportées au banc hydraulique, notamment en réduisant les coudes inutiles et en utilisant des tubes de section supérieure, ce qui a permis de réduire les pertes de charges et d'atteindre un débit maximum de  $18 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$ . Par ailleurs, une nouvelle

pompe à un étage, de vitesse de rotation  $2850 \text{ tr.min}^{-1}$ , de type Lowara CEA70/5, a été installée. Un réservoir en inox de 30 l permet l'alimentation du banc. Il est rempli d'eau déminéralisée pour éviter tout dépôt calcaire à l'intérieur des tubes. L'ensemble du dispositif est présenté sur la figure 2. Ce circuit hydraulique alimente soit le tube isolé, soit la maquette de l'échangeur constituée des six tubes. Un capteur de pression, relié à un commutateur, permet la mesure de la pression statique en entrée ou en sortie de la maquette.

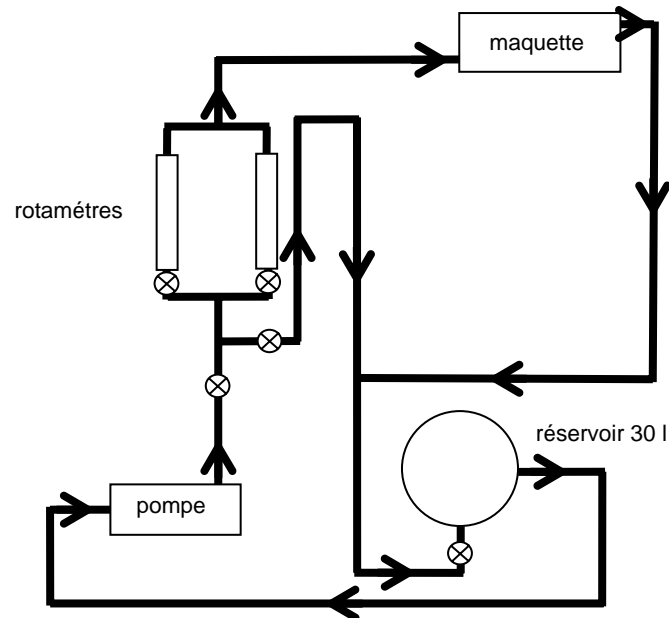


Figure 2 : Schéma du banc hydraulique.

Une vue de l'ensemble du dispositif expérimental, comprenant le banc hydraulique, le système d'illumination laser, le système de prise de vue et la commande de déplacement est présentée sur la figure 3.



Figure 3 : Photo du dispositif expérimental.

## II Mesures de pression

La figure 4 présente la caractéristique de la maquette constituée de six tubes, c'est-à-dire l'évolution de la chute de pression en fonction du débit. La précision du capteur de pression est de 0,01 bar. Les losanges bleus présentent l'évolution by-pass fermé, et les carrés roses l'évolution by-pass ouvert. On remarque que l'ouverture ou non du by-pass ne modifie pas la chute de pression dans la maquette.

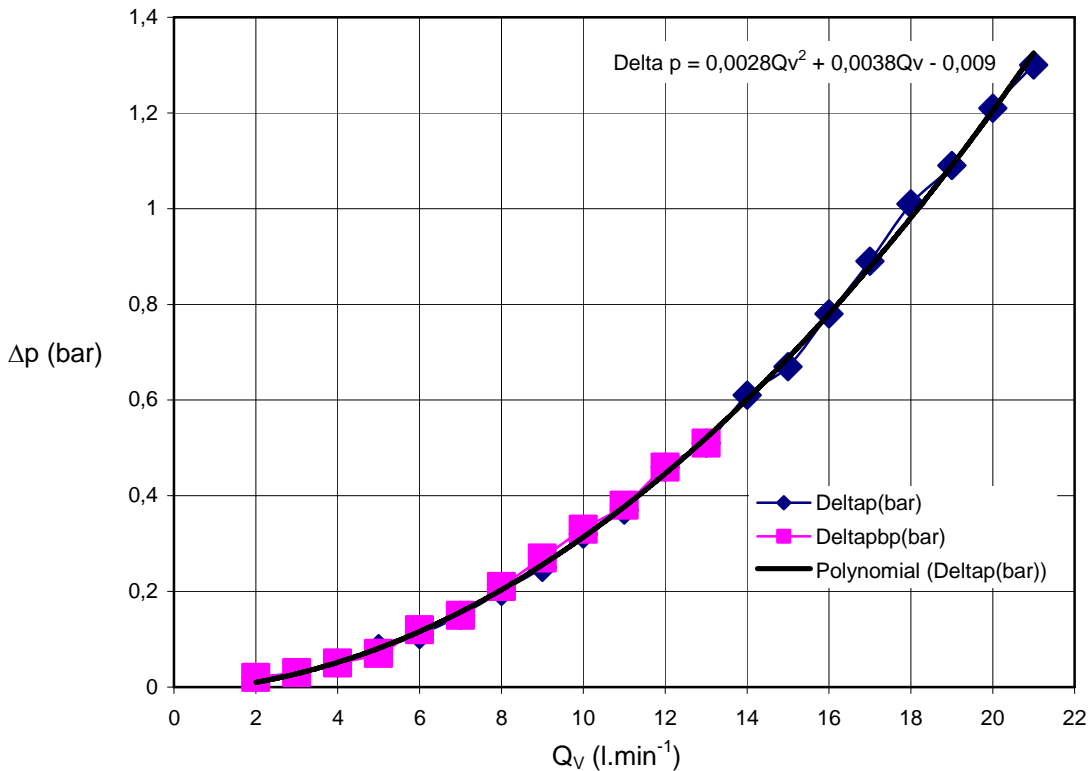


Figure 4 : Perte de charge  $\Delta p$  entre l'entrée et la sortie de la maquette.

## III Mesures de vitesse

### III-1 Calcul du grandissement

La figure 5 présente l'image vue par la caméra de la partie centrale du tube de la mire.



Figure 5 : Mire d'étalonnage du grandissement de la caméra.

Sur cette image des points de la mire, séparés entre eux d'un pas de  $400\ \mu\text{m}$ , on mesure horizontalement 743 pixels pour 52 intervalles, ce qui donne un grandissement axial  $g_x = 2,8 \cdot 10^{-5}\ \text{m} \cdot \text{px}^{-1}$ . On remarque également que grâce au nouveau système de fixation et d'orientation de la caméra, celle-ci a pu être tournée de  $90^\circ$  ce qui permet de réaliser un champ de mesure deux fois plus grand que lors des essais sur le montage préliminaire.

### III-2 Paramètres expérimentaux

#### III-2-1 Choix des débits

Pour les mesures sur le tube isolé, 5 débits sont retenus, allant du plus petit débit mesurable à l'aide du rotamètre ( $1,5\ \text{l} \cdot \text{min}^{-1}$ ), à  $5\ \text{l} \cdot \text{min}^{-1}$ . Le tableau 1 récapitule ces débits avec la vitesse débitante dans la section du tube et l'intervalle  $\Delta t$  retenu entre deux impulsions laser pour permettre un déplacement moyen de 10 pixels entre deux images éclairées.

débit ( $\text{l} \cdot \text{min}^{-1}$ )	$U_q$ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	$\Delta t$ ( $\mu\text{s}$ )
1,5	1,99	140
2	2,65	105
3	3,98	70
4	5,31	52
5	6,64	42

Tableau 1 : Débits retenus et intervalles de temps entre deux impulsions laser.

#### III-2-2 Réglage de la nappe laser

La nappe laser est réglée de façon à passer exactement sur la génératrice du cylindre et à ne subir aucune déviation (figure 6).



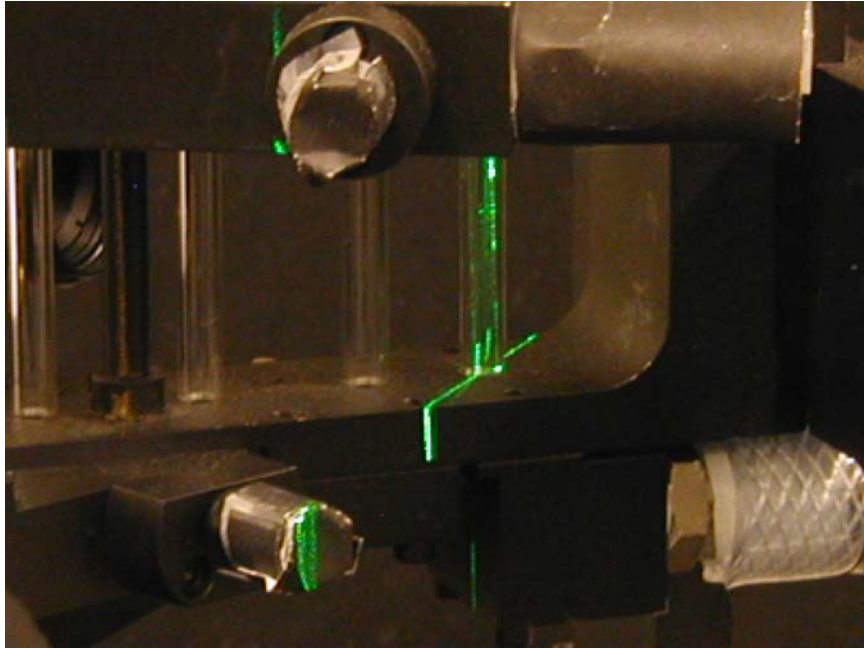


Figure 6 : Nappe laser sur la génératrice du cylindre.

### III-2-3 Conditions expérimentales

Les particules utilisées pour l'ensemencement de l'écoulement sont des billes sphériques de verre creuses recouvertes d'une couche d'argent. Leur taille moyenne est de  $10\ \mu\text{m}$  et leur masse volumique est de  $1400\ \text{kg.m}^3$ . Les essais sont réalisés à une température de  $25^\circ\text{C}$  et à une pression de  $751\ \text{mm Hg}$ .

### III-3 Méthode de filtrage des images

Une méthode originale de filtrage des images a été mise en place sur ce dispositif expérimental. Après avoir pris soin d'éliminer toutes les réflexions parasites, on observe sur la figure 7 la persistance de sources de bruit, qui sont :

1. le dépôt de particules à la paroi qui génère une réflexion stationnaire,
2. des rayures sur la surface externe du tube, qui sont une source de diffusion lumineuse,
3. des réflexions dues aux dioptries eau-verre et verre-air, qui donne une zone de saturation lumineuse dans la partie centrale de l'image,
4. le bruit de fond proprement dit, lié à dynamique réduite de la caméra 8 bits et qui correspond au fond gris de l'image.

L'idée du filtrage est fondée sur le fait que chaque image est constituée d'une série de pixels auxquels est associé un niveau de gris compris entre 0 (noir) et 255 (blanc). Pour éliminer toute source de bruit, il est facile de soustraire à une image avec écoulement une image prise sans écoulement où ne sont présentes que les réflexions parasites. Néanmoins, une telle image est impossible à obtenir, car la présence de particules dans la nappe laser modifie le niveau d'intensité lumineuse réfléchi en bruit de fond. Une réduction correcte du bruit peut être obtenue par la soustraction de deux images consécutives prises avec écoulement. En effet, une réflexion stationnaire présente dans la première image le sera également dans la seconde. Ainsi, un pixel blanc sur la première image sera soustrait au même pixel blanc sur la seconde image, ce qui donnera un pixel noir. Par ailleurs, pour un pixel associé à une particule en mouvement, blanc sur la première image, sera associé un pixel sans particule sur la seconde image. Le résultat de la soustraction sera ainsi un pixel blanc (particule). De même, un pixel gris sans particule sur la première image qui correspondrait à un pixel blanc sur la seconde image donnerait un pixel noir, car un niveau de gris ne pouvant pas être une valeur négative, il

est fixé à 0. Cependant, comme une faible variation de l'énergie laser émise entre les deux sources conduit à une variation de l'intensité des réflexions, une meilleure méthode de filtrage consiste à soustraire deux images correspondant à l'éclairement d'une même source laser. Si la séquence d'enregistrement consécutif des images 1, 2, 3, 4, ... correspond aux éclairagements laser 1, 2, 1, 2, ... la procédure de filtrage reviendra donc à faire la soustraction des images 1 et 3 puis 2 et 4, ... De plus, le filtrage de l'image 1 avec l'image 3 augmente le temps entre les deux images à 66,666 ms et donc diminue la possibilité de corrélation de la position d'une même particule. Le résultat de ce filtrage est présenté sur la figure 8. Il faut remarquer que les seules zones blanches sont associées aux particules en mouvement. Un examen attentif de l'image montre que les particules noyées dans une réflexion sur l'image brute, apparaissent distinctement après filtrage. De plus, ce filtrage améliore le contraste et permet d'identifier plus distinctement chaque particule en fixant le niveau de fond de l'image à 0 (noir).

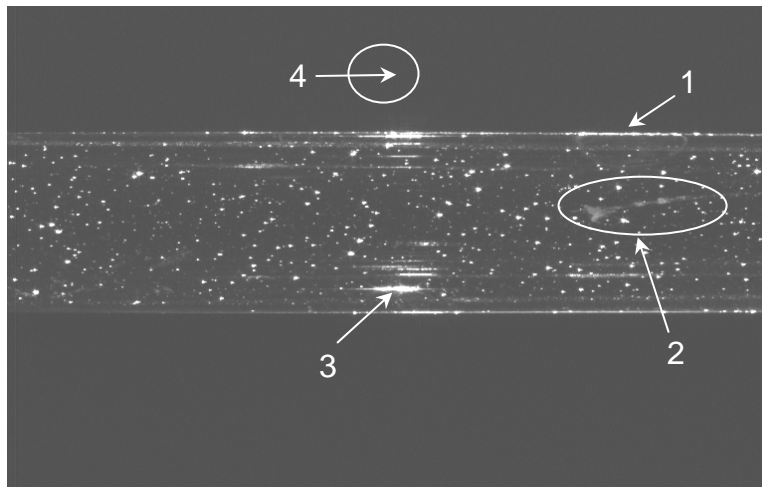


Figure 7 : Image brute avec : 1- dépôt de particule à la paroi, 2- rayure de la surface extérieure du tube, 3- réflexions dues aux parois internes du tube, 4-bruit de fond proprement dit de l'image (gris).



Figure 8 : Image filtrée.

Une comparaison entre les champs de vitesse moyens calculés à partir d'une série de 600 images successives est présentée sans filtrage sur la figure 9 et avec filtrage sur la figure 10. Les fortes réflexions sur les parois qui apparaissent au milieu de la figure 7 sont clairement identifiées sur le champ de vitesse (figure 9). Elles ont pour conséquence une diminution du débit mesuré pour des sections axiales comprises entre  $10.10^3$  m et  $15.10^3$  m. La zone du tube marquée par une rayure conduit à une estimation erronée du champ de

vitesse, autour d'une position axiale de  $18.10^3$  m. De plus, on observe une faible composante de vitesse radiale à la paroi, qui n'est pas physique et qui provient de la trace du dépôt de particules. Après filtrage de l'image (figure 10), toutes ces sources de bruits sont éliminées et fournissent un champ de vitesse moyen cohérent.

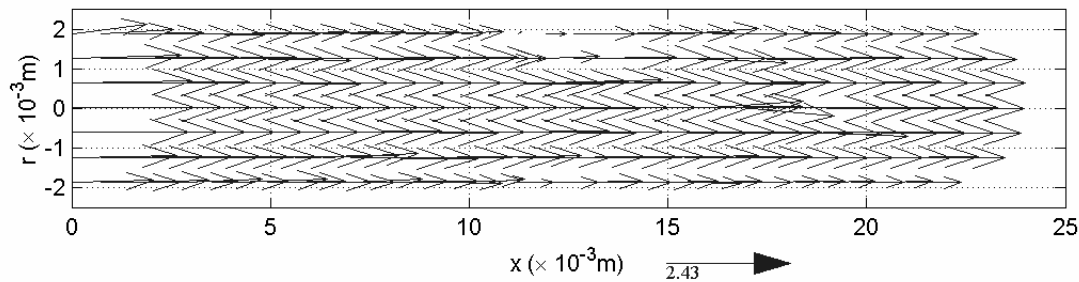


Figure 9 : Champ de vitesse moyen calculé sans filtrage.

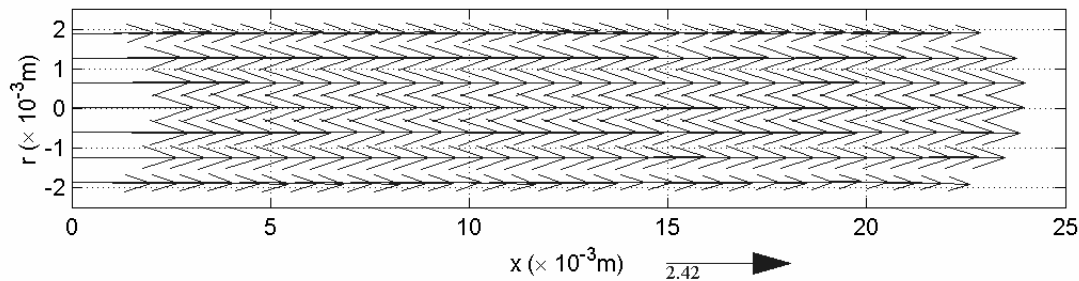


Figure 10 : Champ de vitesse moyen calculé avec filtrage.

### III-4 Résultats

L'ensemble des champs de vitesse est calculé par la méthode du flot optique utilisant un algorithme de programmation dynamique (Quénot, 1992, Quénot *et al.* 1998).

On présentera successivement (figures 11 à 25), pour chacune des cinq vitesses débitantes, sur trois figures successives :

- un champ de vitesse instantané avec les profils selon la direction radiale de  $V_x$  et  $V_y$  pour six positions axiales ( $x = 0, 4, 8, 12, 16, 20$  mm),
- un champ de vitesse moyen avec les profils selon la direction radiale de  $V_x$  et  $V_y$  pour six positions axiales ( $x = 0, 4, 8, 12, 16, 20$  mm),
- l'évolution axiale de la vitesse débitante mesurée et la comparaison entre le profil de vitesse axial moyen avec l'évolution fournie par le profil de Blasius.

On rappelle la formule de Blasius (Comolet 1994) en écoulement turbulent. Pour  $Re < 10^5$ , le profil de vitesse est donné par :

$$\frac{U}{U_{\max}} = \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{\frac{1}{7}}$$

avec :

- $U$  la vitesse moyenne,
- $U_{\max}$  la vitesse moyenne maximum,
- $R$  le rayon de la conduite.

Cette fonction est singulière dans la partie centrale de la conduite, car ce profil ne présente pas de tangente horizontale. On obtient  $U_{\max}$  à partir de la vitesse débitante par la relation :

$$\frac{U_q}{U_{\max}} = 0,817$$

Le tableau 3 présente la comparaison entre les vitesses débitantes  $U_q$  fixées au rotamètre et les valeurs obtenues par la moyenne axiale des vitesses moyennes  $U_{q,moy}$ . On observe un excellent accord entre ces deux valeurs étant donnée la précision du rotamètre.

débit (l.min <sup>-1</sup> )	$U_q$ (m.s <sup>-1</sup> )	$U_{q,moy}$ (m.s <sup>-1</sup> )
1,5	1,99	1,86
2	2,65	2,63
3	3,98	3,86
4	5,31	5,18
5	6,64	6,59

Tableau 3 : Débits mesurés au rotamètre et obtenus à partir des mesures.

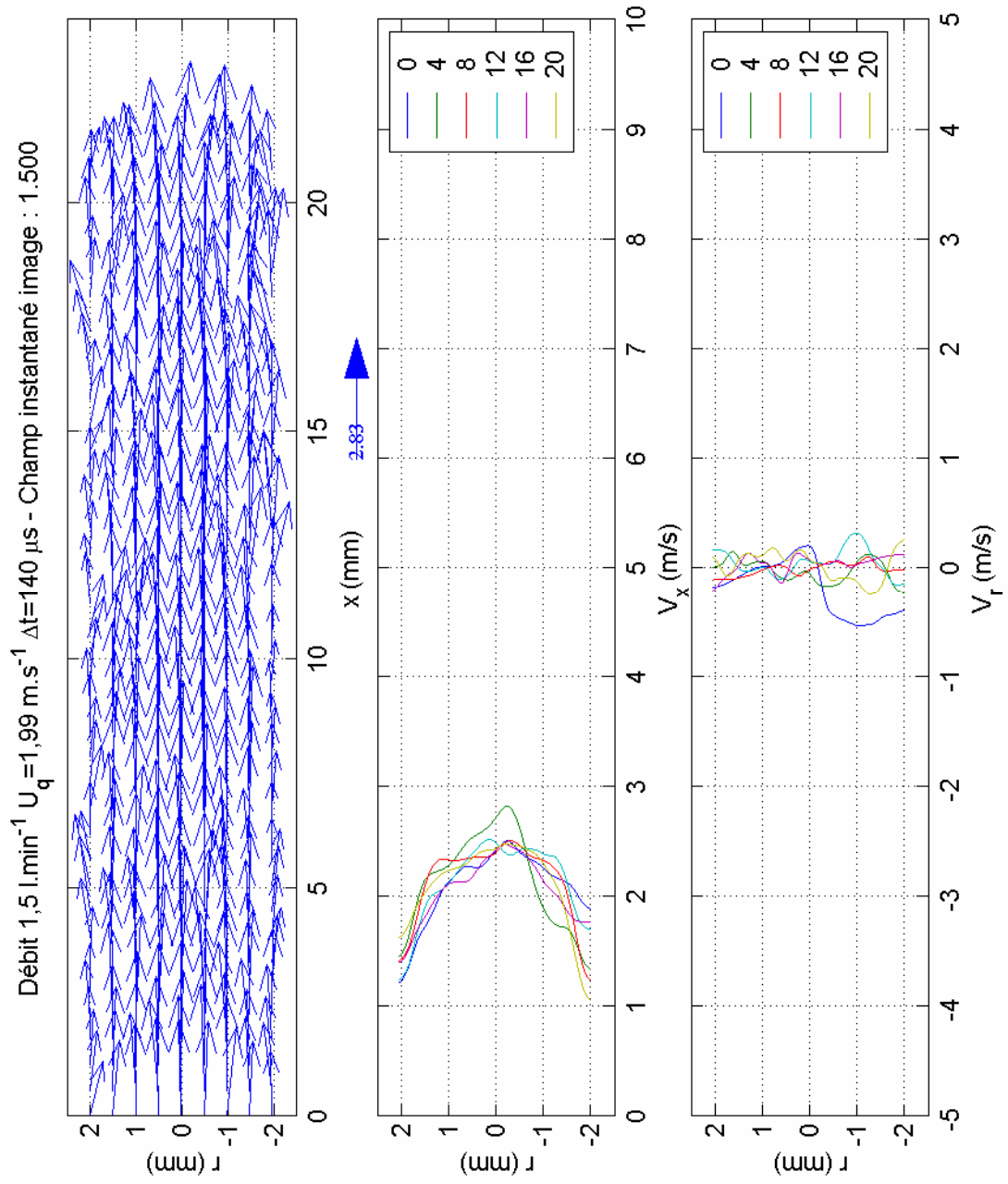


Figure 11 : Champ de vitesse instantané pour le débit  $1,5 \text{ l.min}^{-1}$ .

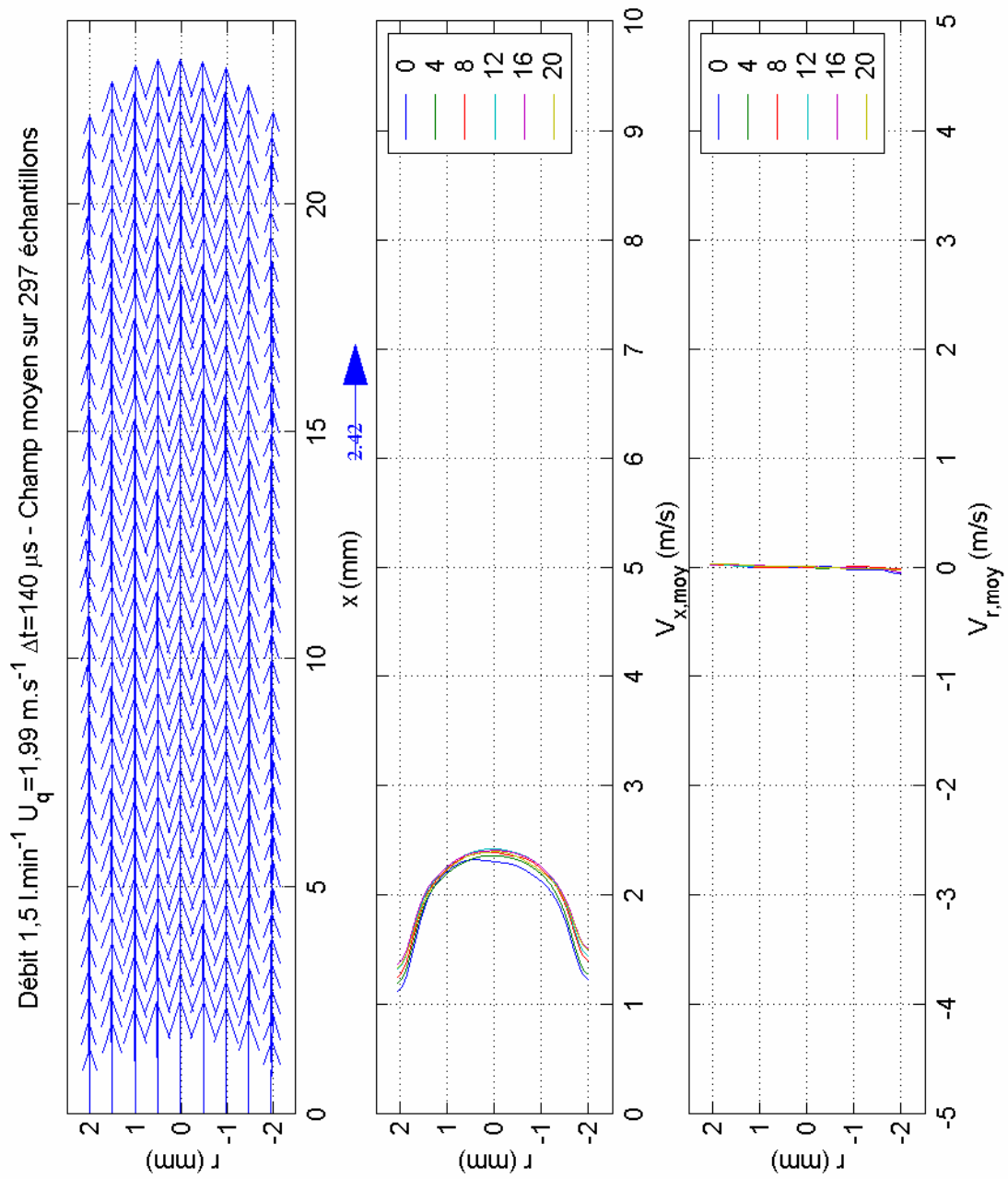


Figure 12 : Champ de vitesse moyen pour le débit  $1,5 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$ .

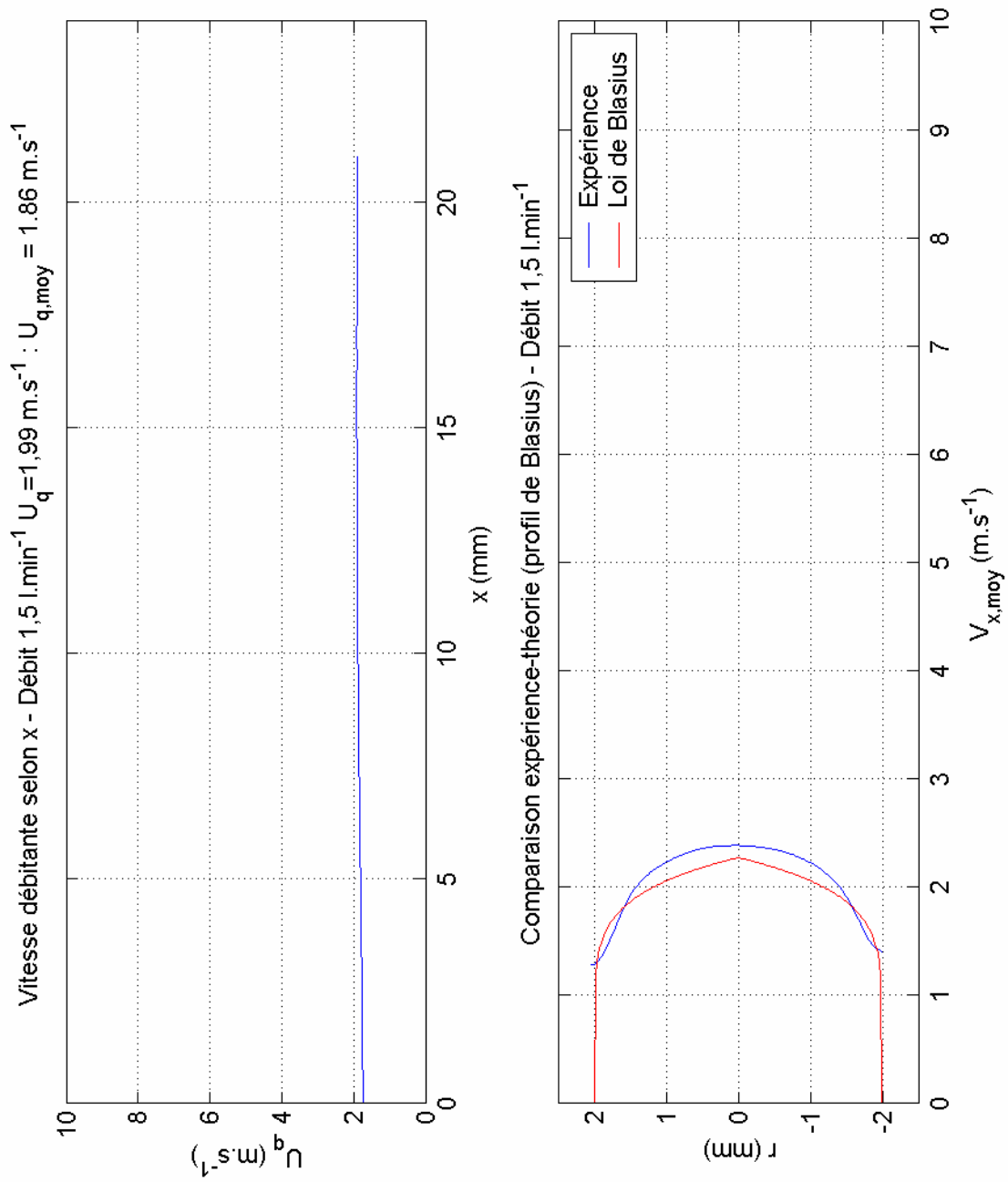


Figure 13 : Évolution de la vitesse débitante mesurée pour le débit  $1,5 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$ .

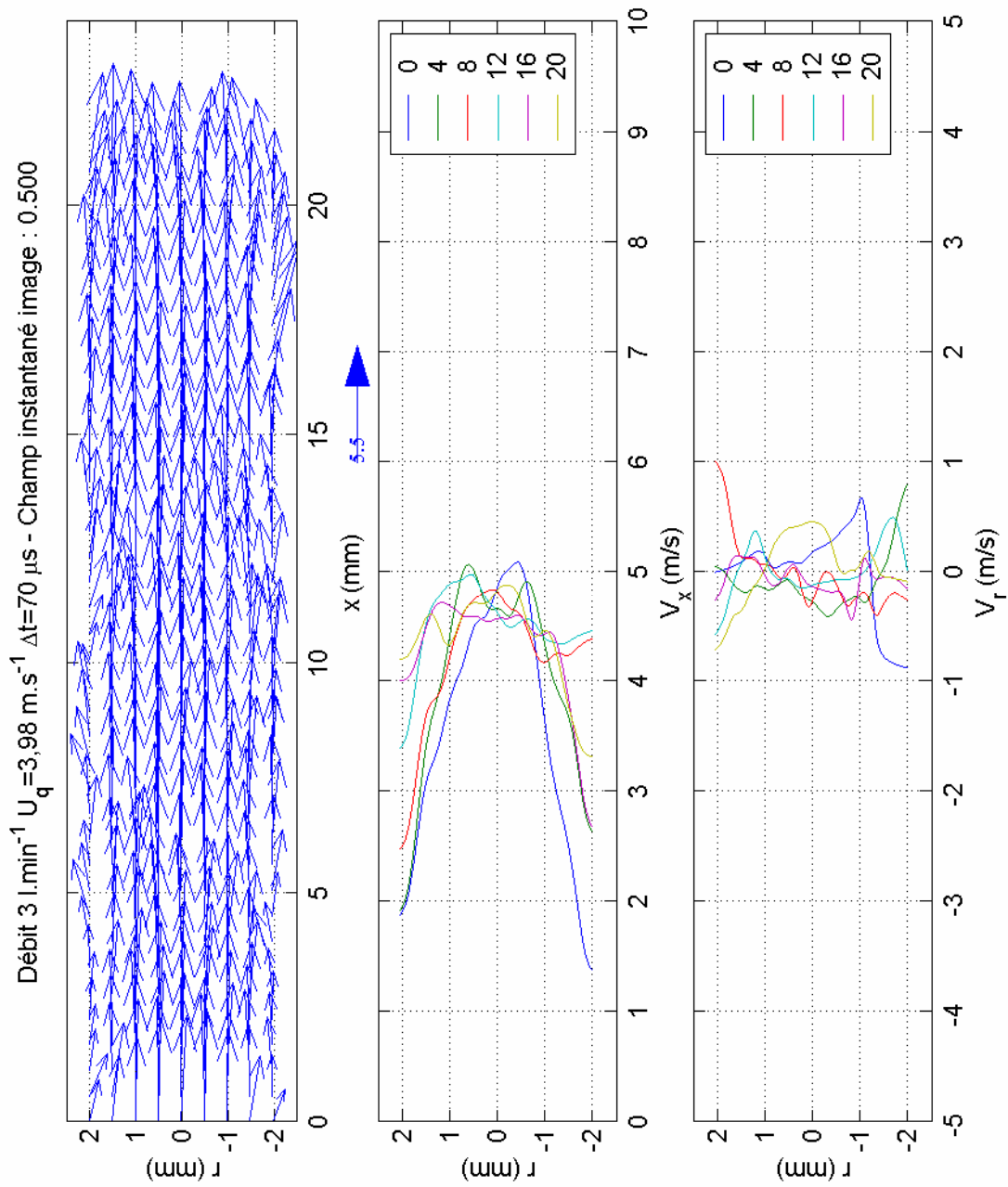


Figure 14 : Champ de vitesse instantané pour le débit  $2 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$ .



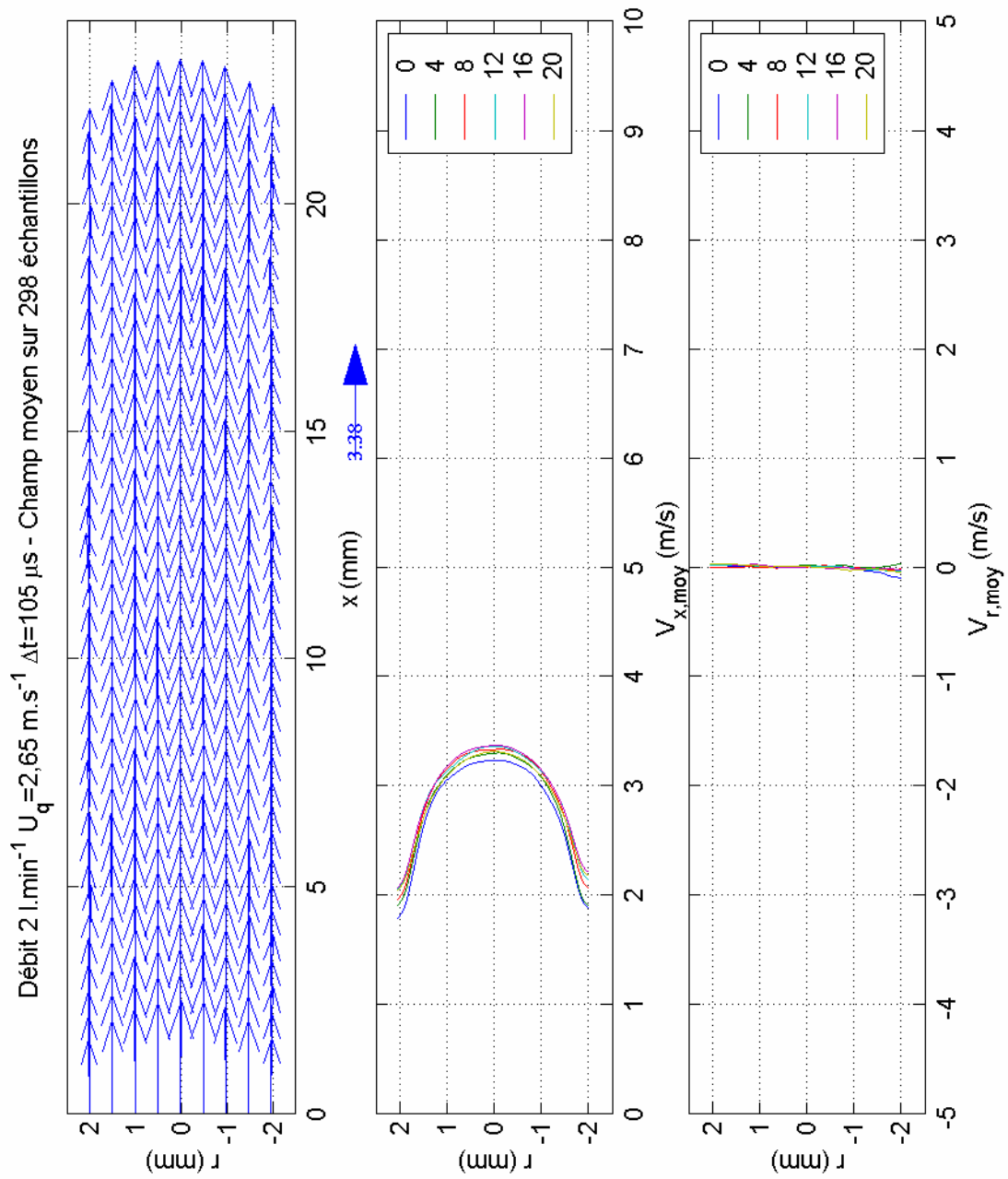


Figure 15 : Champ de vitesse moyen pour le débit  $2 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ .

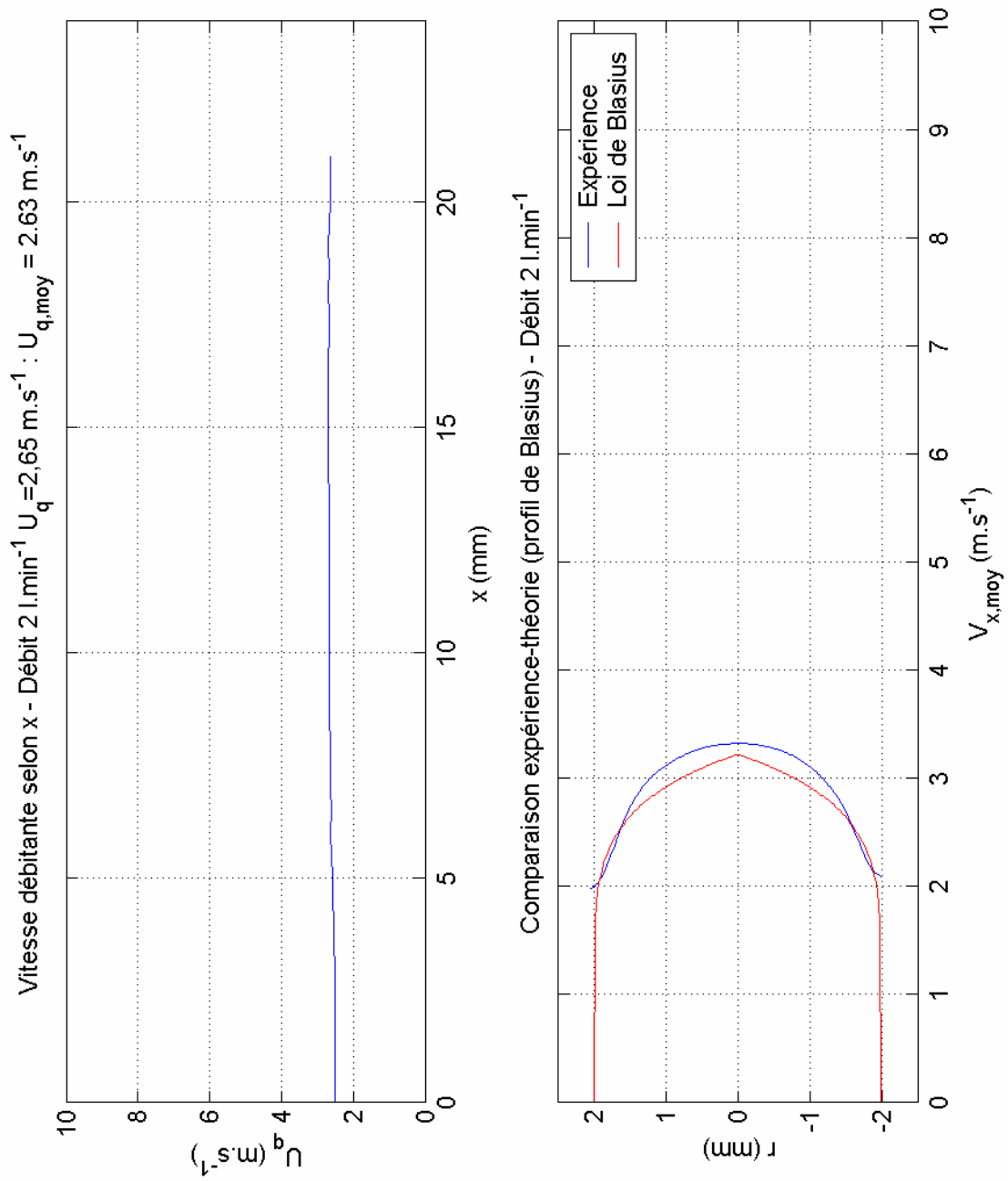


Figure 16 : Évolution de la vitesse débitante mesurée pour le débit 2 l.min<sup>-1</sup>.

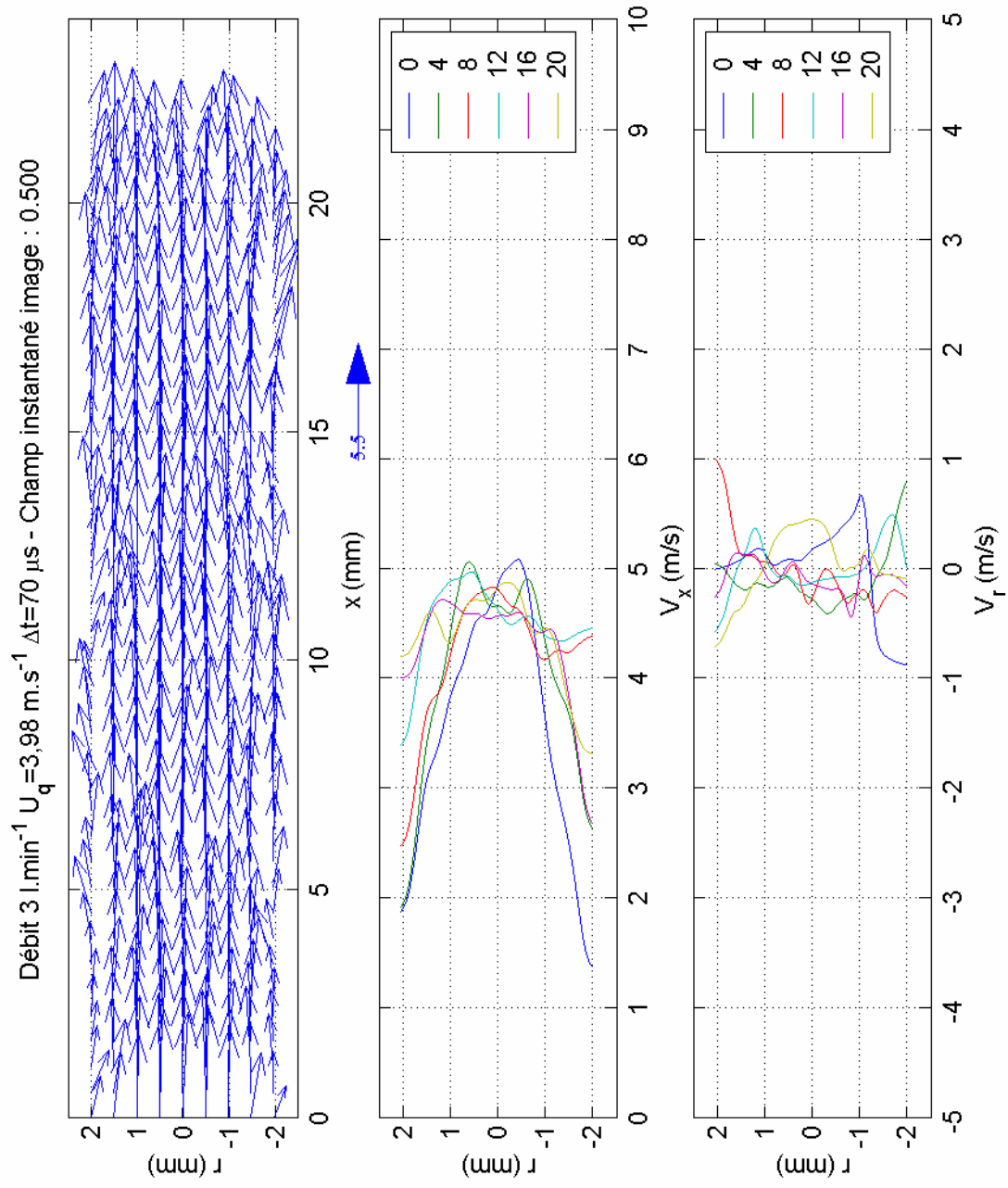


Figure 17 : Champ de vitesse instantané pour le débit  $3 \text{ l.min}^{-1}$ .

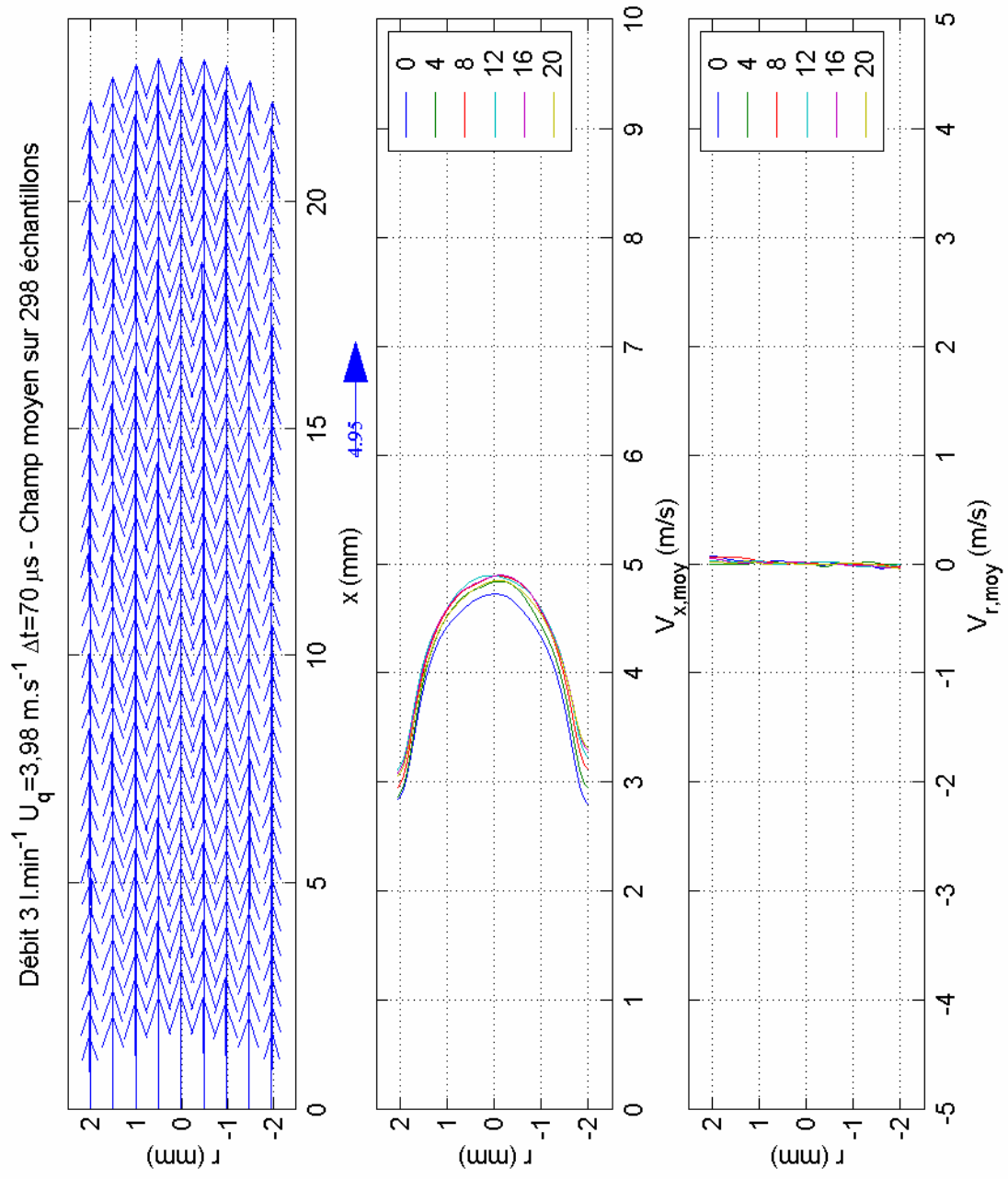


Figure 18 : Champ de vitesse moyen pour le débit 3 l.min<sup>-1</sup>.

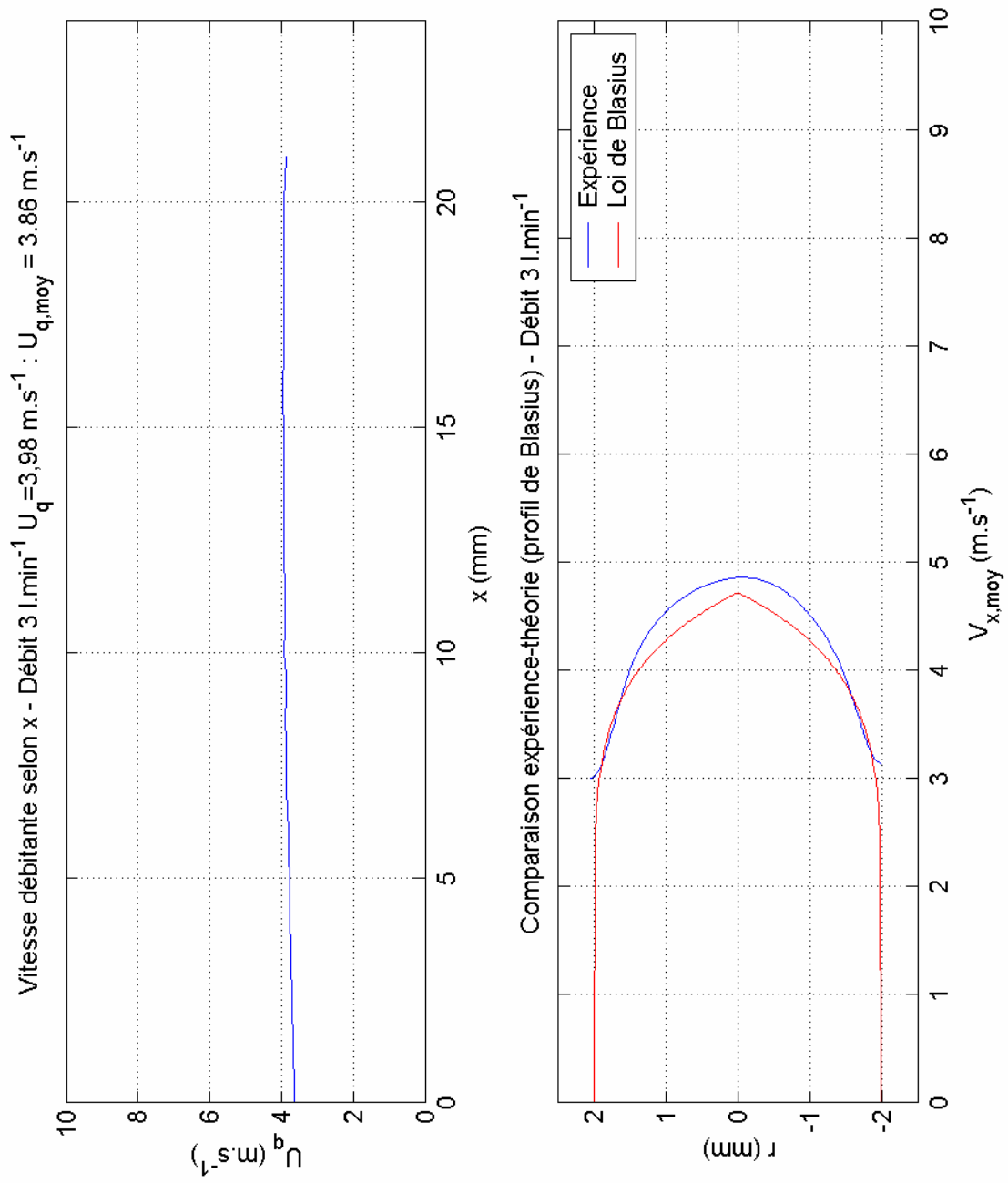


Figure 19 : Évolution de la vitesse débitante mesurée pour le débit 3 l.min<sup>-1</sup>.

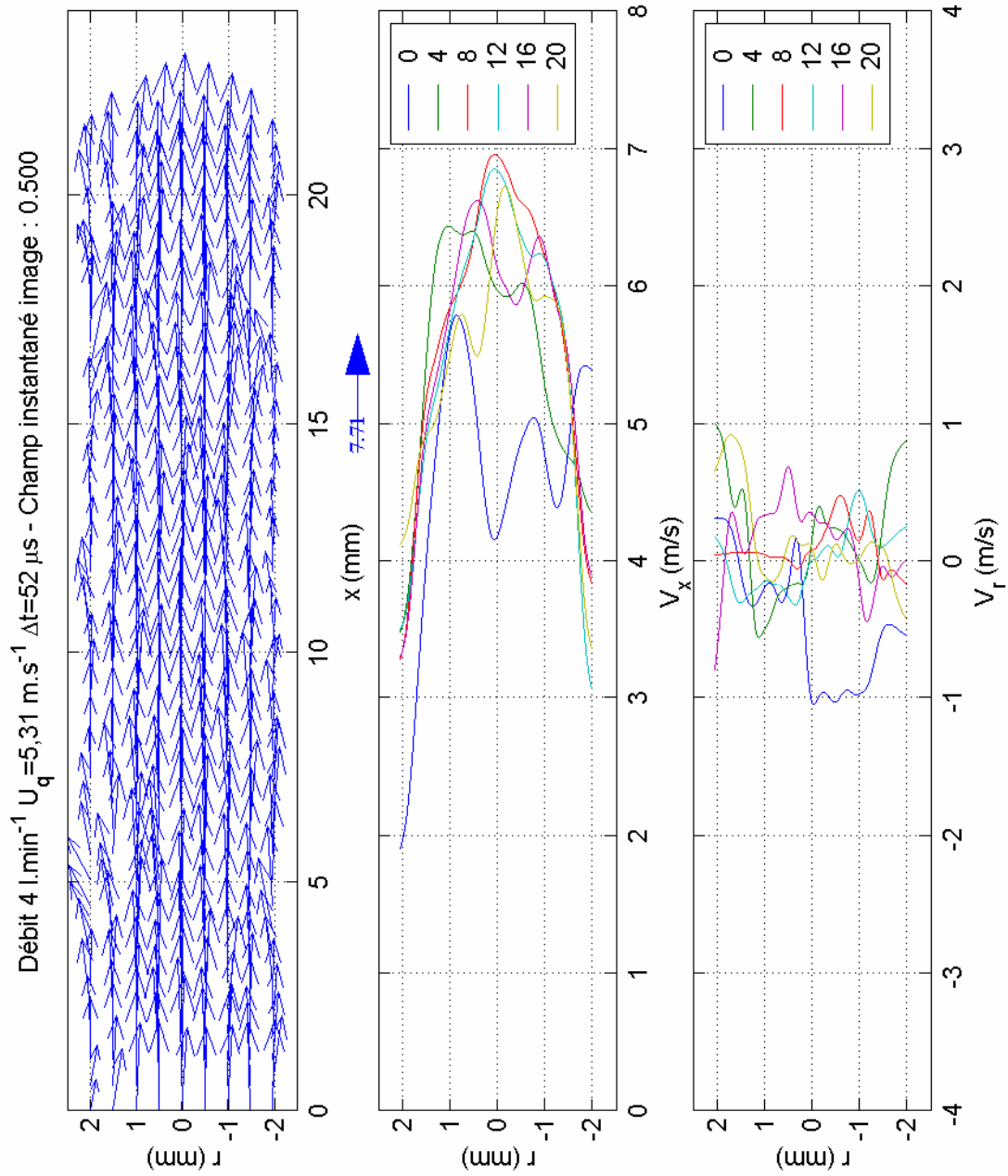


Figure 20 : Champ de vitesse instantané pour le débit  $4 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$ .

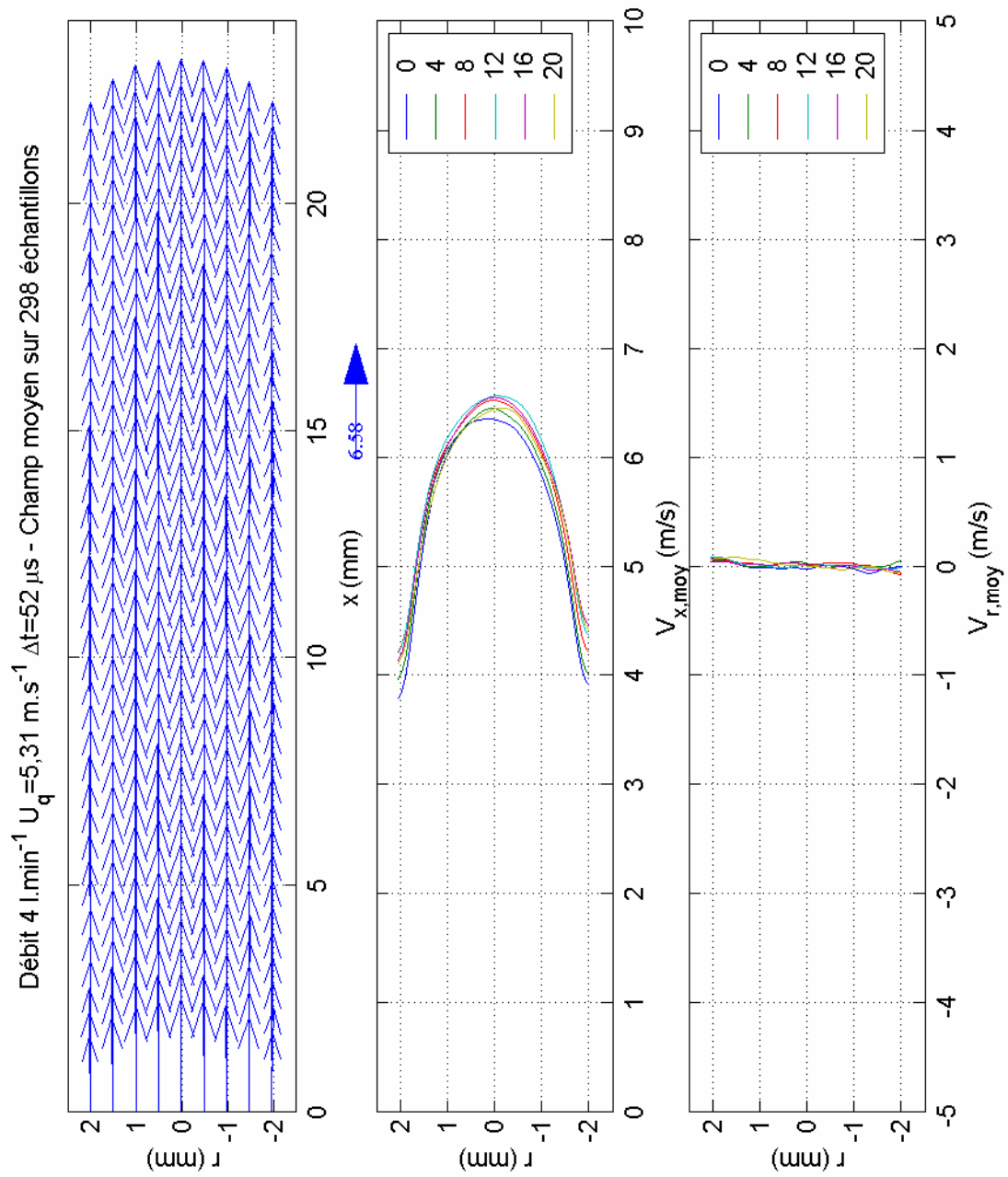


Figure 21 : Champ de vitesse moyen pour le débit 4 l.min<sup>-1</sup>.

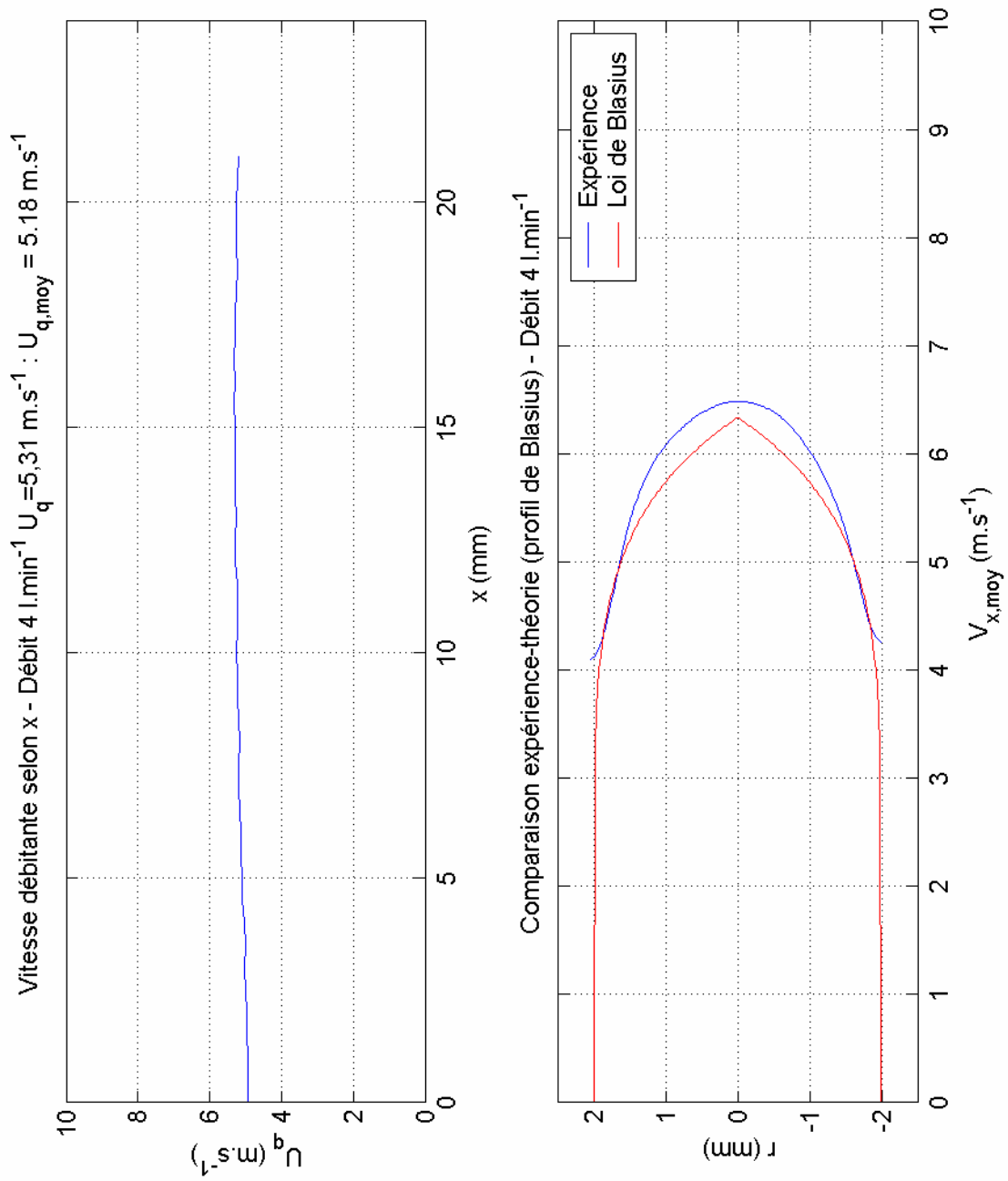


Figure 22 : Évolution de la vitesse débitante mesurée pour le débit 4 l.min<sup>-1</sup>.



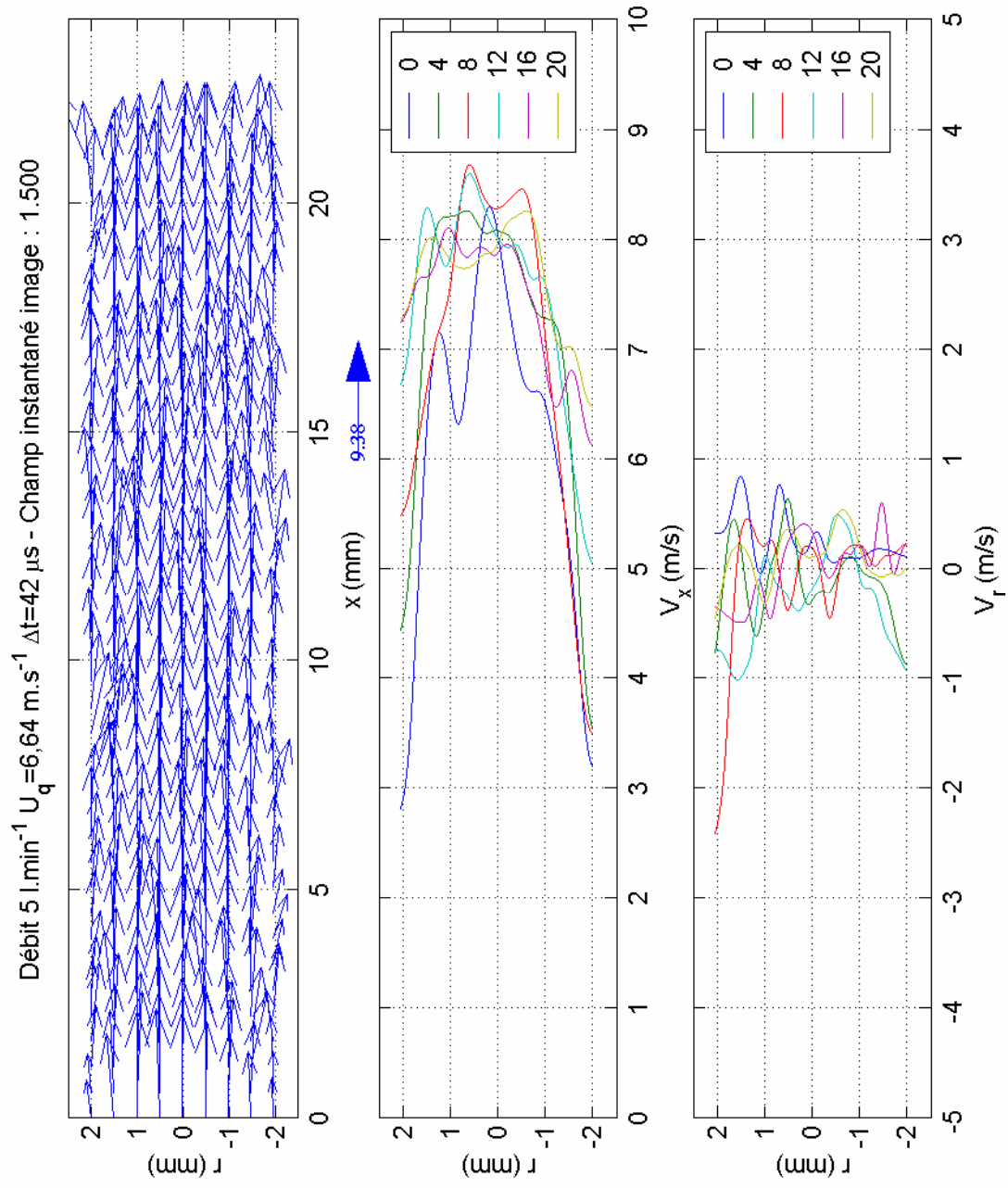


Figure 23 : Champ de vitesse instantané pour le débit  $5 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$ .

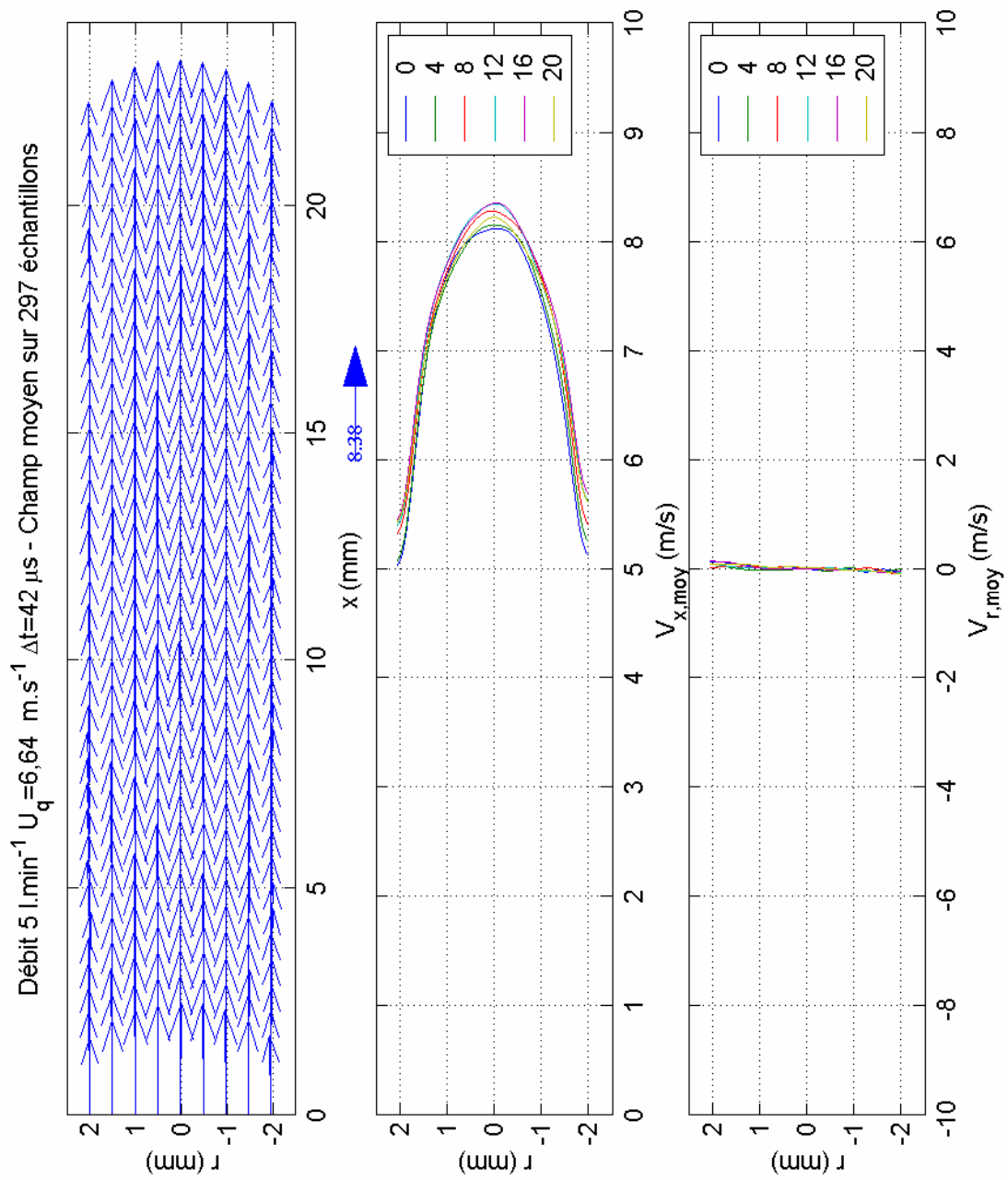


Figure 24 : Champ de vitesse moyen pour le débit  $5 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ .

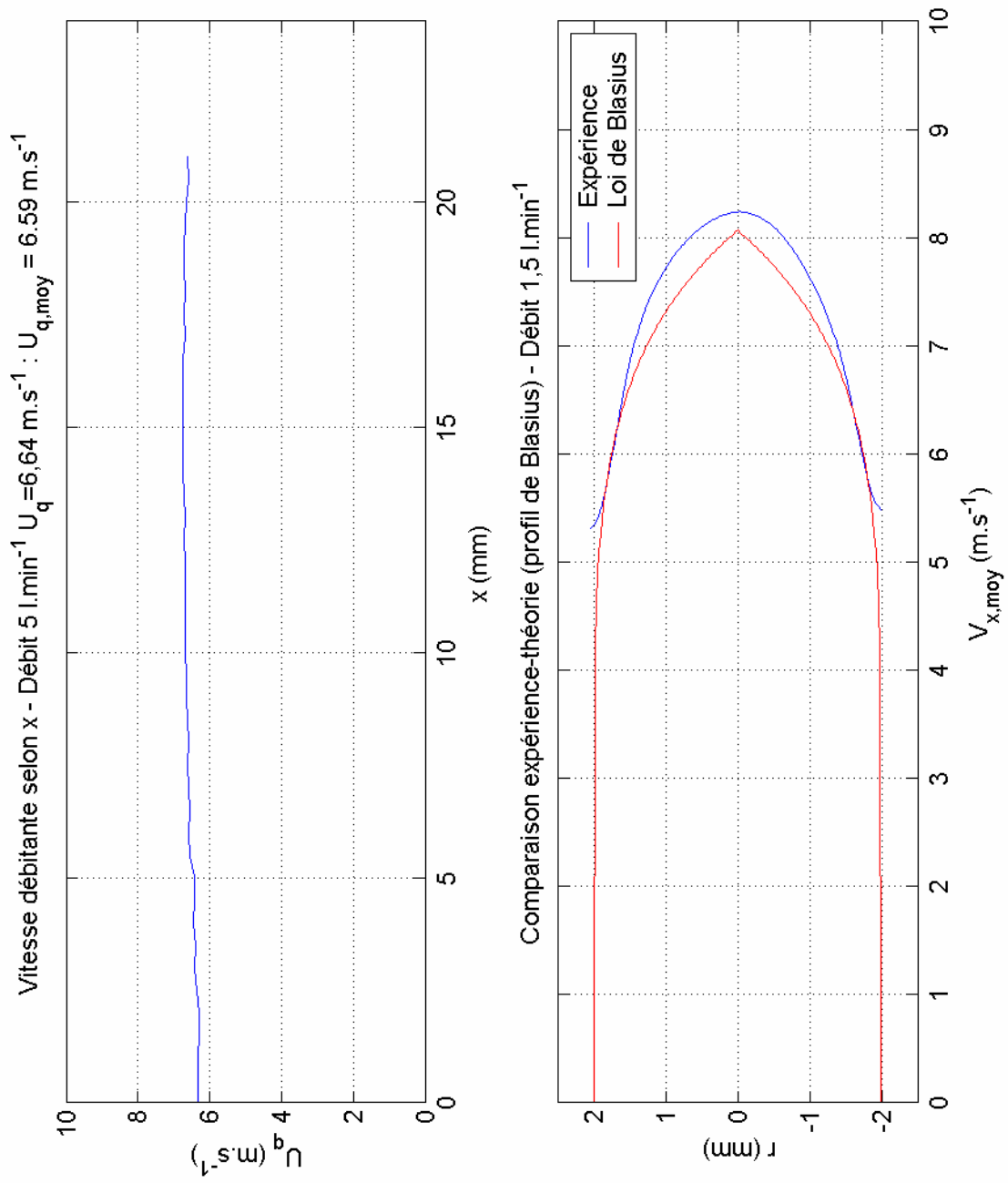


Figure 25 : Évolution de la vitesse débitante mesurée pour le débit 5 l.min<sup>-1</sup>.

## **Conclusion**

Cette étude a prouvé la fonctionnalité de la maquette de l'échangeur thermique. Le banc expérimental qui lui est associé montre des possibilités supérieures à celles du banc préalablement utilisé (expérience préliminaire sur un tube isolé) en ce qui concerne les paramètres de réglages du dispositif (position de la caméra, de la nappe laser, ...).

La caractéristique de la chute de pression entre l'entrée et la sortie de la maquette a été obtenue.

L'étude de cinq débits sur le tube isolé a permis de valider ce concept expérimental de mesure par PIV et de retrouver les débits traversant l'installation. Par ailleurs, les champs moyens de vitesse sont tout à fait conformes aux évolutions attendues, ce qui valide le procédé expérimental et permet de passer aux essais sur la maquette complète.

## Références

COMOLET, R. (1994) *Mécanique Expérimentale des Fluides*, Tome II, 4<sup>e</sup> édition, Masson, Paris.

QUÉNOT, G. M. (1992) The Orthogonal Algorithm for Optical Flow Detection Using Dynamic Programming, *Proc. IEEE ICASSP*, vol. III, pp. 249-252.

QUÉNOT, G. M., PAKLEZA, J., KOWALEWSKI, T. A. (1998) Particule Image Velocimetry with Optical Flow, *Experiments in Fluids*, 25 : 177-189.

SATO, M. (2003) *Étude de l'écoulement par PIV dans un tube d'échangeur thermique*, Rapport de stage de Maîtrise de Technologie Mécanique, Université Pierre et Marie Curie Paris VI et ENS Cachan.