HAL
open science

Caractérisation par PIV de l'écoulement dans un échangeur thermique : mesures PIV dans chaque tube de l'échangeur

Thierry M. Faure

To cite this version:

Thierry M. Faure. Caractérisation par PIV de l'écoulement dans un échangeur thermique : mesures PIV dans chaque tube de l'échangeur. 2004. hal-00118481

HAL Id: hal-00118481

https://hal.science/hal-00118481v1

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 : mesures PIV dans chaque tube de l'échangeur

Rapport d'essais phase 3

Avril 2004

Rédacteur : Thierry FAURE

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

Table des matières

Introduction **3**
I Dispositif expérimental **4**
I-1 Maquette **4**
I-2 Calcul du grandissement **5**
I-3 Paramètres expérimentaux **5**
I-3-1 Choix des débits ***5***
I-3-2 Conditions expérimentales ***6***
I-4 Méthode de filtrage des images **6**
I-5 Incertitudes de mesure **6**
II Résultats **7**
II-1 Champ de vitesse moyens **7**
II-2 Vitesses débitantes mesurées dans chaque tube **38**
Conclusion **40**
Références **41**
Annexe : feuilles d'expérience **42**

Introduction

Ce rapport d'essais correspond à la phase 3 de l'étude où les essais sont conduits dans chacun des six tubes de la maquette de l'échangeur de chaleur. Il fait suite au rapport des phases 1 et 2 comportant :

1. les mesures de la différence de pression entre l'entrée et la sortie de la maquette,
2. les mesures du champ moyen de vitesse dans un tube isolé, permettant une validation de la technique PIV et le choix des paramètres de mesure.

Après un bref rappel du descriptif de l'installation et des paramètres de mesure, nous présentons les champs moyens de vitesse dans chacun des six tubes de l'échangeur pour cinq débits compris entre 3 $l.min^{-1}$ et 15 $l.min^{-1}$. Une synthèse de l'évolution des vitesses débitantes dans chacun des tubes est ensuite exposée. Les feuilles d'expérience comportant l'ensemble des données de mesures sont fournies en annexe.

Un prochain rapport de synthèse final présentera l'analyse de l'ensemble des résultats.

I Dispositif expérimental

I-1 Maquette

La maquette est placée sur le banc expérimental qui comporte également le chariot de déplacement uniaxe sur lequel sont fixées la tête d'émission laser et la caméra. La précision du déplacement axial est de 0,001 mm. Le mouvement de translation de cet ensemble permet le positionnement successif de la nappe laser sur la génératrice de chacun des six tubes (figure 1).

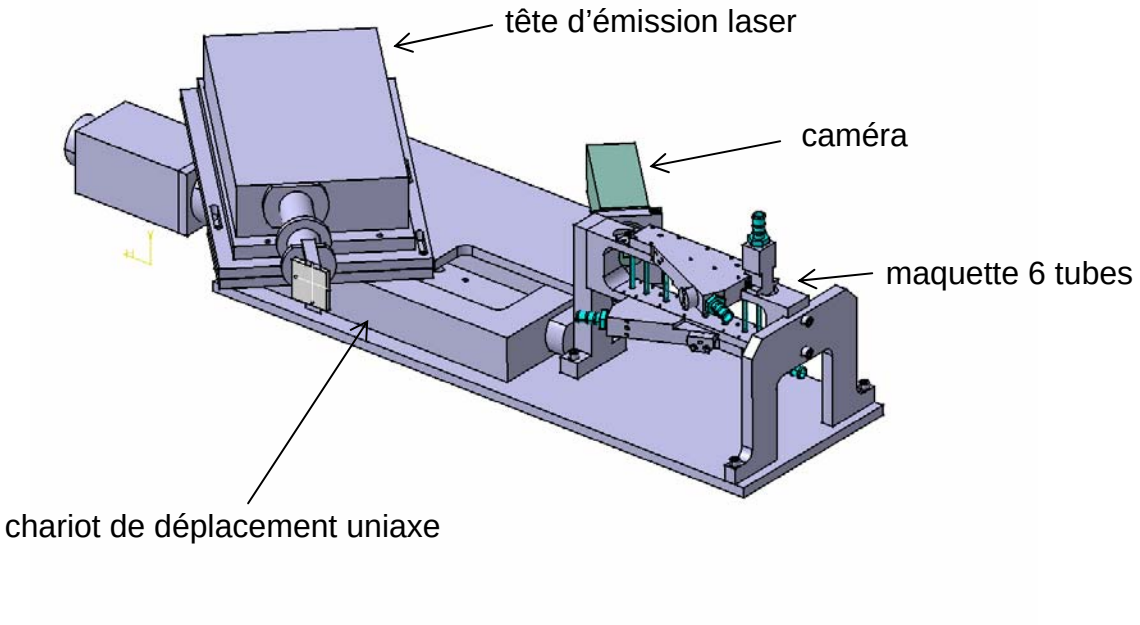

Figure 1 : Banc expérimental.

La figure 2 représente le banc d'essais, avec le branchement du banc hydraulique réalisé sur la maquette.

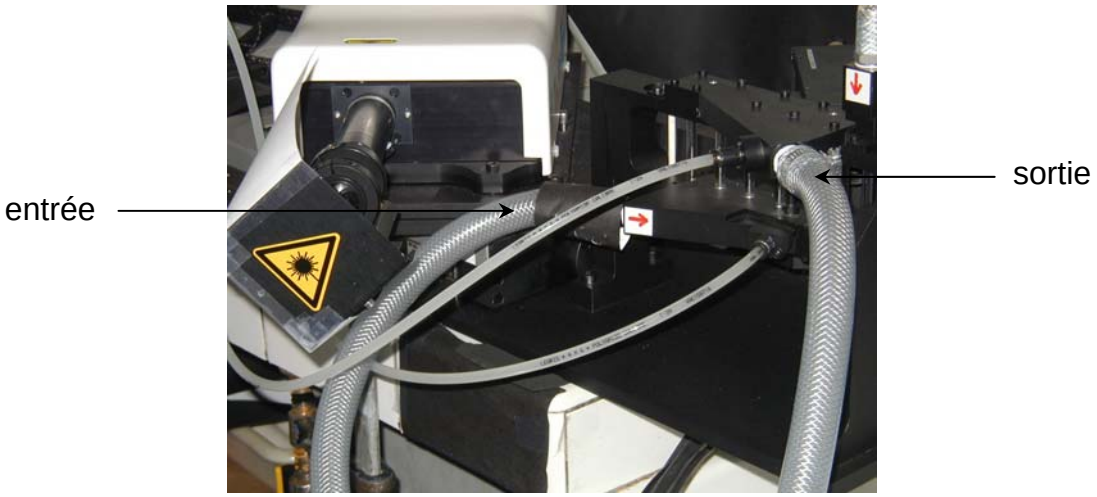

Figure 2 : Branchement de la maquette avec 6 tubes sur le banc hydraulique.

Les tubes de la maquette sont numérotés de 1 à 6 sur la figure 3. Le pas entre deux tubes successifs est de 23 mm. La distance entre le tube isolé (numéro 0) et le tube 1 est de 16,5 mm de même que la distance entre le tube 6 et le tube de la mire. L'origine des

déplacements du chariot est fixée par la position de la nappe laser sur la génératrice du tube isolé.

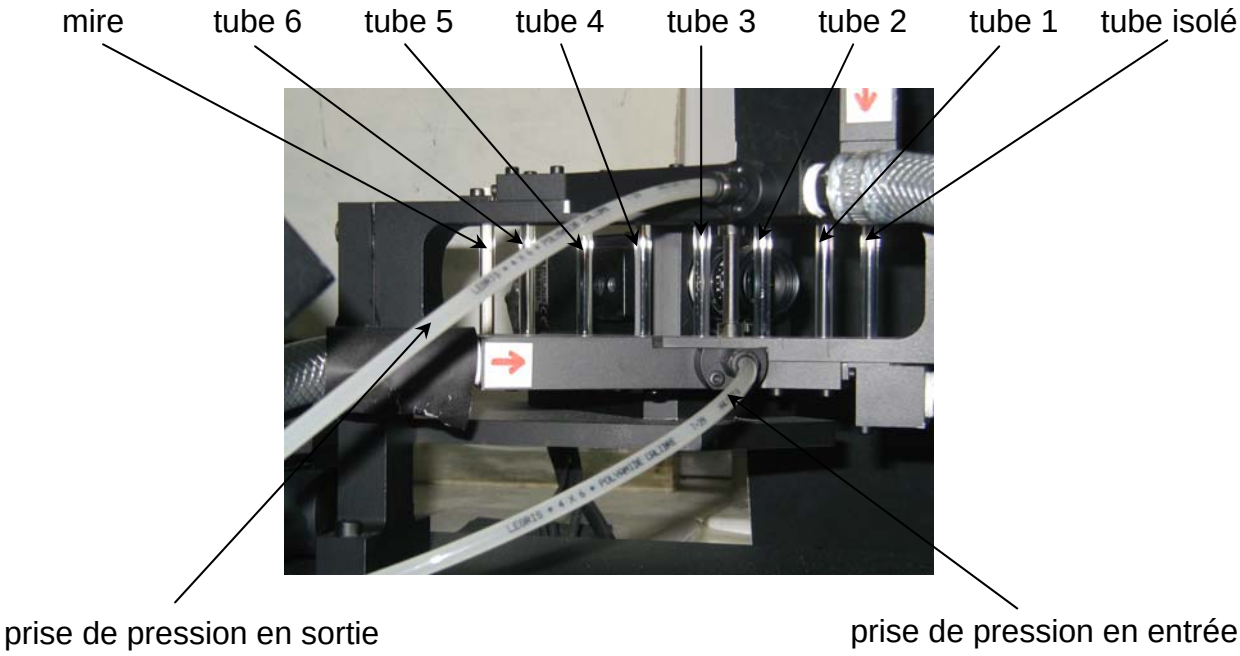

Figure 3 : Repérage des tubes sur la maquette.

I-2 Calcul du grandissement

Le réglage de la caméra est le même que celui utilisé pour les essais sur le tube isolé. La figure 4 présente l'image de la partie centrale du tube de la mire vue par la caméra.

Figure 4 : Mire d'étalonnage du grandissement de la caméra.

Sur cette image des points de la mire, séparés entre eux d'un pas de 400 µm, on mesure horizontalement 743 pixels pour 52 intervalles, ce qui donne un grandissement axial $g_x = 2{,}8.10^{-5}$ m.px^{-1}.

I-3 Paramètres expérimentaux

I-3-1 Choix des débits

Le tableau 1 récapitule les débits retenus avec la vitesse débitante $U_{q,e}$ calculée dans la section d'entrée de la maquette (diamètre 8 mm) et l'intervalle Δt retenu. Cet intervalle de

temps est calculé pour permettre un déplacement moyen de 10 pixels entre deux impulsions laser, pour une vitesse débitante $U_{q,t}$ identique dans chaque tube (diamètre 4 mm) qui donnerait le débit d'entrée. La conservation du débit conduit à :

$$\int_{\text{entrée}} U\,dS = \int_{\text{tubes}} U\,dS$$

soit, pour un débit identique dans chaque tube :

$$U_{q,e}S_e = 6\,U_{q,t}S_t$$

débit ($l.min^{-1}$)	$U_{q,e}$ ($m.s^{-1}$)	$U_{q,t}$ ($m.s^{-1}$)	Δt (μs)
3	0,995	0,663	422
6	1,99	1,33	210
9	2,98	1,99	140
12	3,98	2,65	105
15	4,97	3,32	84

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

I-3-2 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 µm et leur masse volumique est de 1400 $kg.m^3$. Les essais sont réalisés à une température et à une pression autour des conditions standard. Ces valeurs sont reportées dans les feuilles d'expériences données en annexe.

I-4 Méthode de filtrage des images

La méthode de filtrage des images exposée dans le rapport précédent (Faure 2004) a été mise en œuvre dans cette étude.

I-5 Incertitudes de mesure

Le dépouillement des champs de vitesse PIV est réalisé à l'aide de l'algorithme de flot optique par programmation dynamique (Quénot, 1992, Quénot *et al.* 1998). L'incertitude de mesure résultant de ce traitement est de 1/32e de pixel. Étant donné le grandissement g_x, il en résulte une incertitude sur la vitesse :

$$\varepsilon_U = \frac{\varepsilon_{\Delta x}}{\Delta t} = \frac{g_x \varepsilon_{pixel}}{\Delta t} = \frac{8{,}748.10^{-7}}{\Delta t}$$

Les incertitudes absolues de vitesse sont fonctions de l'intervalle de temps Δt pris entre deux éclairements laser, donc du débit d'entrée. Elles sont récapitulées dans le tableau 2.

débit ($l.min^{-1}$)	Δt (μs)	ε_U ($m.s^{-1}$)
3	422	$2{,}07.10^{-3}$
6	210	$4{,}17.10^{-3}$
9	140	$6{,}25.10^{-3}$
12	105	$8{,}33.10^{-3}$
15	84	$10{,}41.10^{-3}$

Tableau 2 : Incertitudes absolues de vitesse en fonction du débit.

II Résultats

II-1 Champ de vitesse moyens

Les figures 5 à 34 présentent les champs de vitesse issus de la moyenne sur 297 champs instantanés. Les figures, classées par débit croissant, montrent le champ de vitesse dans les tubes de 1 à 6. Sur chaque figure, on représente successivement :

1. les composantes de vitesse moyenne situées dans la nappe laser sous forme de champ de flèches,
2. l'évolution radiale de la vitesse moyenne axiale, pour six positions axiales (x = 0, 4, 8, 12, 16, 20 mm),
3. l'évolution radiale de la vitesse moyenne radiale, pour six positions axiales (x = 0, 4, 8, 12, 16, 20 mm).

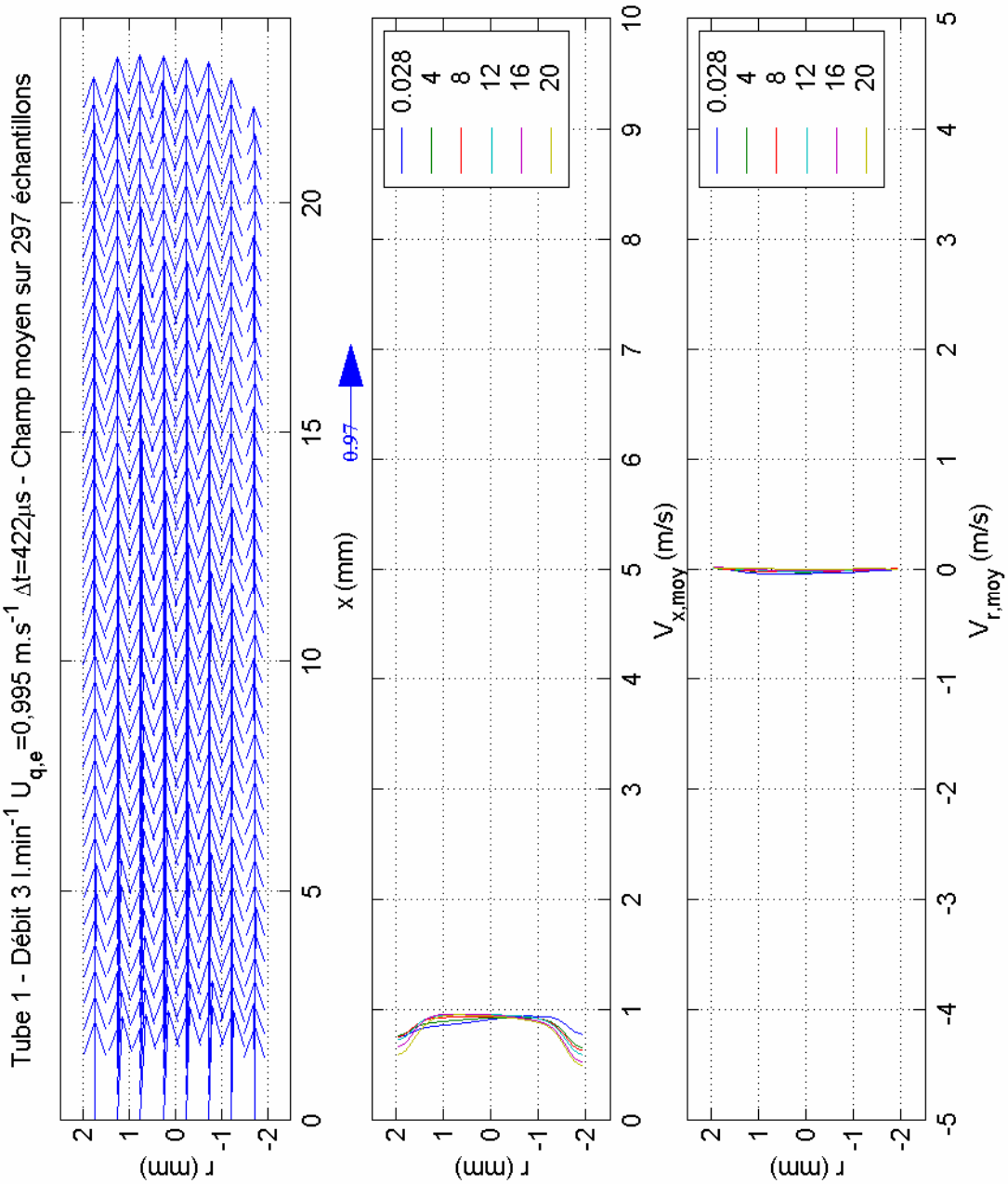

Figure 5 : Champ de vitesse moyen dans le tube 1 pour le débit d'entrée 3 l.min^{-1}.

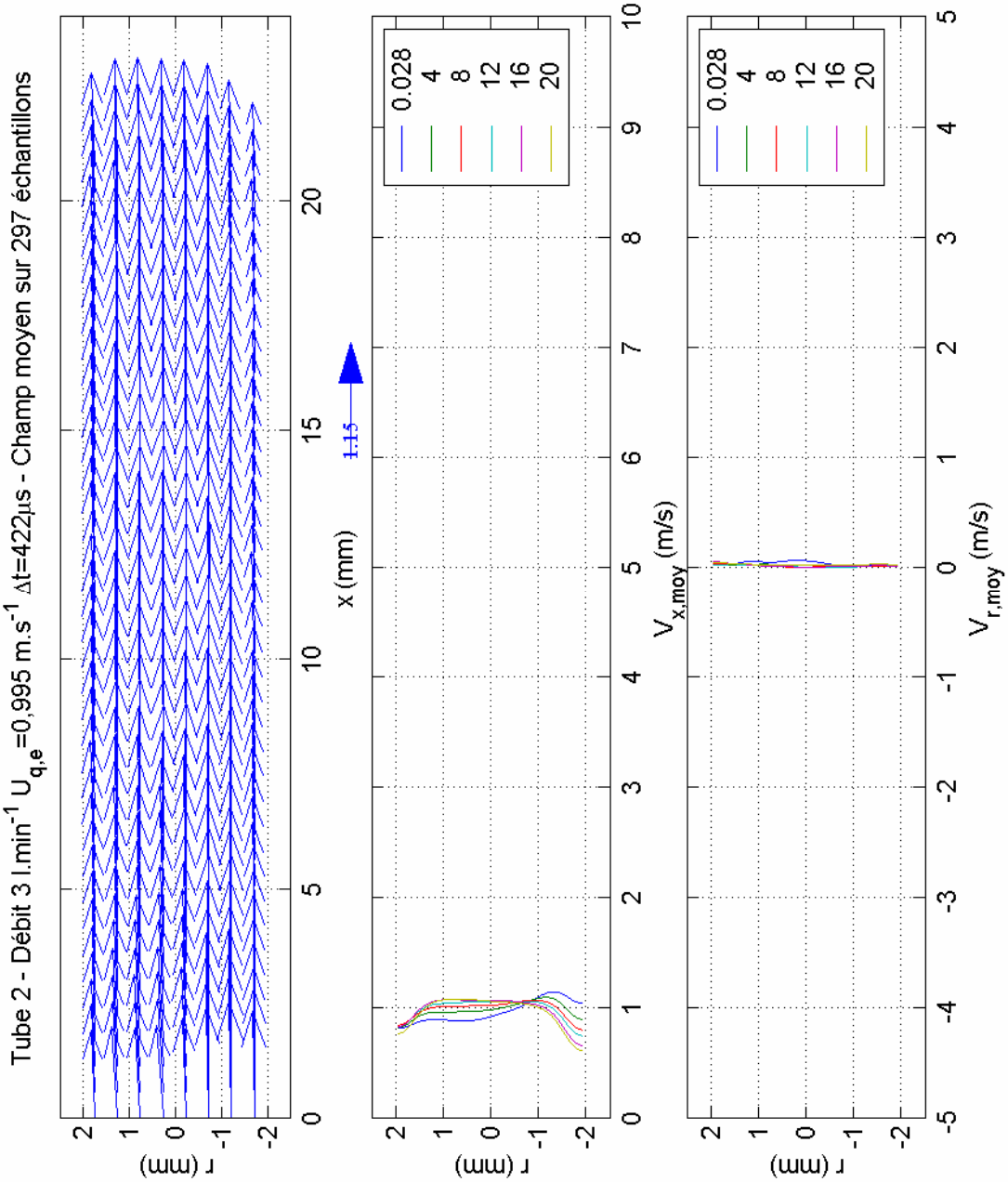

Figure 6 : Champ de vitesse moyen dans le tube 2 pour le débit d'entrée 3 l.min^{-1}.

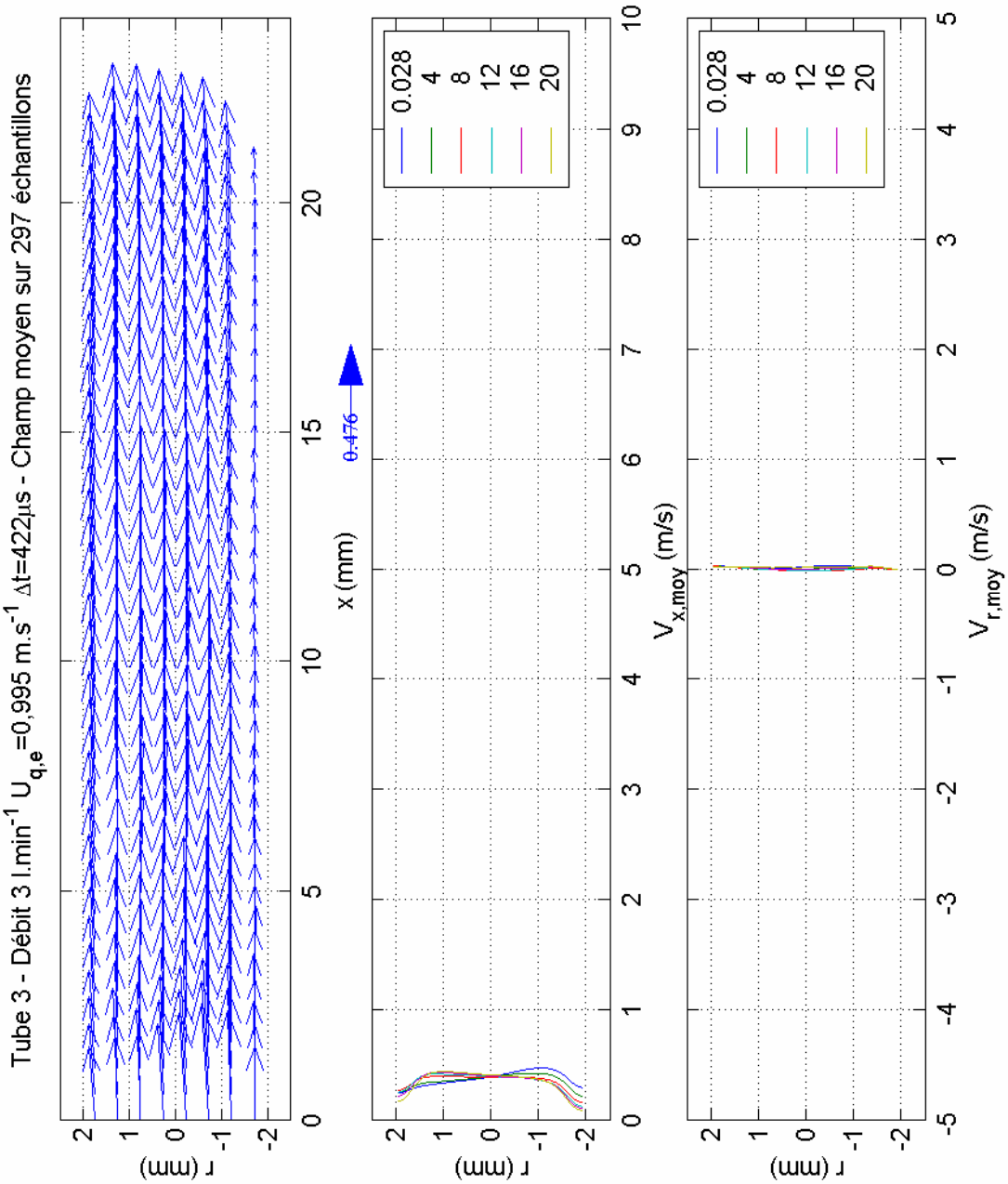

Figure 7 : Champ de vitesse moyen dans le tube 3 pour le débit d'entrée 3 l.min^{-1}.

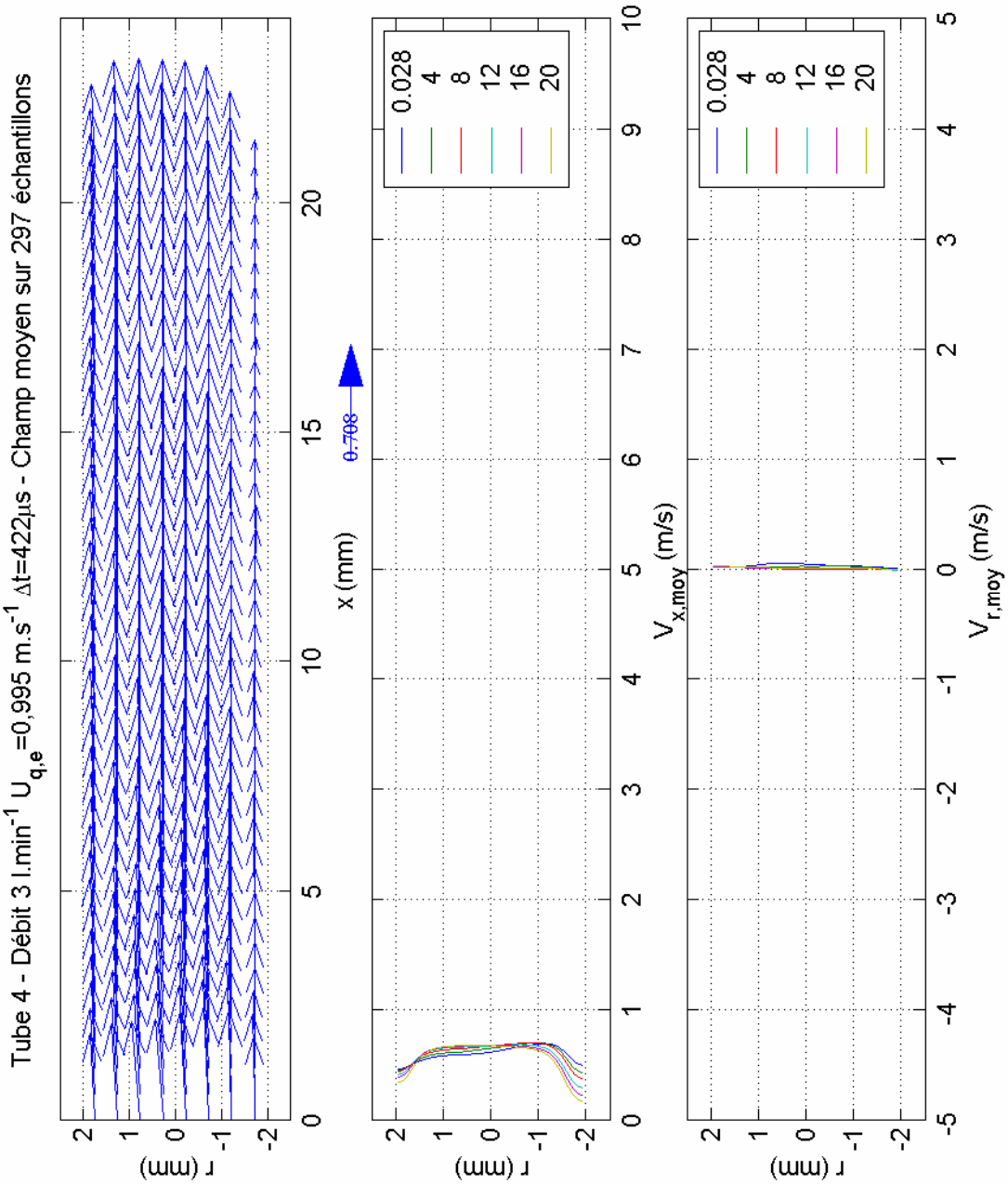

Figure 8 : Champ de vitesse moyen dans le tube 4 pour le débit d'entrée 3 l.min^{-1}.

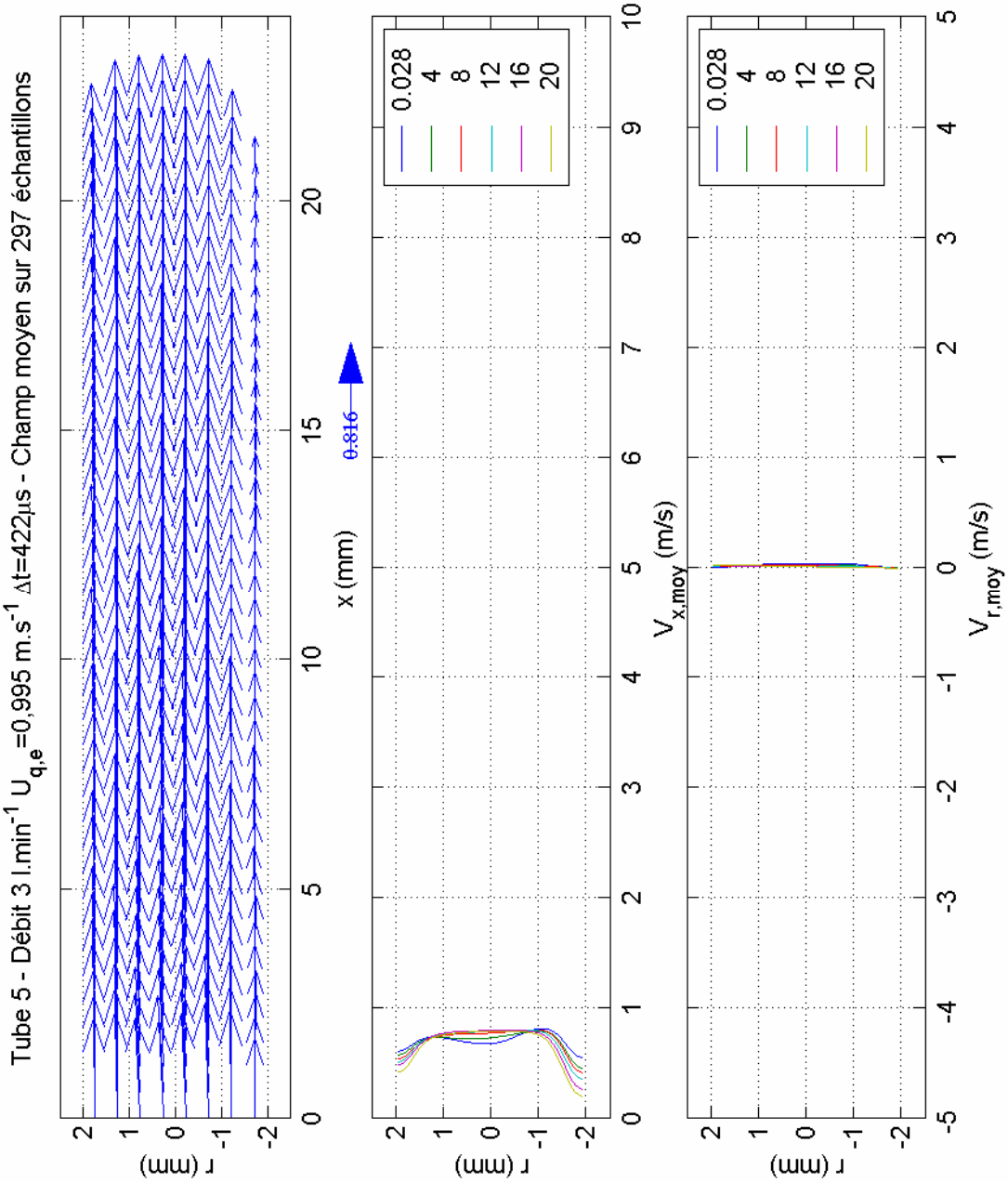

Figure 9 : Champ de vitesse moyen dans le tube 5 pour le débit d'entrée 3 l.min^{-1}.

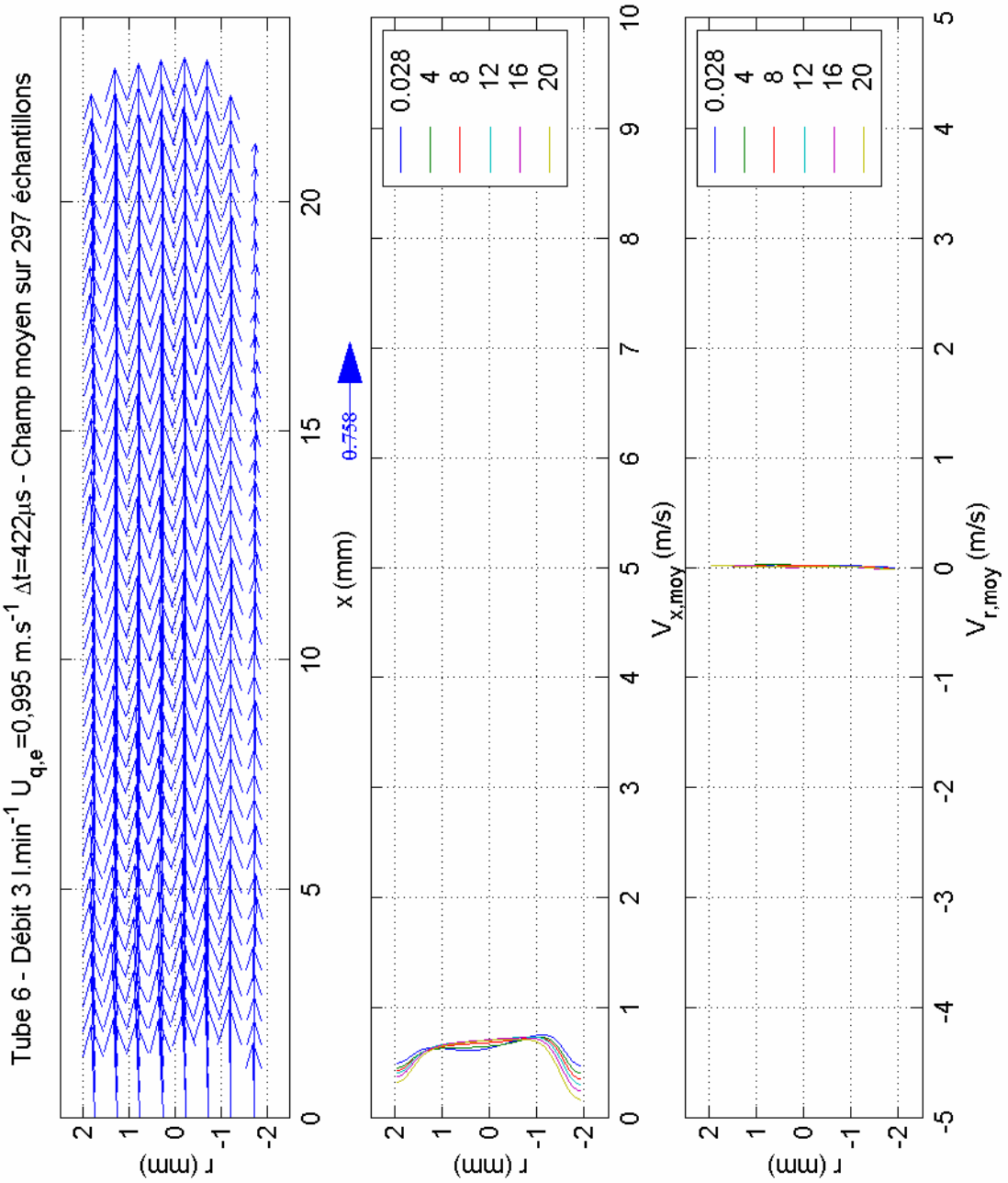

Figure 10 : Champ de vitesse moyen dans le tube 6 pour le débit d'entrée 3 l.min^{-1}.

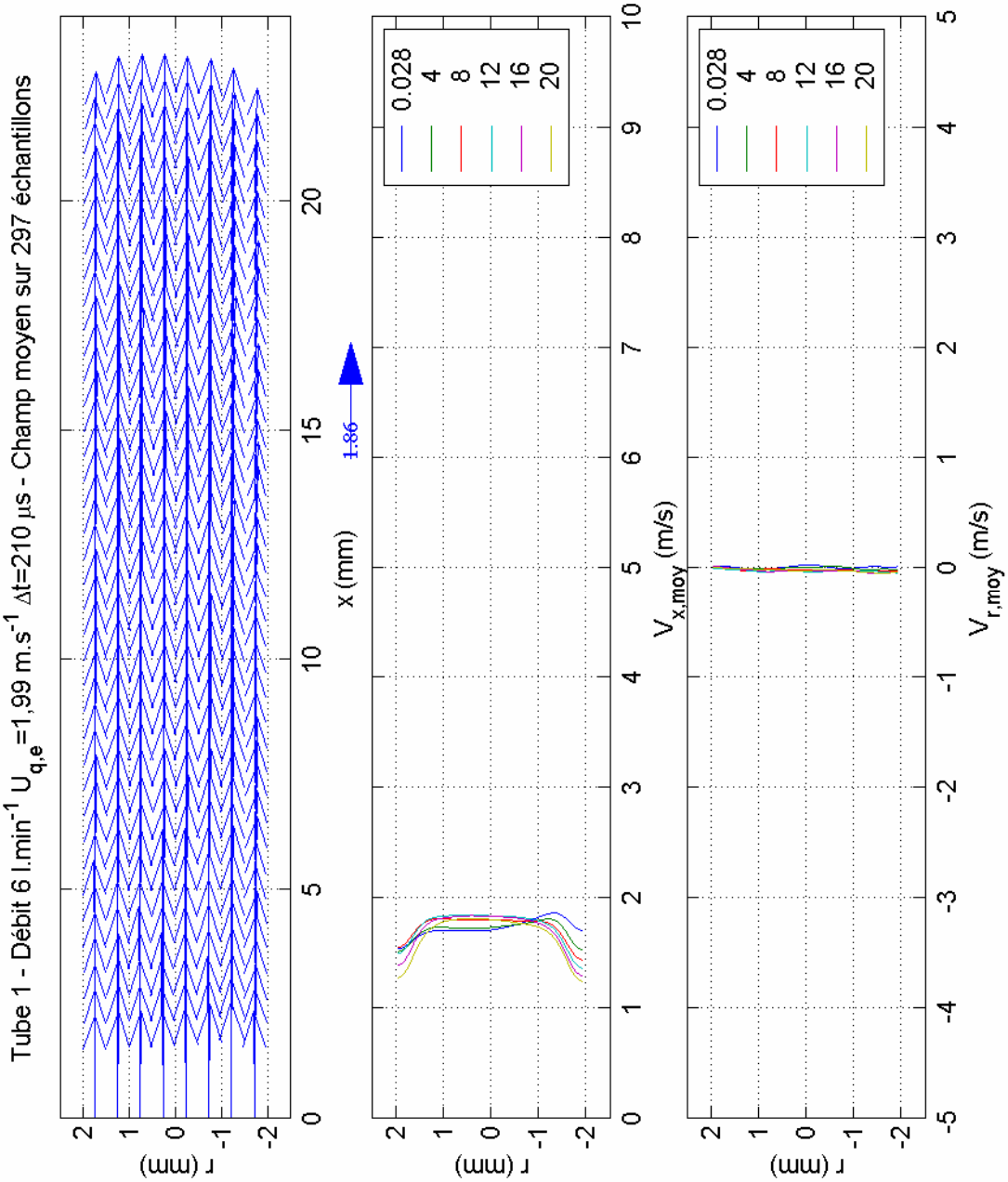

Figure 11 : Champ de vitesse moyen dans le tube 1 pour le débit d'entrée 6 l.min^{-1}.

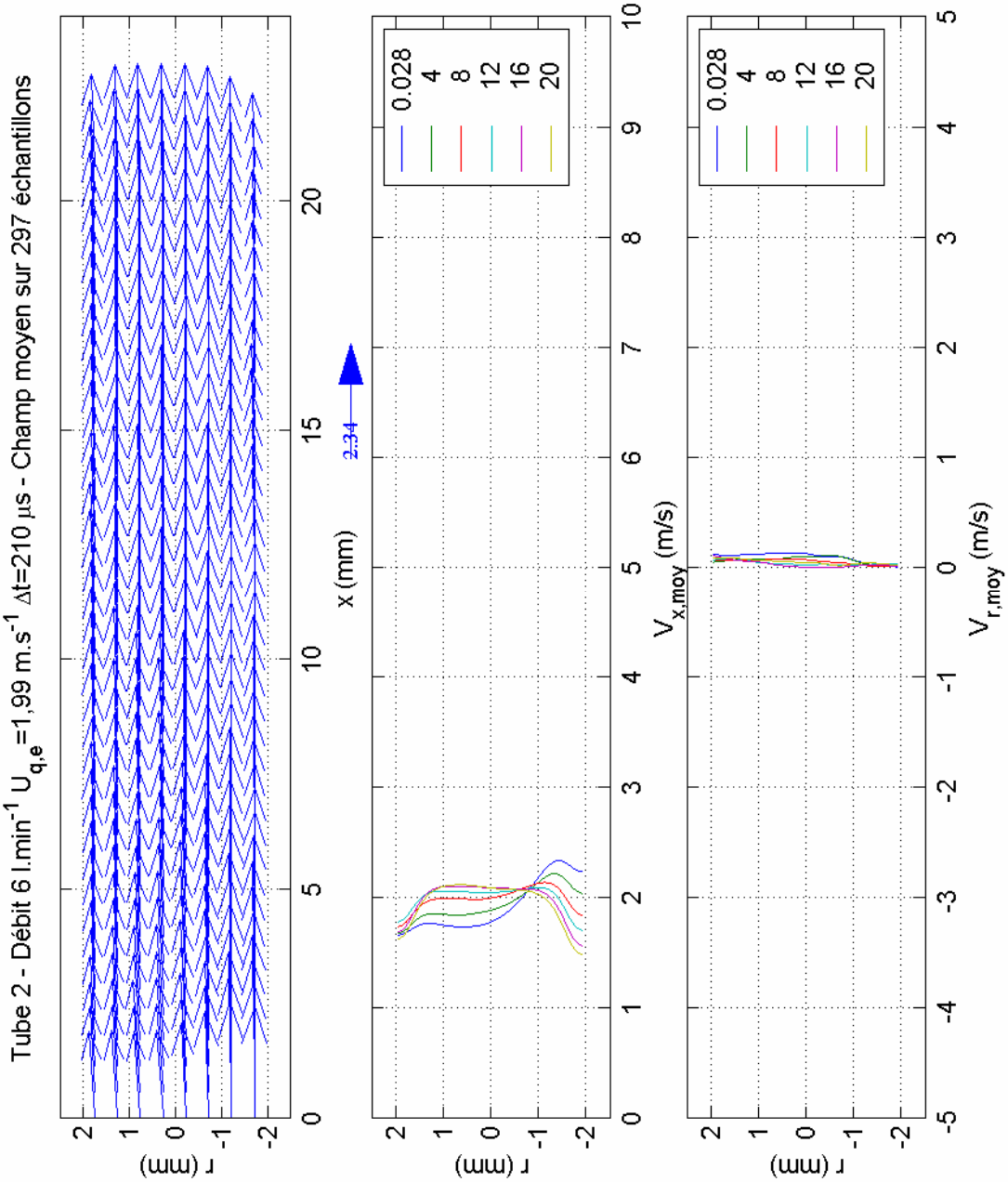

Figure 12 : Champ de vitesse moyen dans le tube 2 pour le débit d'entrée 6 l.min^{-1}.

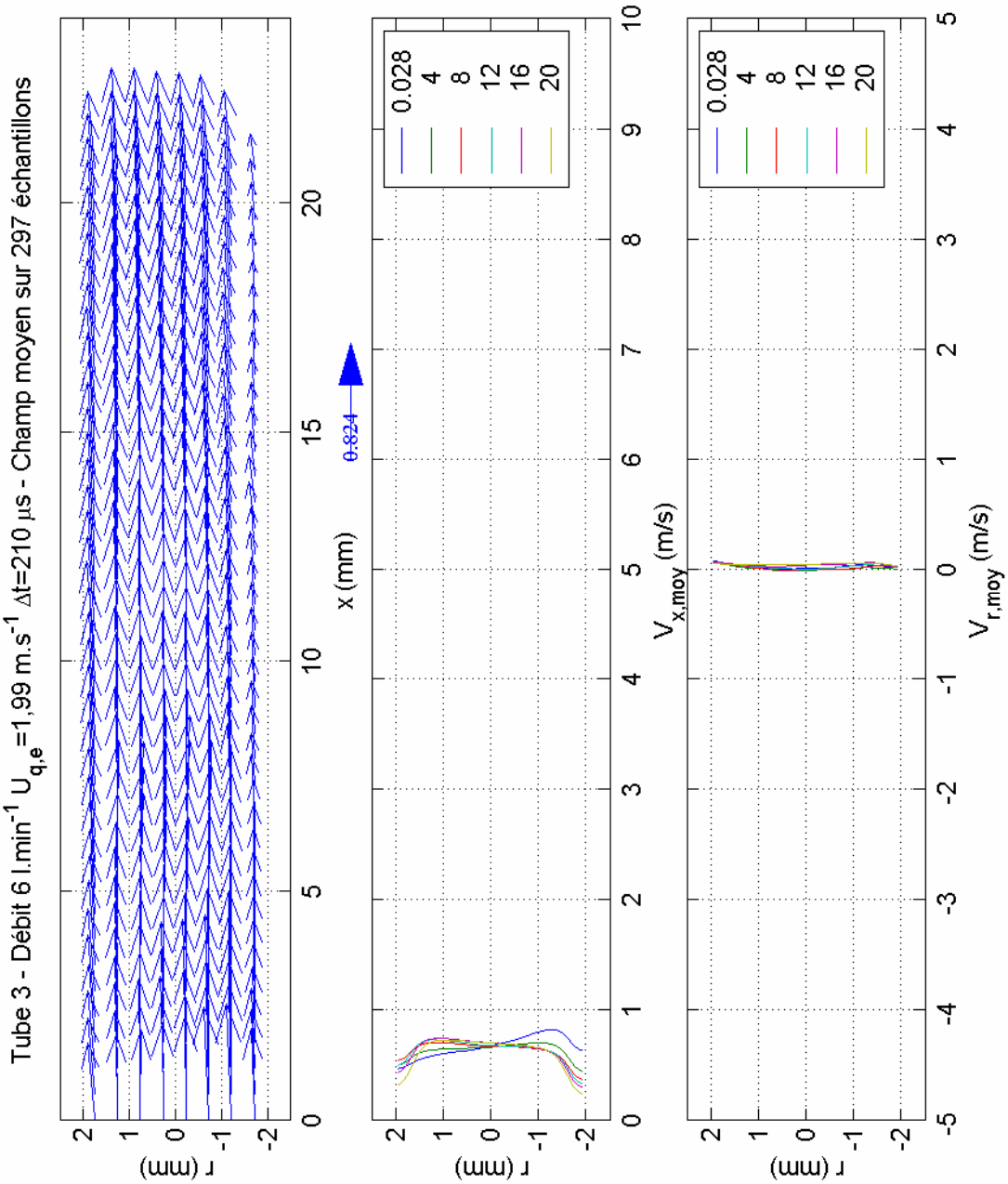

Figure 13 : Champ de vitesse moyen dans le tube 3 pour le débit d'entrée 6 l.min^{-1}.

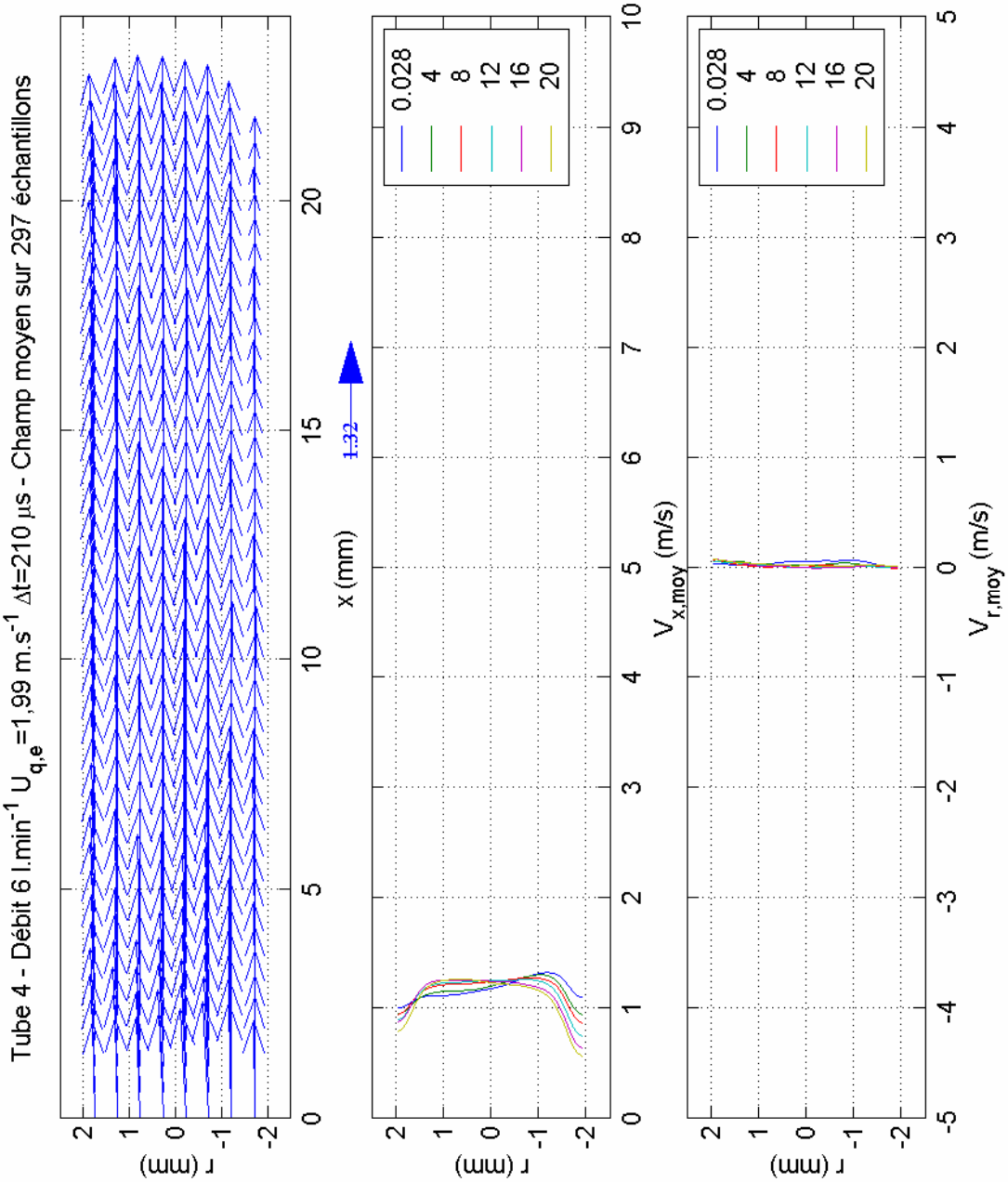

Figure 14 : Champ de vitesse moyen dans le tube 4 pour le débit d'entrée 6 l.min^{-1}.

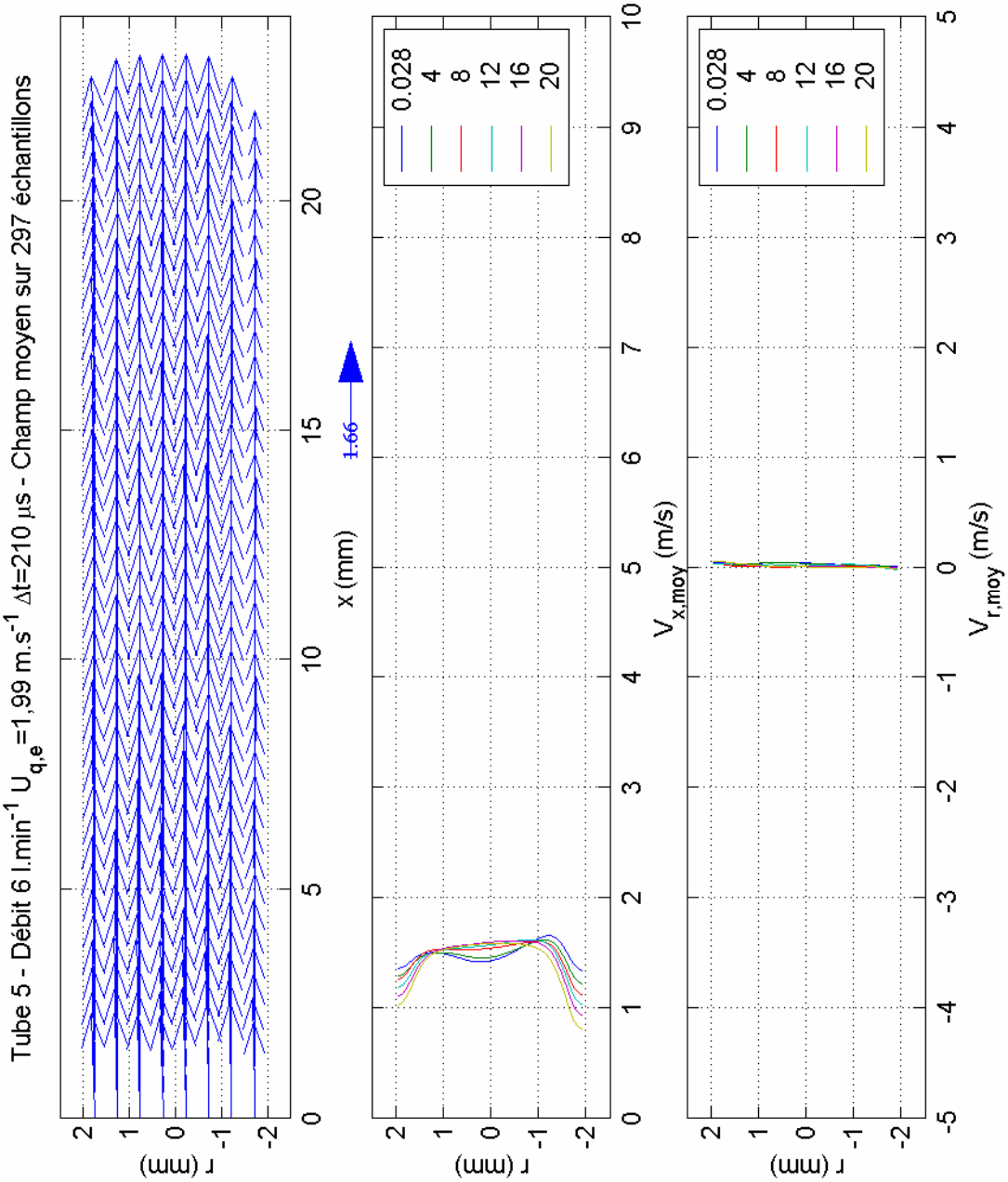

Figure 15 : Champ de vitesse moyen dans le tube 5 pour le débit d'entrée 6 l.min^{-1}.

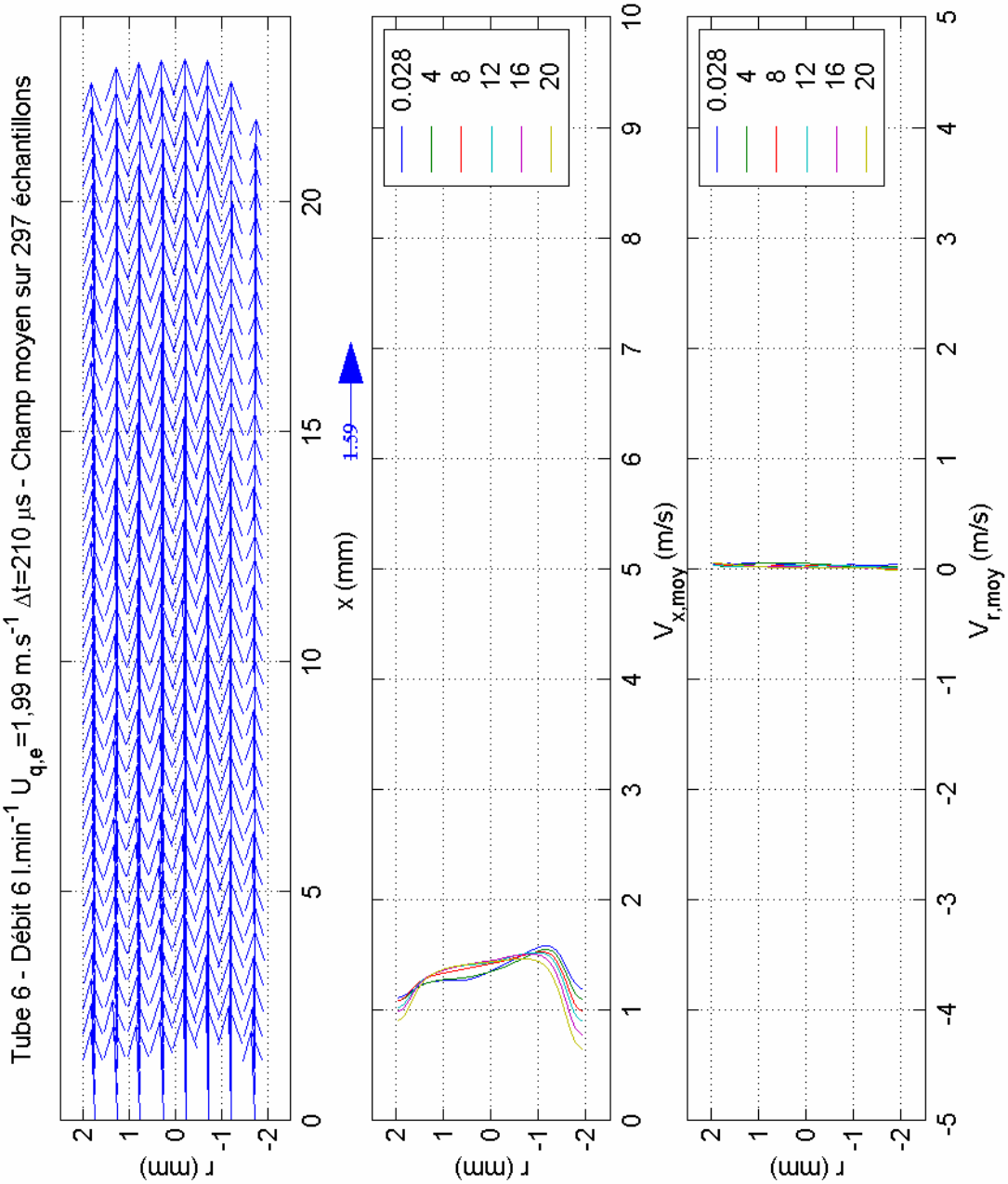

Figure 16 : Champ de vitesse moyen dans le tube 6 pour le débit d'entrée 6 l.min^{-1}.

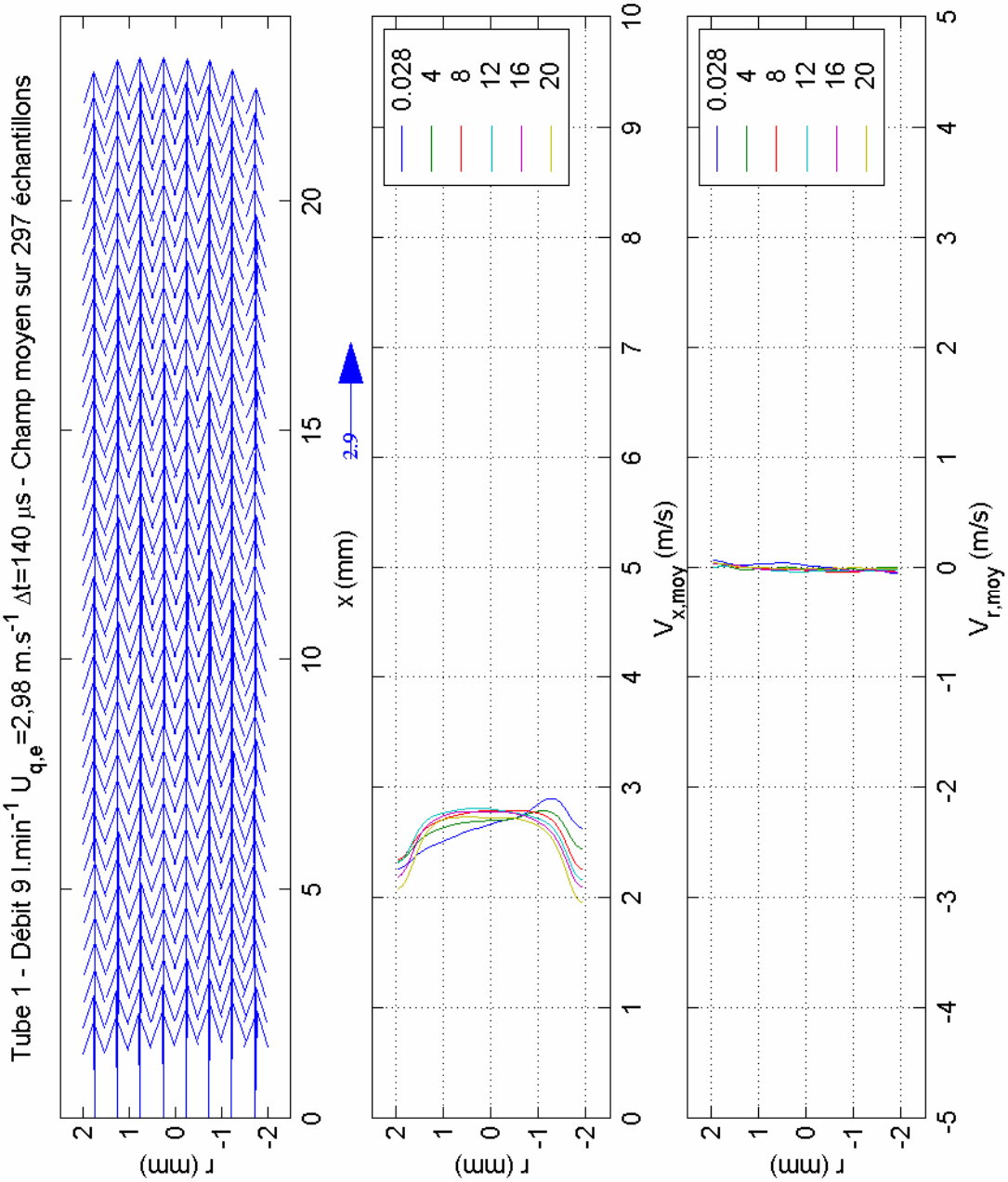

Figure 17 : Champ de vitesse moyen dans le tube 1 pour le débit d'entrée 9 l.min^{-1}.

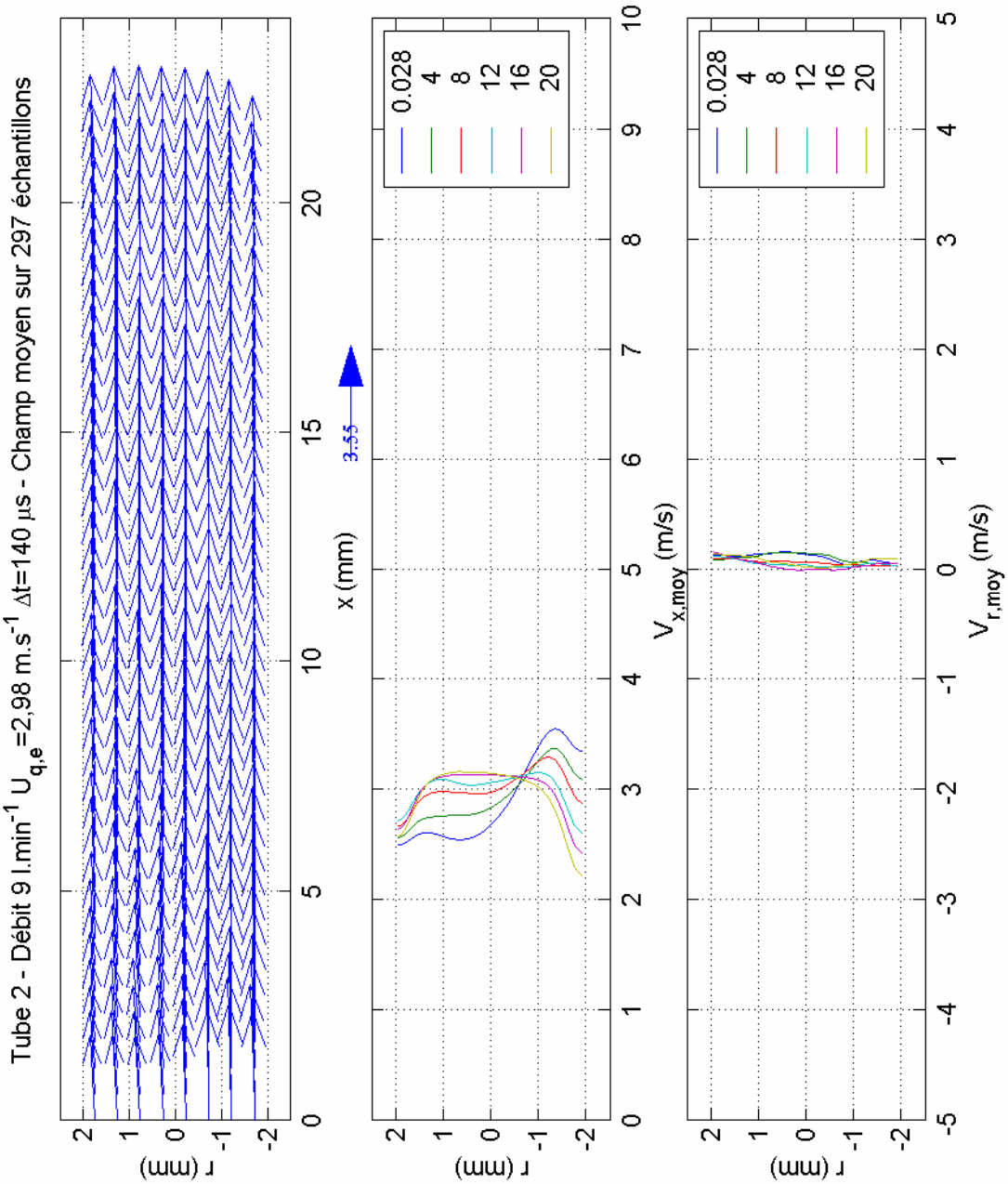

Figure 18 : Champ de vitesse moyen dans le tube 2 pour le débit d'entrée 9 l.min^{-1}.

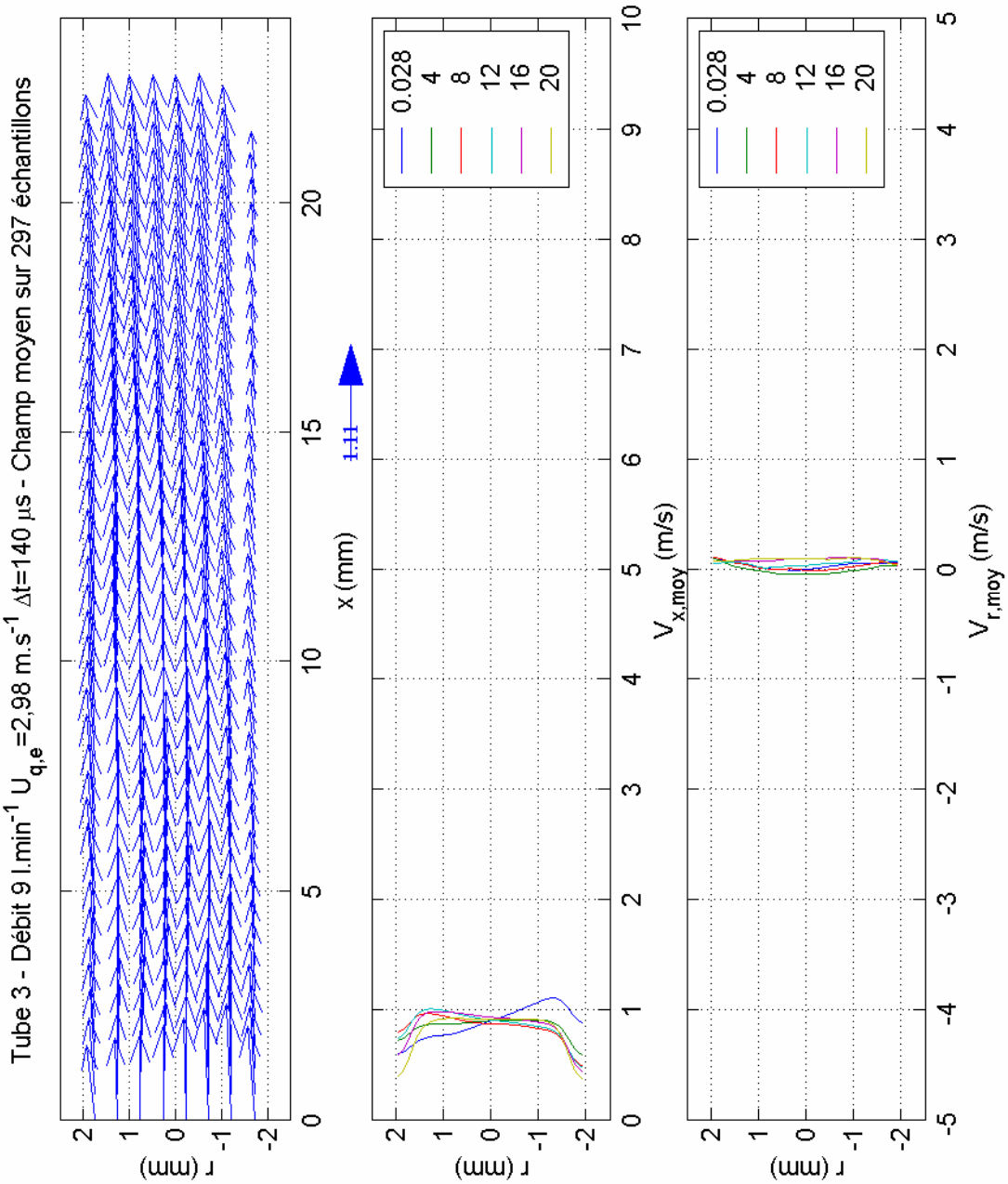

Figure 19 : Champ de vitesse moyen dans le tube 3 pour le débit d'entrée 9 l.min^{-1}.

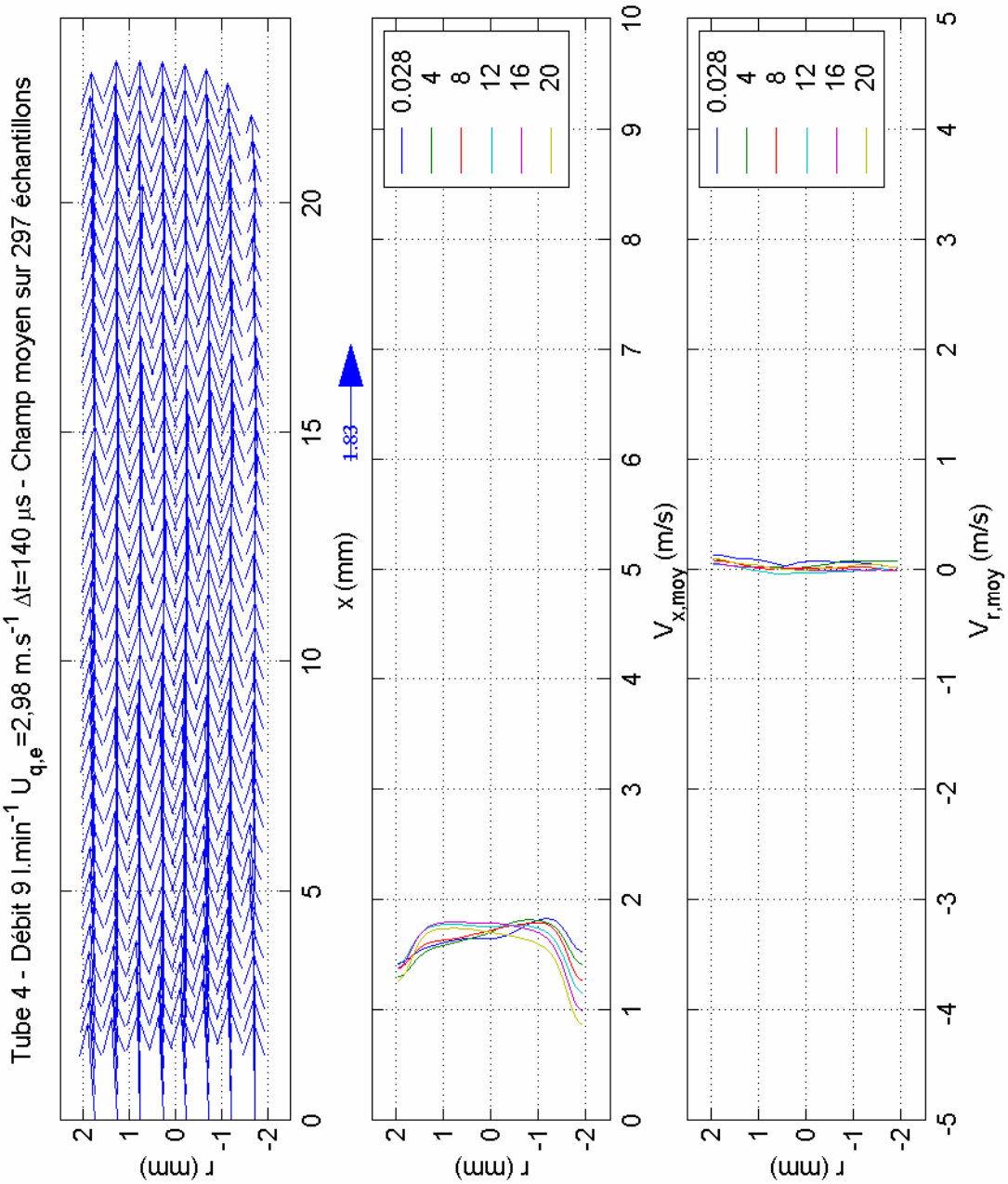

Figure 20 : Champ de vitesse moyen dans le tube 4 pour le débit d'entrée 9 l.min^{-1}.

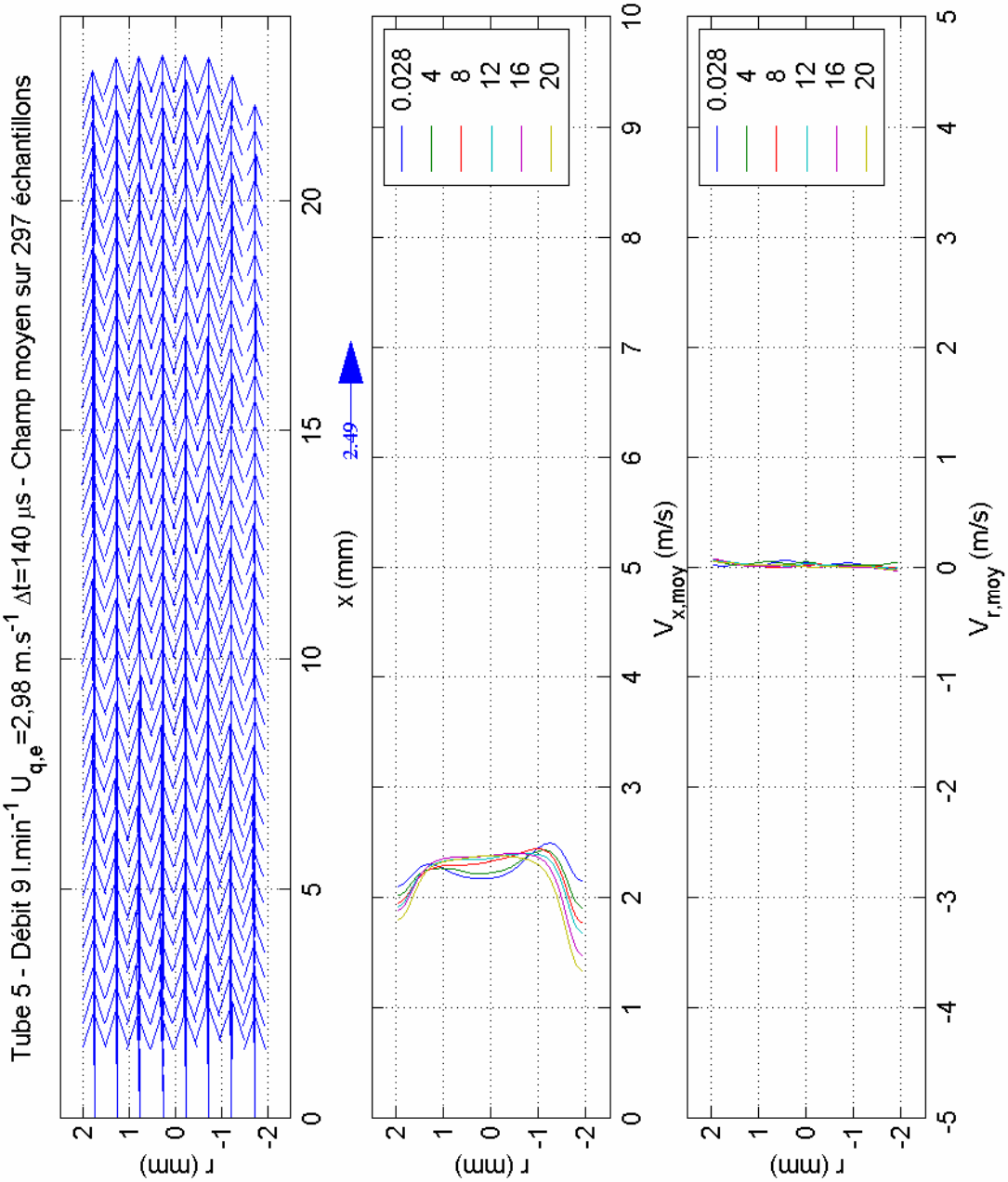

Figure 21 : Champ de vitesse moyen dans le tube 5 pour le débit d'entrée 9 l.min^{-1}.

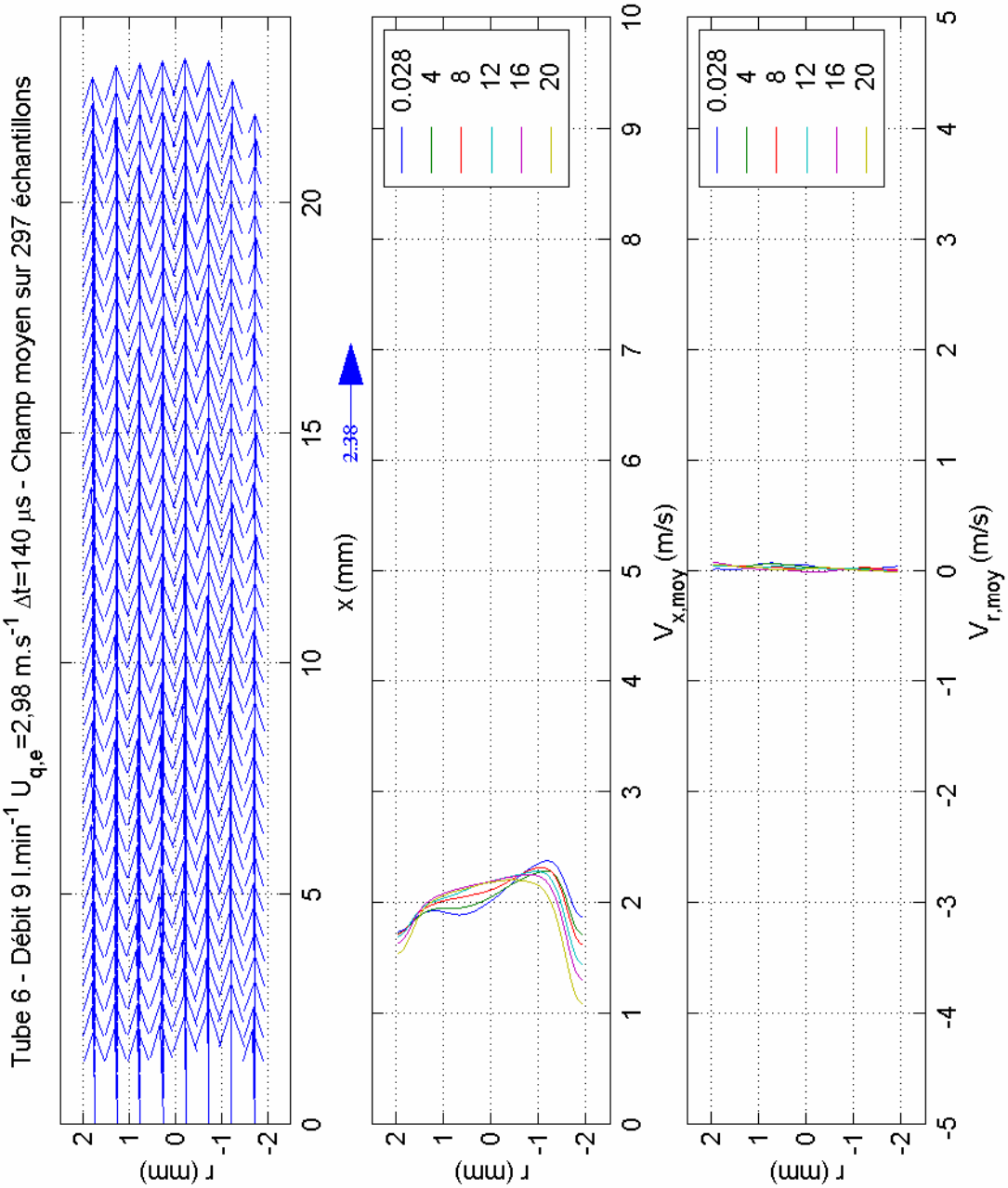

Figure 22 : Champ de vitesse moyen dans le tube 6 pour le débit d'entrée 9 l.min^{-1}.

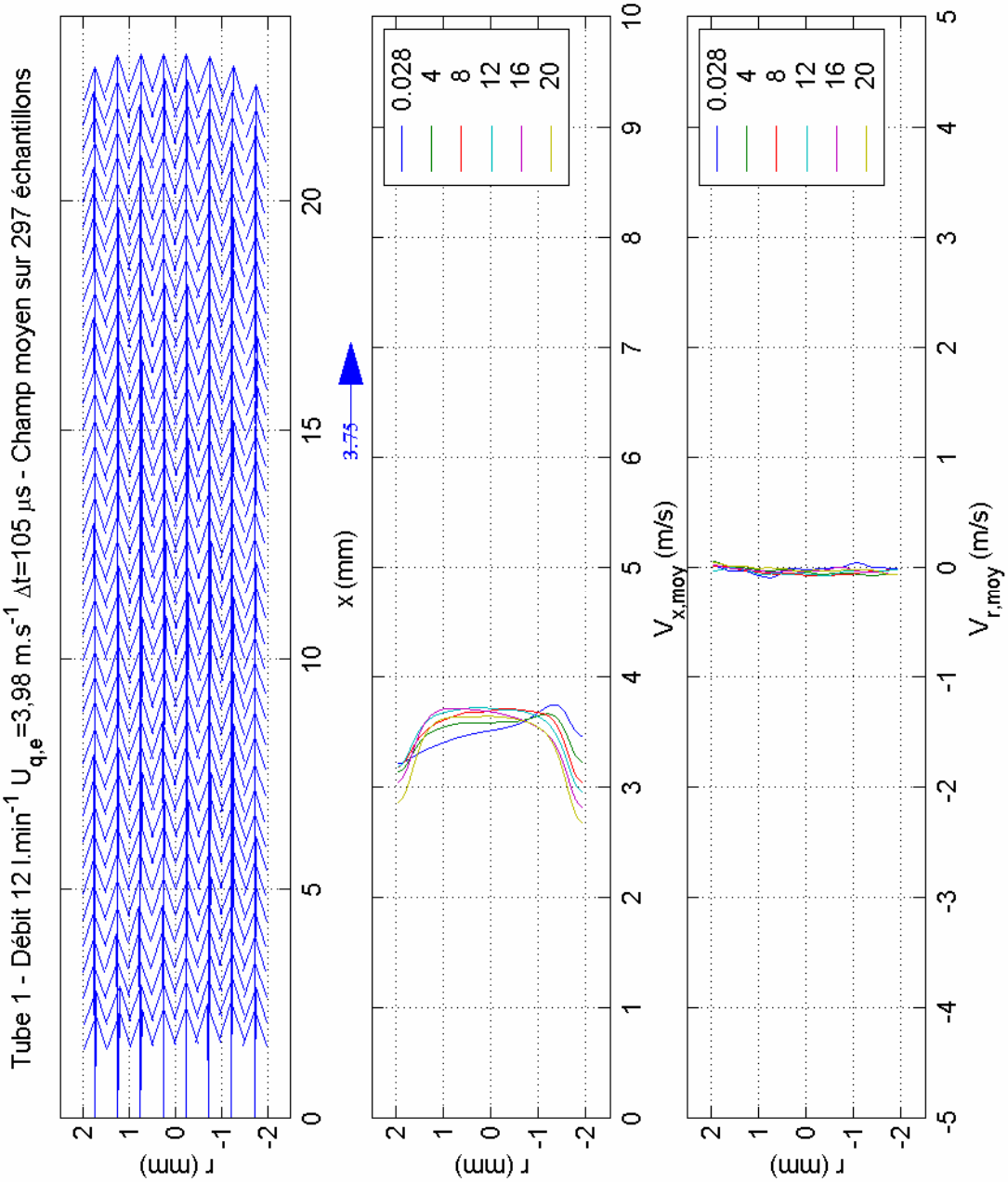

Figure 23 : Champ de vitesse moyen dans le tube 1 pour le débit d'entrée 12 l.min^{-1}.

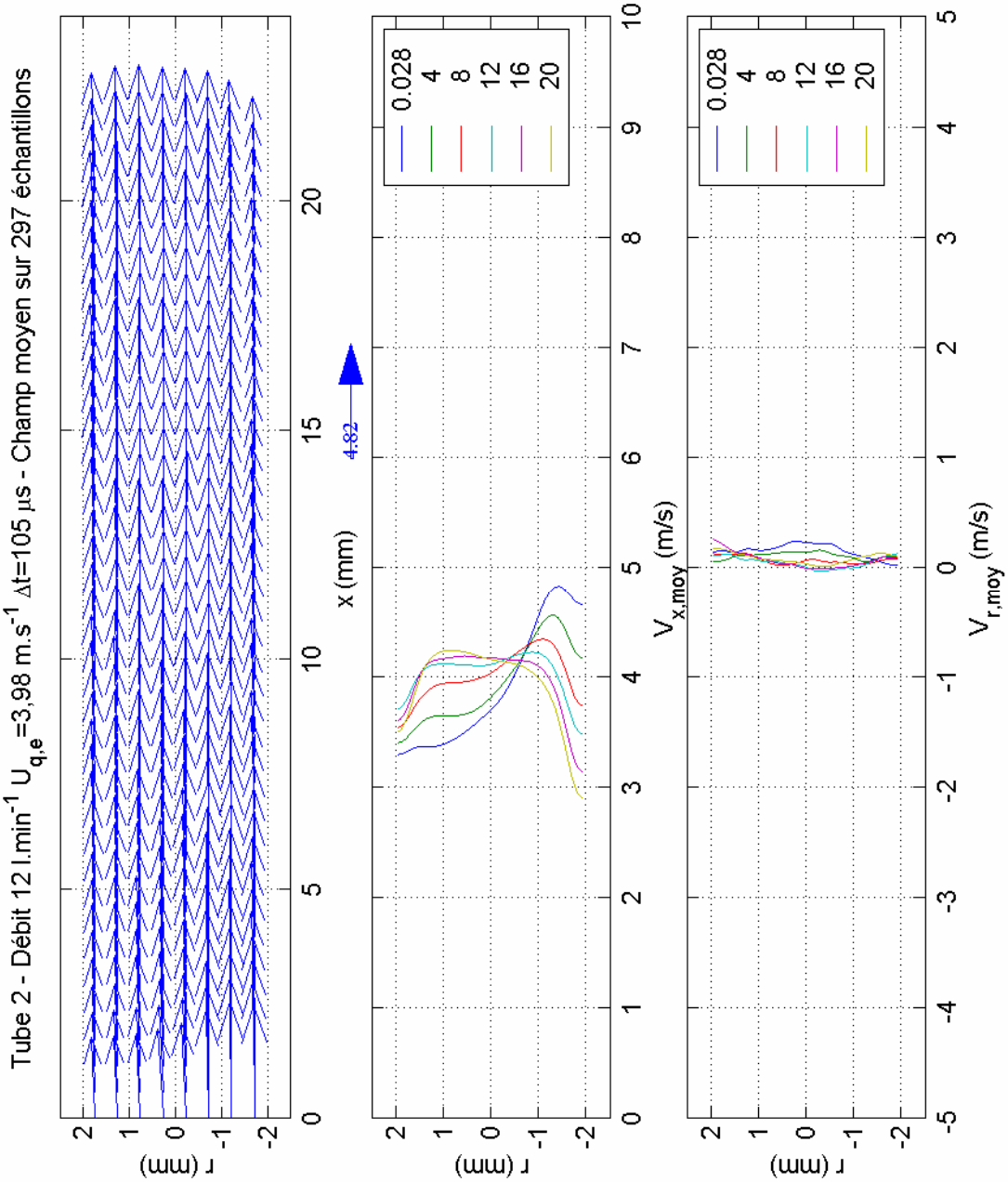

Figure 24 : Champ de vitesse moyen dans le tube 2 pour le débit d'entrée 12 l.min^{-1}.

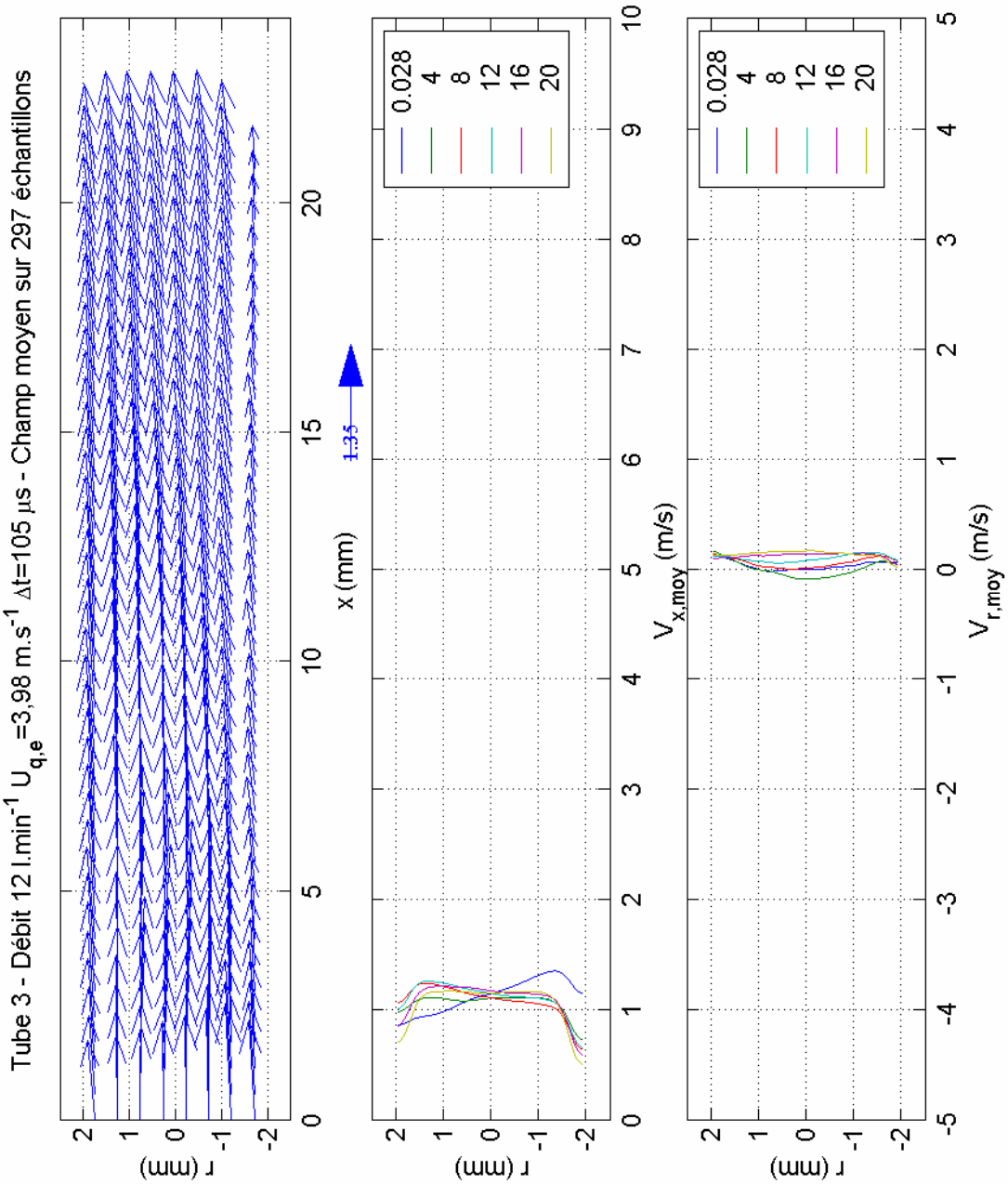

Figure 25 : Champ de vitesse moyen dans le tube 3 pour le débit d'entrée 12 l.min^{-1}.

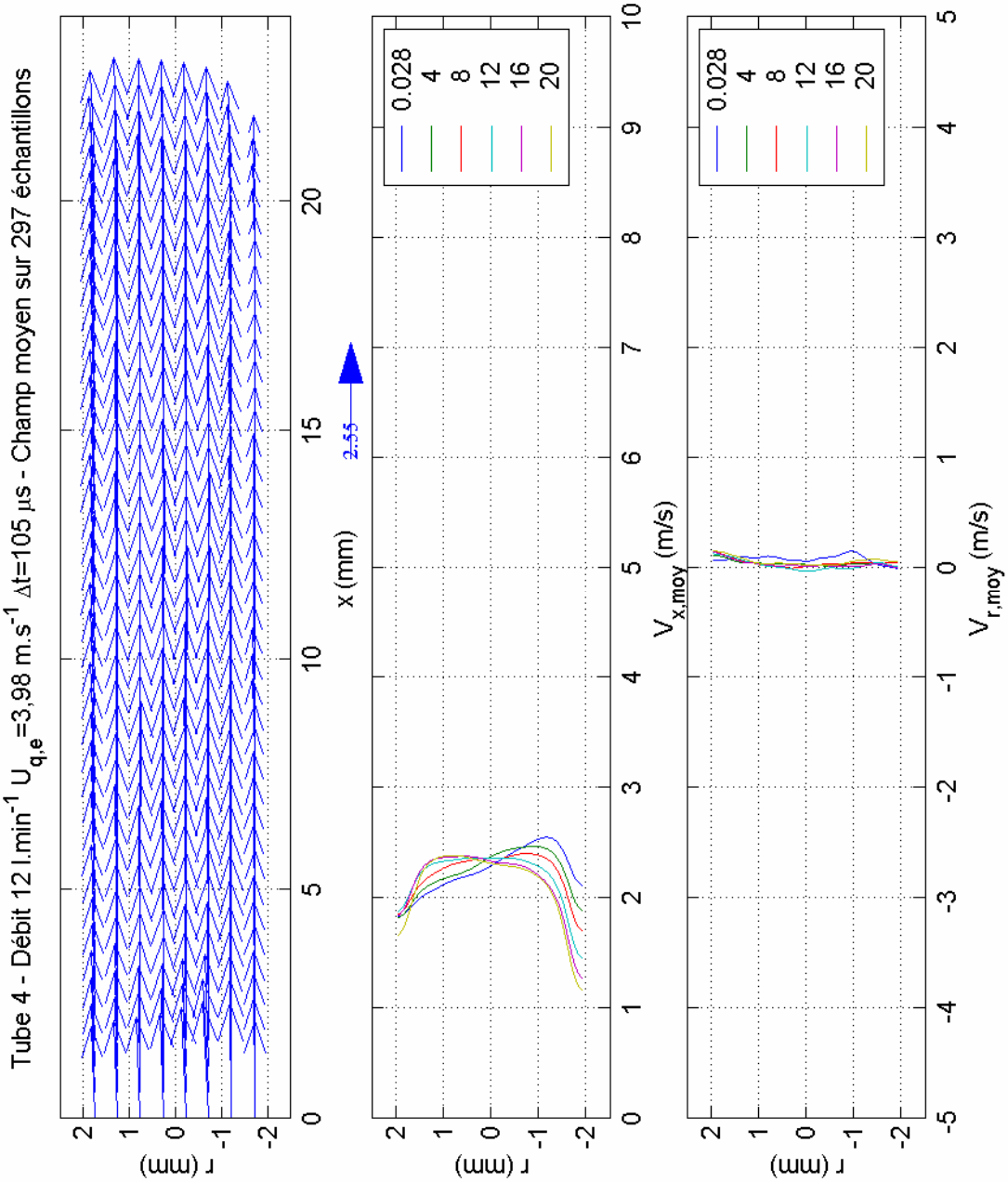

Figure 26 : Champ de vitesse moyen dans le tube 4 pour le débit d'entrée 12 l.min^{-1}.

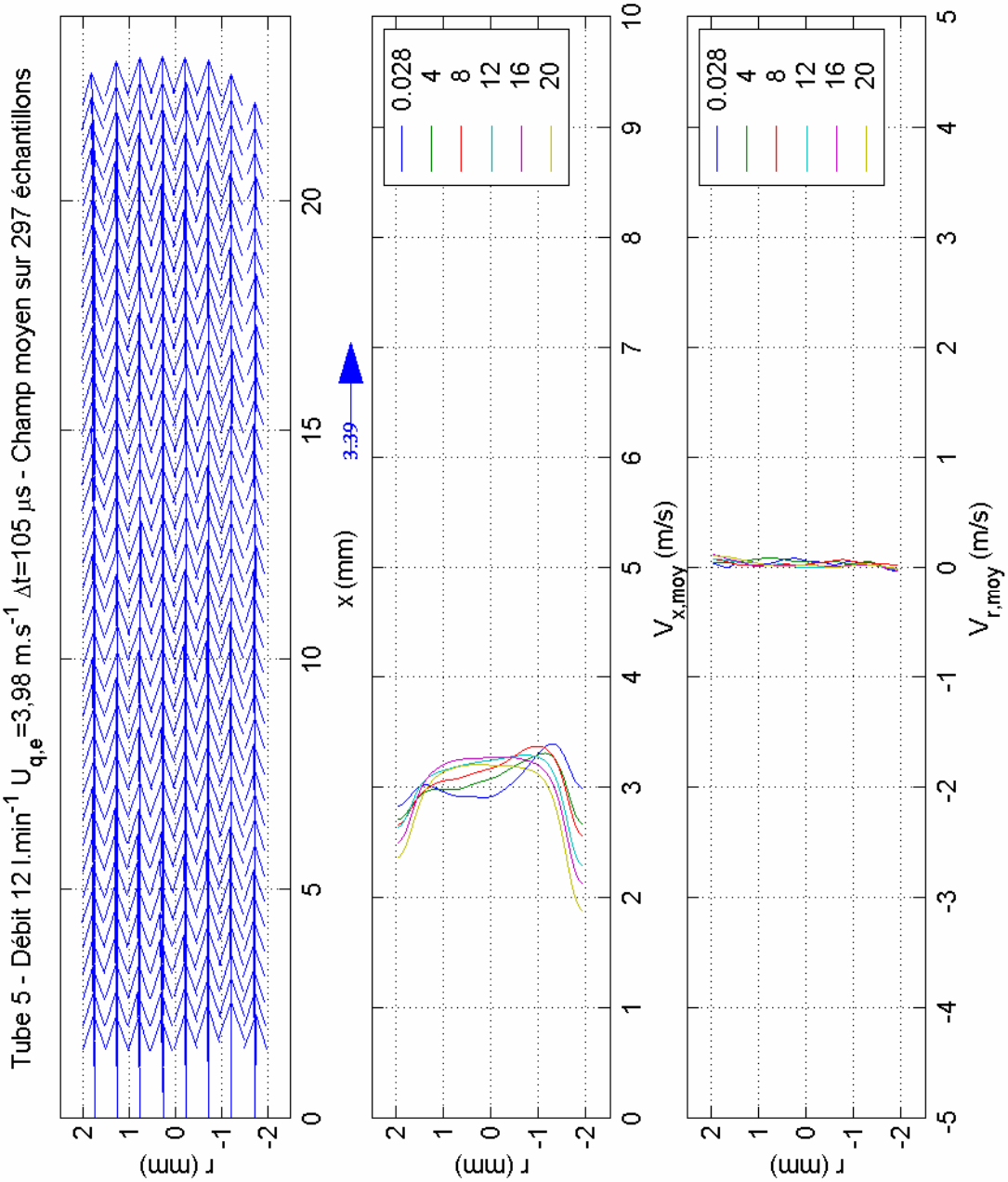

Figure 27 : Champ de vitesse moyen dans le tube 5 pour le débit d'entrée 12 l.min^{-1}.

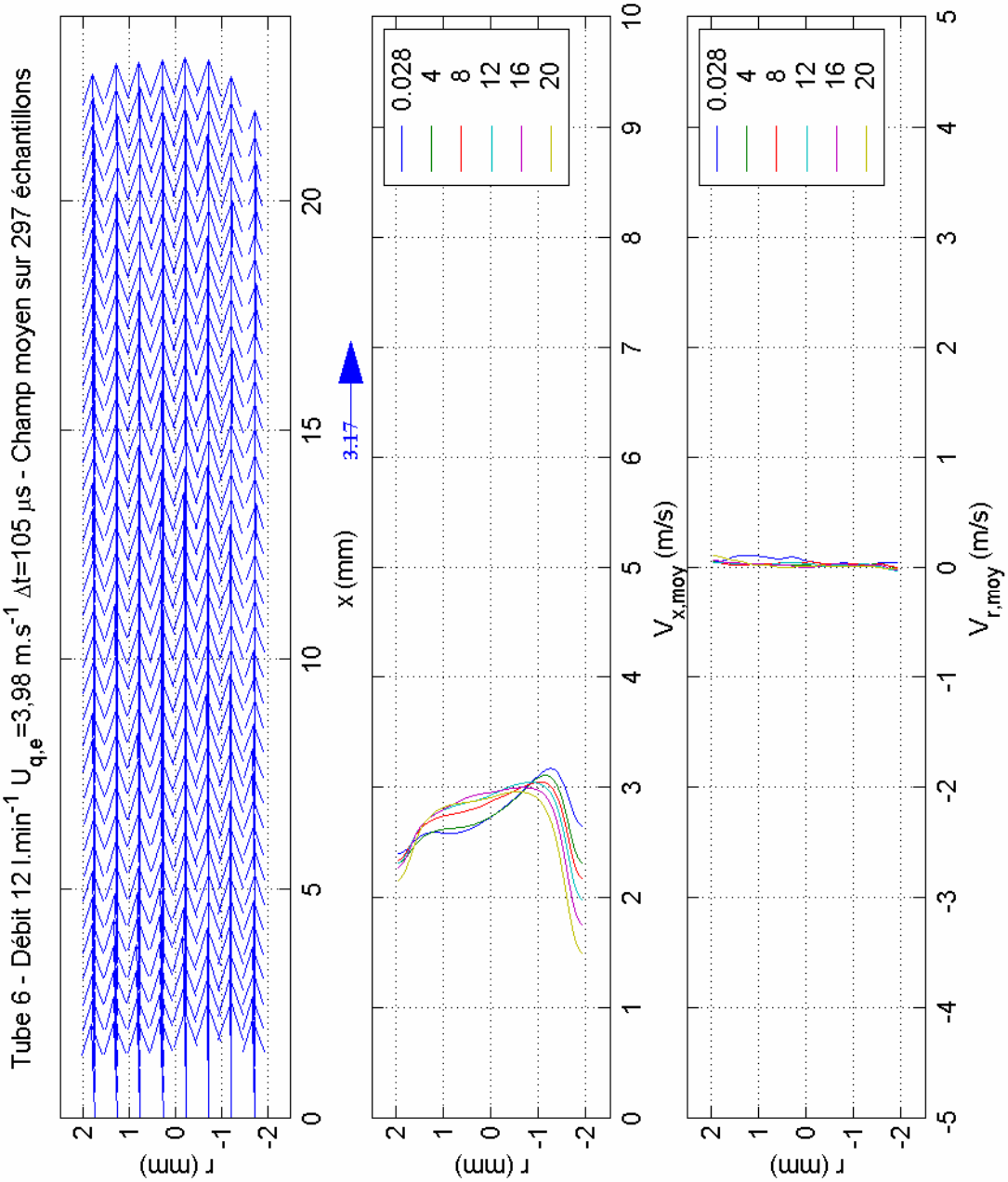

Figure 28 : Champ de vitesse moyen dans le tube 6 pour le débit d'entrée 12 l.min^{-1}.

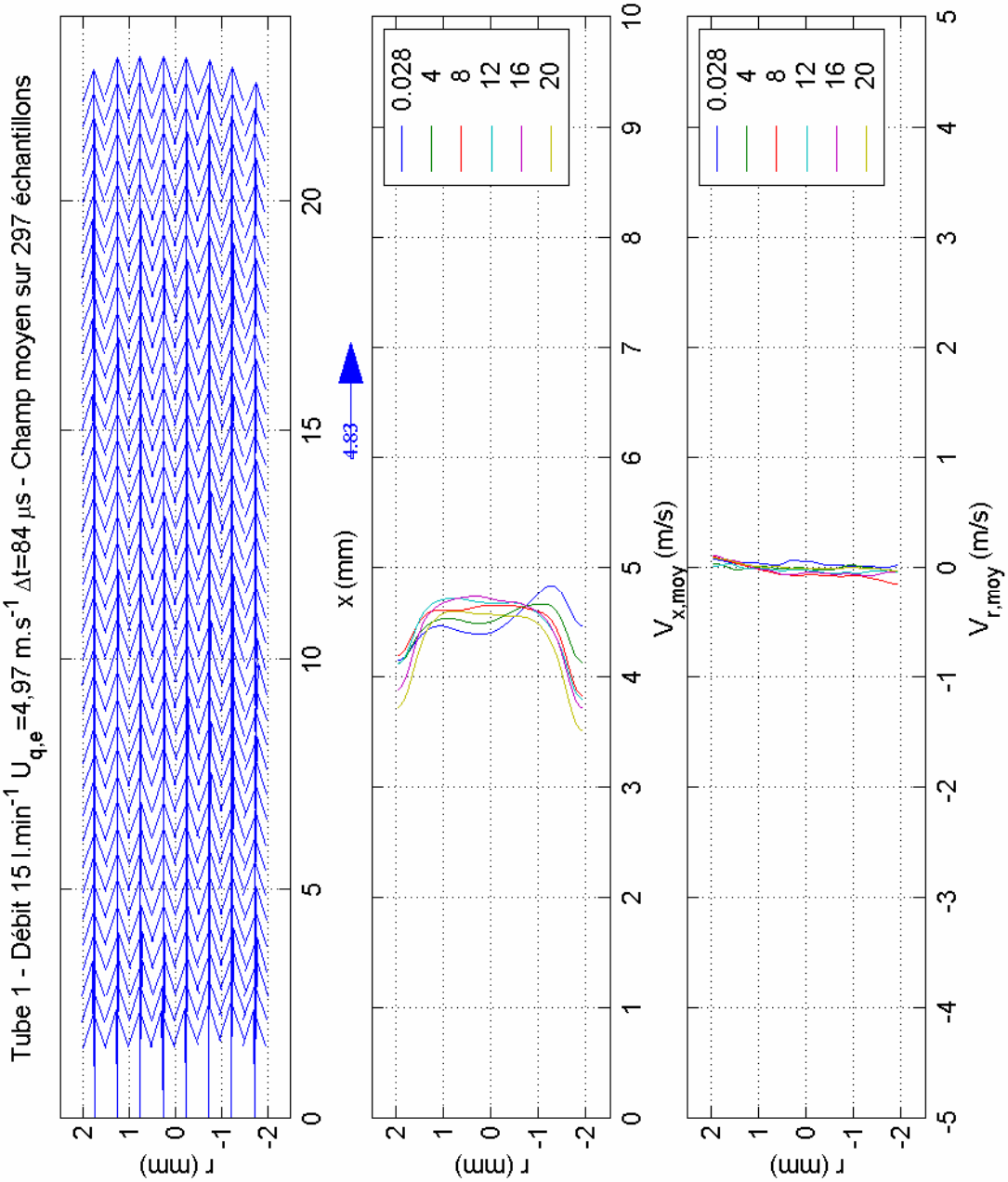

Figure 29 : Champ de vitesse moyen dans le tube 1 pour le débit d'entrée 15 l.min^{-1}.

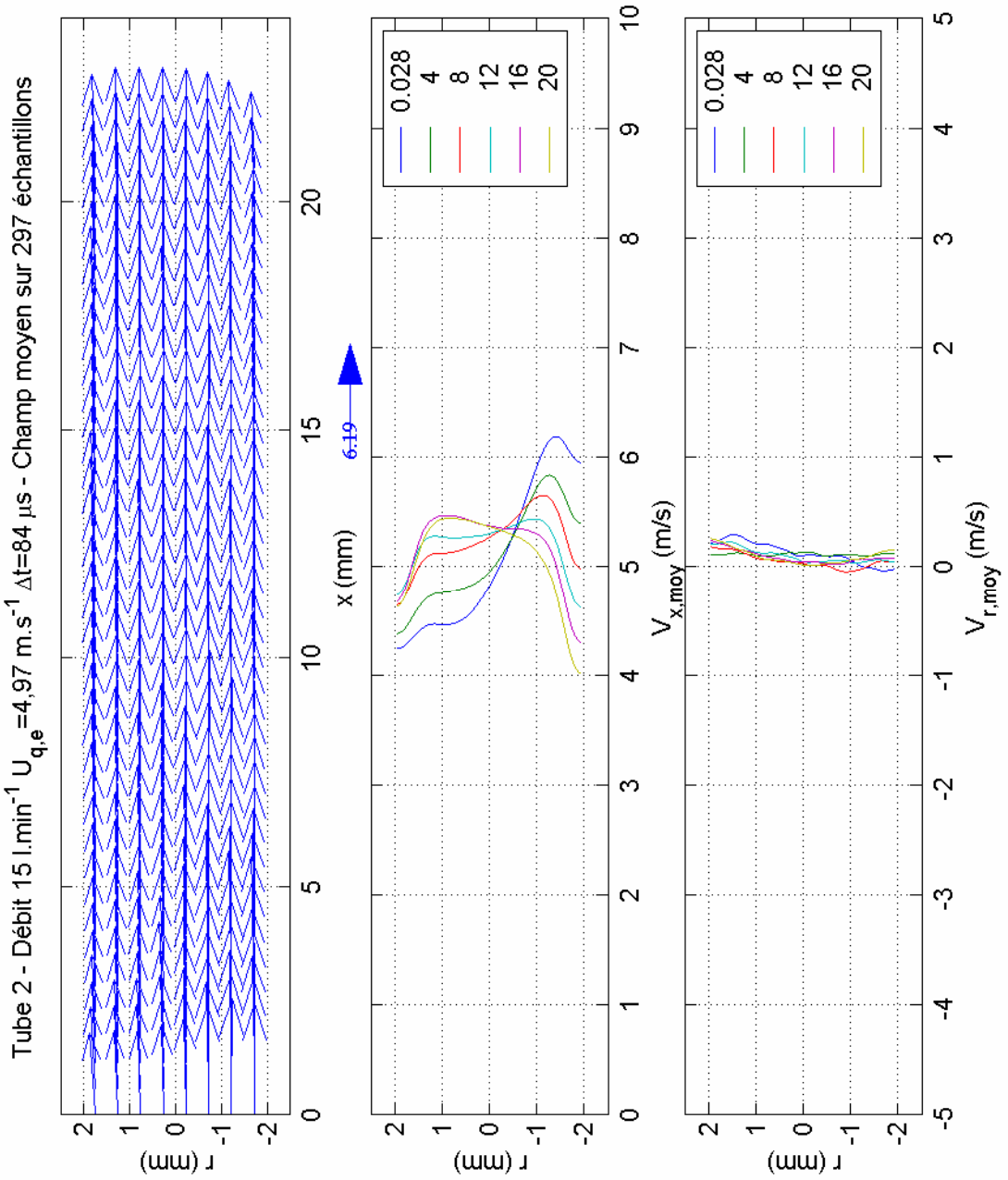

Figure 30 : Champ de vitesse moyen dans le tube 2 pour le débit d'entrée 15 l.min^{-1}.

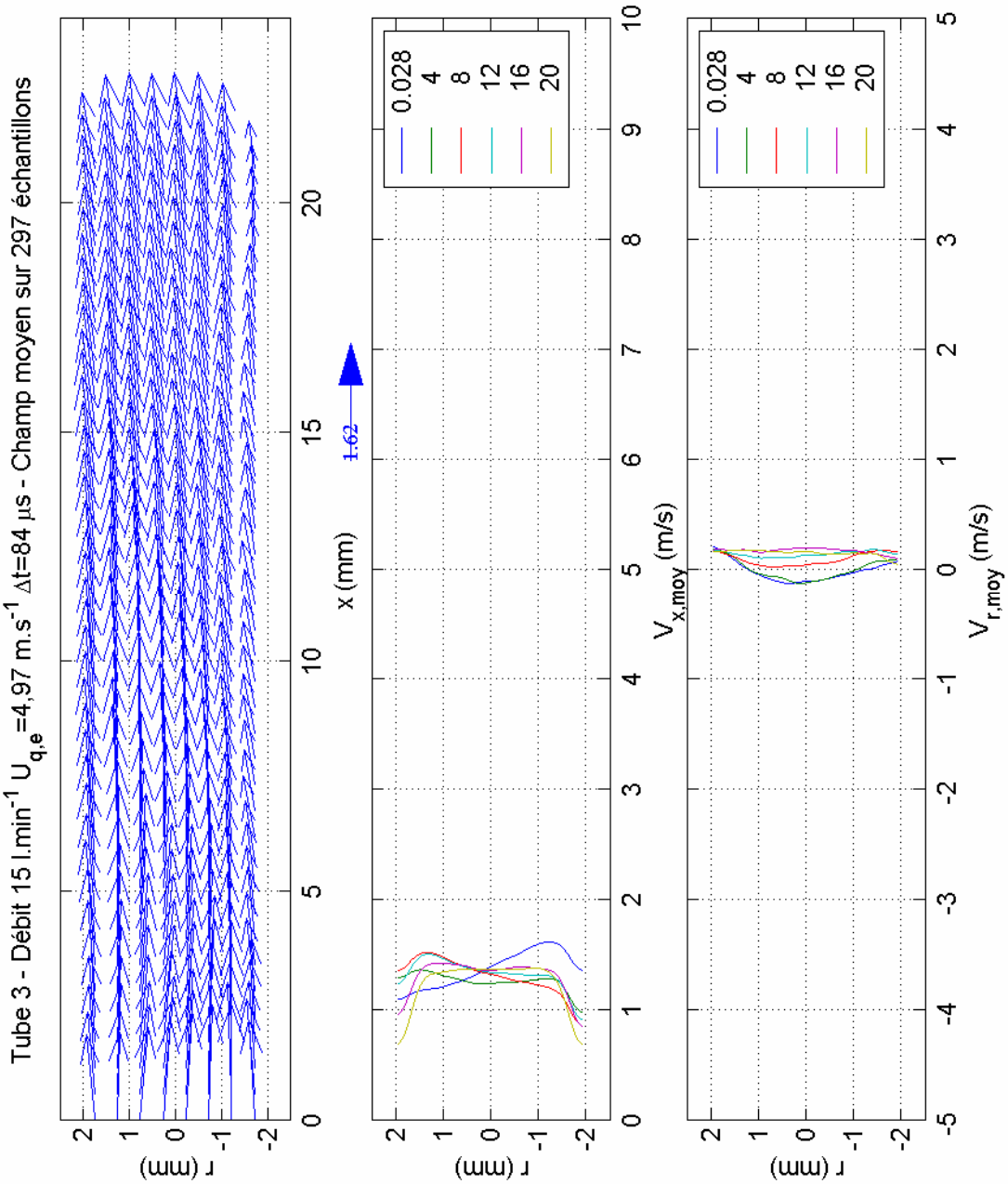

Figure 31 : Champ de vitesse moyen dans le tube 3 pour le débit d'entrée 15 l.min^{-1}.

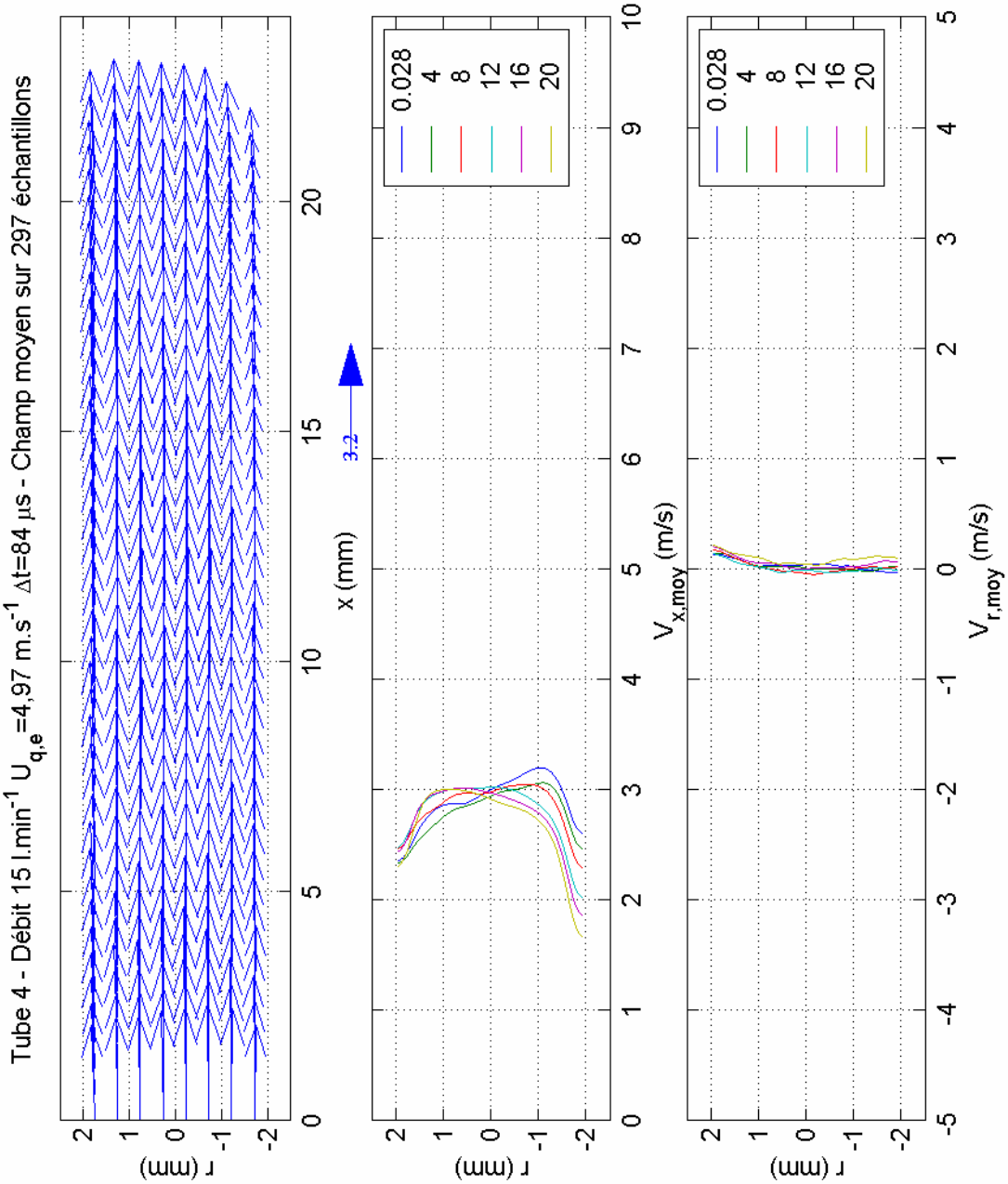

Figure 32 : Champ de vitesse moyen dans le tube 4 pour le débit d'entrée 15 l.min^{-1}.

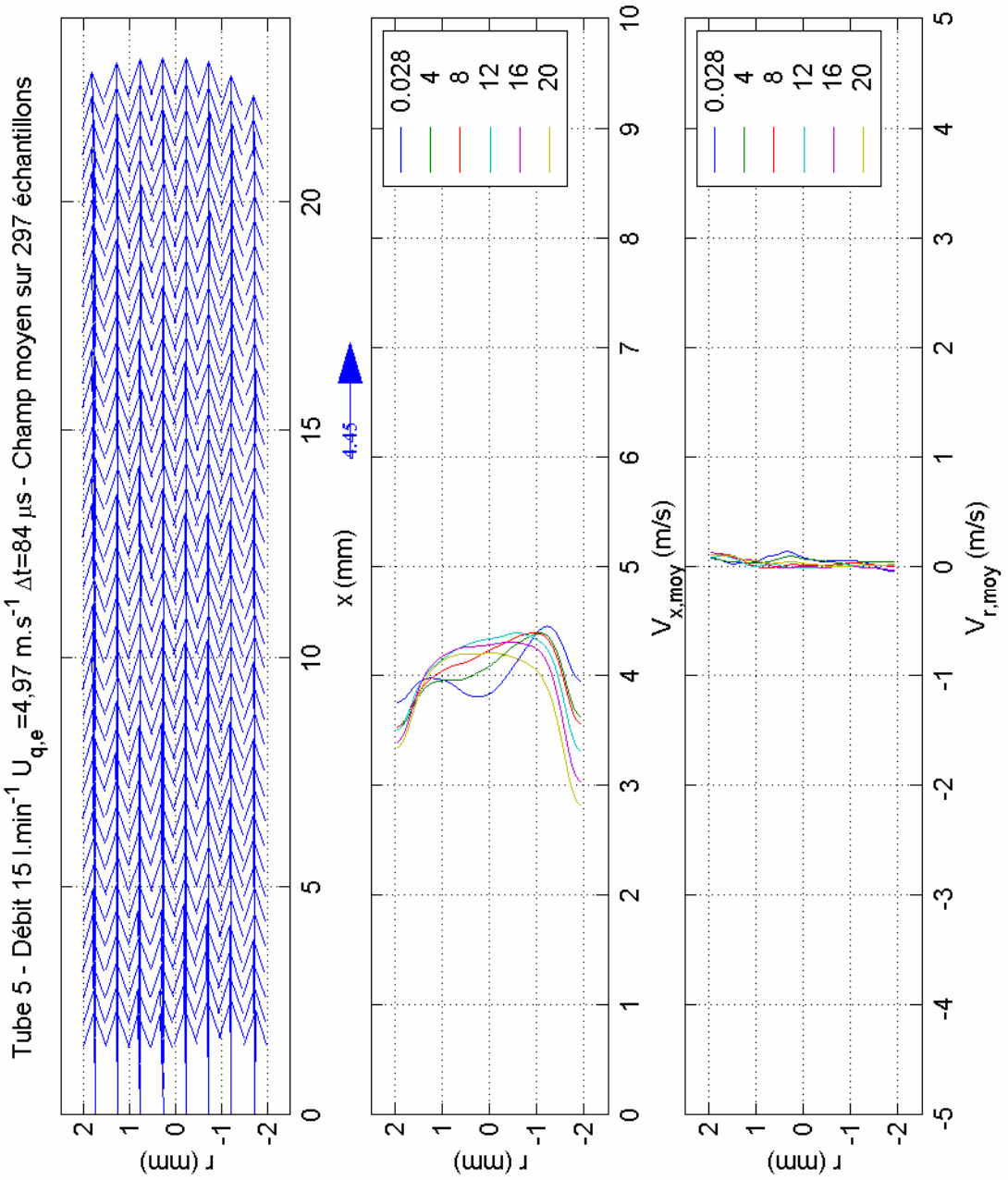

Figure 33 : Champ de vitesse moyen dans le tube 5 pour le débit d'entrée 15 l.min^{-1}.

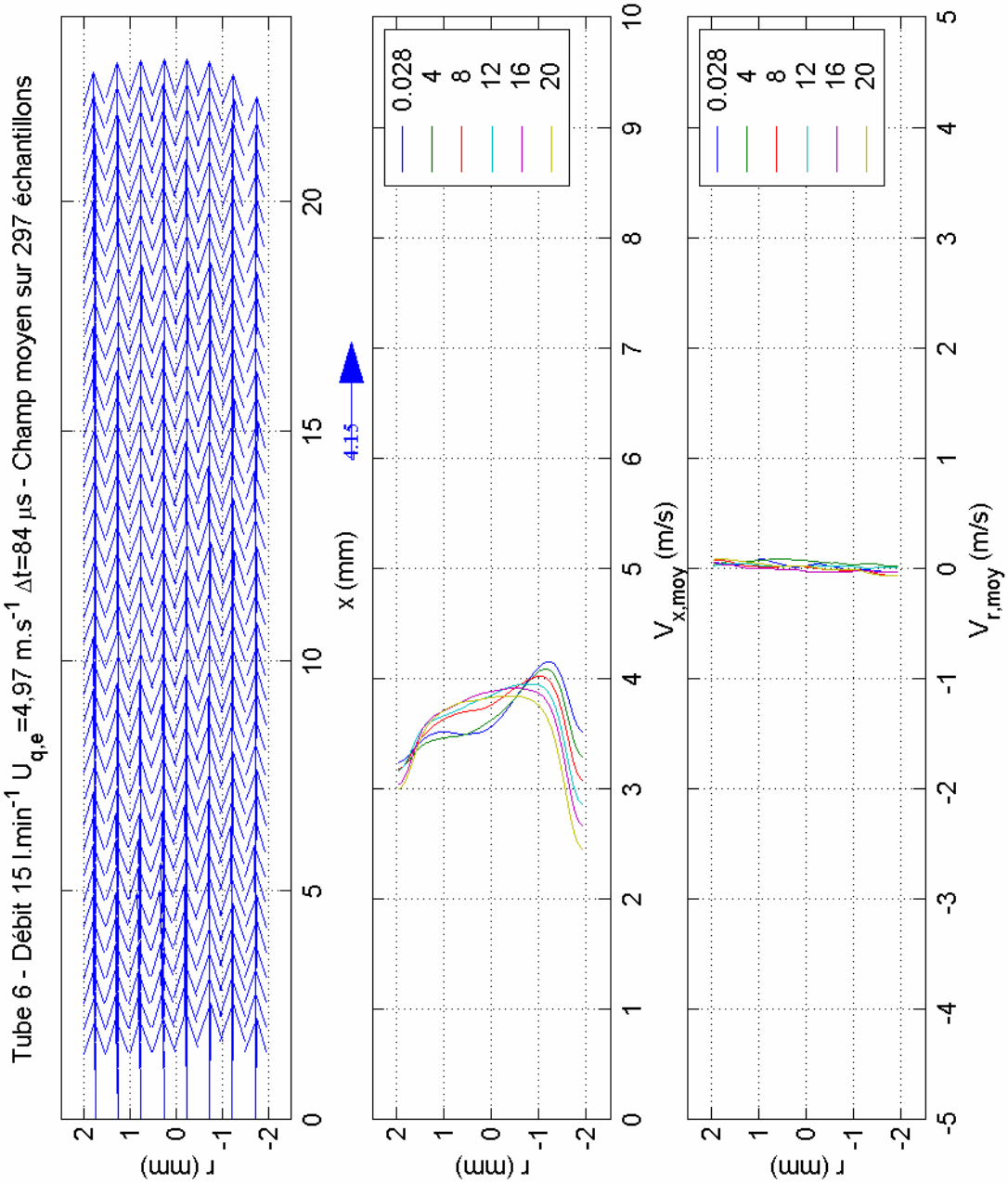

Figure 34 : Champ de vitesse moyen dans le tube 6 pour le débit d'entrée 15 l.min^{-1}.

II-2 Vitesses débitantes mesurées dans chaque tube

Les champs moyens de vitesse présentés au paragraphe précédent sont issus de la moyenne de 297 champs instantanés. La vitesse débitante mesurée pour un débit d'entrée donné et un tube donné est obtenue en effectuant une moyenne axiale de ces évolutions (figure 35).

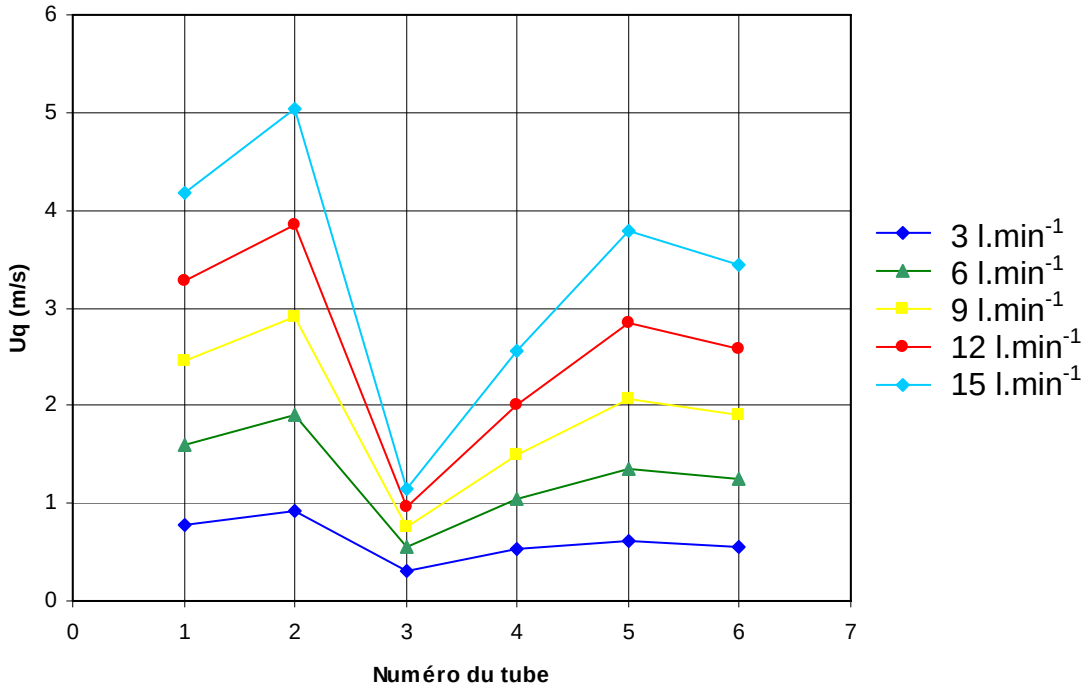

Figure 35 : Évolution de la vitesse débitante mesurée dans chacun des tubes pour des débits d'entrée compris entre 3 l.min^{-1} et 15 l.min^{-1}.

De fortes différences sont observées entre les vitesses débitantes à travers les différents tubes, pouvant varier d'un facteur 1 (tube 3) à 5 (tube 2). On observe ainsi que le tube 2, situé en face du canal d'entrée, est toujours celui qui présente le débit maximum, suivi par le tube 5, situé en face du canal de sortie. Par ailleurs, la distribution relative des vitesses débitantes entre les différentes conduites n'est pas affectée par la valeur du débit d'entrée.

La conservation du débit permet de vérifier la cohérence des vitesses débitantes mesurées :

$$\int_{\text{entrée}} U\,dS = \int_{\text{tubes}} U\,dS$$

d'où, pour des vitesses débitantes $U_{q,t,i}$ effectivement différentes dans chaque tube :

$$U_{q,e}S_e = \left(U_{q,t,1} + U_{q,t,2} + U_{q,t,3} + U_{q,t,4} + U_{q,t,5} + U_{q,t,6}\right)S_t$$

Le tableau 3 présente la comparaison entre la vitesse débitante d'entrée mesurée au rotamètre, qui est le paramètre de réglage du débit, et la vitesse débitante d'entrée obtenue par moyenne des mesures PIV. On constate que les deux déterminations sont cohérentes, aux incertitudes de mesure près.

débit ($l.min^{-1}$)	$U_{q,e}$ ($m.s^{-1}$) rotamétre	$U_{q,e}$ ($m.s^{-1}$) mesures PIV
3	0,995 ± 0,083	0,924 ± 0,002
6	1,99 ± 0,083	1,93 ± 0,004
9	2,98 ± 0,083	2,90 ± 0,006
12	3,98 ± 0,166	3,89 ± 0,008
15	4,97 ± 0,166	5,05 ± 0,010

Tableau 3 : Comparaison entre les débits d'entrée mesurés au rotamétre et déduits des mesures PIV.

Conclusion

À la suite des essais préliminaires réalisés sur un écoulement établi en conduite, les essais sur la maquette complète de l'échangeur de chaleur ont été réalisés à l'intérieur de chacun des six tubes. Les mesures montrent que l'écoulement n'est établi dans aucune des conduites et que de fortes disparités de débit sont présentes entre les différents tubes. Par ailleurs, quel que soit le débit d'entrée dans la gamme de mesure explorée, la même distribution de débit est observée entre les tubes.

Références

FAURE, Th. (2004) *Caractérisation par PIV de l'écoulement dans un échangeur thermique, mesures de pression et mesures PIV sur un tube isolé*, Rapport d'essais phases 1 et 2, Collaboration Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur - Institut de Physique Nucléaire d'Orsay.

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) Particle Image Velocimetry with Optical Flow, *Experiments in Fluids*, 25 : 177-189.

Annexe : feuilles d'expérience

date		:	08/03/04
débit	($l.min^{-1}$)	:	3
$U_{q,e}$	($m.s^{-1}$)	:	0,995
$U_{q,t}$	($m.s^{-1}$)	:	0,663
Δt	(µs)	:	422
p	(mm Hg)	:	759
T_{air}	(°C)	:	22

n° tube	position (mm)	nombre d'images	nom du fichier	T_{eau} (°C)	1e paire d'images	découpage des images
1	-16,5	600	D3_0T422_1_	20,9	0-1	(4,140) ⇒ (763-296)
2	-39,5	600	D3_0T422_2_	21,0	0-1	(4,140) ⇒ (763-296)
3	-62,5	600	D3_0T422_3_	21,2	1-2	(4,140) ⇒ (763-296)
4	-85,5	600	D3_0T422_4_	21,3	1-2	(4,140) ⇒ (763-296)
5	-108,5	600	D3_0T422_5_	21,7	1-2	(4,140) ⇒ (763-296)
6	-131,5	600	D3_0T422_6_	21,5	0-1	(4,140) ⇒ (763-296)

date		:	14/01/04
débit	($l.min^{-1}$)	:	6
$U_{q,e}$	($m.s^{-1}$)	:	1,99
$U_{q,t}$	($m.s^{-1}$)	:	1,33
Δt	(µs)	:	210
p	(mm Hg)	:	742
T_{air}	(°C)	:	23,5

n° tube	position (mm)	nombre d'images	nom du fichier	T_{eau} (°C)	1e paire d'images	découpage des images
1	-16,5	600	D6_0T210_1_	25	1-2	(4,140) ⇒ (763-296)
2	-39,5	600	D6_0T210_2_	25	0-1	(4,140) ⇒ (763-296)
3	-62,5	600	D6_0T210_3_	25	1-2	(4,140) ⇒ (763-296)
4	-85,5	600	D6_0T210_4_	25	1-2	(4,140) ⇒ (763-296)
5	-108,5	600	D6_0T210_5_	25	0-1	(4,140) ⇒ (763-296)
6	-131,5	600	D6_0T210_6_	25	1-2	(4,140) ⇒ (763-296)

date		:	18/03/04
débit	($l.min^{-1}$)	:	9
$U_{q,e}$	($m.s^{-1}$)	:	2,98
$U_{q,t}$	($m.s^{-1}$)	:	1,99
Δt	(µs)	:	140
p	(mm Hg)	:	756
T_{air}	(°C)	:	25

N° tube	position (mm)	nombre d'images	nom du fichier	T_{eau} (°C)	1e paire d'images	découpage des images
1	-16,5	600	D9_0T140_1_	24,1	0-1	(4,140) ⇒ (763-296)
2	-39,5	600	D9_0T140_2_	24,2	1-2	(4,140) ⇒ (763-296)
3	-62,5	600	D9_0T140_3_	24,3	0-1	(4,140) ⇒ (763-296)
4	-85,5	600	D9_0T140_4_	24,5	1-2	(4,140) ⇒ (763-296)
5	-108,5	600	D9_0T140_5_	24,6	0-1	(4,140) ⇒ (763-296)
6	-131,5	600	D9_0T140_6_	24,7	0-1	(4,140) ⇒ (763-296)

date		:	27/01/04
débit	($l.min^{-1}$)	:	12
$U_{q,e}$	($m.s^{-1}$)	:	3,98
$U_{q,t}$	($m.s^{-1}$)	:	2,65
Δt	(µs)	:	105
p	(mm Hg)	:	742
T_{air}	(°C)	:	22,5

N° tube	position (mm)	nombre d'images	nom du fichier	T_{eau} (°C)	1e paire d'images	découpage des images
1	-16,5	600	D12_0T210_1_	22,3	0-1	(4,140) ⇒ (763-296)
2	-39,5	600	D12_0T210_2_	22,5	1-2	(4,140) ⇒ (763-296)
3	-62,5	600	D12_0T210_3_	22,7	0-1	(4,140) ⇒ (763-296)
4	-85,5	600	D12_0T210_4_	23,0	0-1	(4,140) ⇒ (763-296)
5	-108,5	600	D12_0T210_5_	23,2	0-1	(4,140) ⇒ (763-296)
6	-131,5	600	D12_0T210_6_	23,4	0-1	(4,140) ⇒ (763-296)

date		:	02/02/04
débit	($l.min^{-1}$)	:	15
$U_{q,e}$	($m.s^{-1}$)	:	4,97
$U_{q,t}$	($m.s^{-1}$)	:	3,32
Δt	(μs)	:	84
p	(mm Hg)	:	757
T_{air}	(°C)	:	24,5

N° tube	position (mm)	nombre d'images	nom du fichier	T_{eau} (°C)	1e paire d'images	découpage des images
1	-16,5	600	D15_0T84_1_	23,7	0-1	(4,140) ⇒ (763-296)
2	-39,5	600	D15_0T84_2_	23,9	1-2	(4,140) ⇒ (763-296)
3	-62,5	600	D15_0T84_3_	24,1	0-1	(4,140) ⇒ (763-296)
4	-85,5	600	D15_0T84_4_	24,2	0-1	(4,140) ⇒ (763-296)
5	-108,5	600	D15_0T84_5_	24,4	0-1	(4,140) ⇒ (763-296)
6	-131,5	600	D15_0T84_6_	24,7	0-1	(4,140) ⇒ (763-296)