



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
Ecole nationale polytechnique d'Alger
Département hydraulique

Projet de Fin d'Etude pour l'Obtention du Diplôme d'Ingénieur d'Etat en Hydraulique

Présenté par

NASRI Ahmed Amin

Sujet

Simulation numérique 3D d'un rejet de polluant dans un réseau d'assainissement

Promotion : Septembre 2013

Dirigé par :

- Dr. Emmanuel Mignot (INSA)
- Pr. Nicolas Riviere (INSA)
- Pr. Abdelmalek Bermad (ENP)
- Mr. Benziada Salim (ENP)

Remerciements

Je me demande comment ces brèves lignes suffiront pour témoigner toute ma gratitude. Avant tout, ce travail n'est pas le résultat d'une seule personne mais la collaboration, le partage et le soutien de toute une communauté.

Je tiens à présenter mes reconnaissances et mes remerciements à Mer. Nicolas Rivière et Mer. Emmanuel Mignot pour m'avoir encadré durant ce projet et pour le temps consacré aux discussions qui ont permis d'orienter mon travail de manière pertinente.

Je remercie particulièrement Mer. Emmanuel Mignot pour sa disponibilité, sa patience et l'aide qu'il m'a apporté tout au long de ce projet.

Je remercie tout le personnel du Laboratoire de Mécanique des Fluides et d'Acoustique pour m'avoir accueilli et pour m'avoir permis de réaliser ce travail dans des bonnes conditions.

Enfin, cordialement, je remercie l'ensemble de mes professeurs du département hydraulique à l'école nationale polytechnique : Mer A. BERMAD, chef du département hydraulique, Mer NEBBACH, Mer BENZIADA, Mer A. KETTAB, Mer BENMAMAR, Mer BELHADJ et Mer MESSAHLI, Mer NAKIB, Mer BERKANI.

En espérant que je n'ai oublié personne, mes derniers remerciements s'adresseront tout d'abord aux premiers encadreurs de ma vie : mes parents. Je les remercie de cœur et d'âme de m'avoir inculqué cette éducation et aujourd'hui si j'en suis là ce n'est que grâce à leur dévouement total. Je n'oublierai pas bien sûr mes amis, pour leurs mots encourageants. Sans oublier bien entendu mes frères qui, contrairement aux autres, n'ont tenu aucun mot encourageant mais qui, sans eux, l'équilibre familial serait rompu. Enfin une pensée à mes amis qui se reconnaîtront.

Je remercie vivement leur présence à ma soutenance de thèse tous ceux qui ont fait le déplacement.

Résumé

Dans le cadre de l'étude de la dispersion de la pollution dans un réseau d'assainissement, et à partir des résultats expérimentaux qui ont été faits dans ce domaine, ce projet a pour but la validation de la modélisation au niveau de la jonction afin qu'on puisse l'appliquer sur le réseau de la région de Saint-Priest.

Mots clés : Dispersion, modélisation, jonction, réseau.

المخلص

في إطار الدراسة الخاصة بانتشار المواد الملوثة في قنوات الصرف الصحي، و من خلال التجارب المقامة في هذا المجال، فإن الهدف من هذا المشروع هو تثبيت البرمجة المقامة على تقاطع بسيط مما يسمح بتطبيقه فيما بعد على شبكة تصريف المياه المستعملة الخاصة بمنطقة سانت-بريست.

الكلمات المفتاح : انتشار، البرمجة، تقاطع، شبكة.

Summary

As part of the study of the pollution dispersion in a sewer system, and from the experimental results that have been made in this area, this project aims to validate the modeling at the junction to apply it on the network in the region of Saint-Priest.

Key words: Dispersion, modeling, junction, network.

Sommaire

Introduction Générale	10
Cadre général	
Objectif de projet	
Chapitre 01 :Modélisation mathématique des écoulements dans un réseau urbain	13
Introduction	
1. Equations hydrodynamiques du mouvement	
1.1. Les équations de Navier - Stokes	
1.1.1. Equation de continuité	
1.1.2.L'équation de la conservation de la quantité de mouvement	14
2. Les équations du mouvement moyen	15
2.1. Le phénomène de la turbulence	
2.1.1. Définition de la turbulence	
2.1.2. Les approches de la turbulence	16
2.1.3. Moyenne d'ensemble	
2.2. Equation de continuité dans le mouvement moyen	17
2.3. Equation de la quantité de mouvement pour l'écoulement moyen	18
3. Les modèles de turbulence	19
3.1. Les modèles à viscosité turbulente (Chassaing, 2000)	20
3.2. Les modèles aux tensions de Reynolds	21
3. La sous-couche visqueuse	22
Chapitre 2 :Partie expérimentale(Etude de jonction)	26
Introduction	
1. Description de l'écoulement	
1.1. Schéma et données expérimentales	
2. Modélisation sur STAR-CCM+	29
2.1. Modèle utilisé	
2.2. Conditions aux limites	31
2.3. Le nombre de Schmidt	
3. Hydrodynamique de l'écoulement	
3.1. Concentration en scalaire passif dans la jonction	33
3.1.1. Modélisation numérique de la répartition en scalaire passif	

3.1.2. Interprétation des résultats	36
3.2. Influence de débit	39
4. Influence de la géométrie et de la pente	50
4.1. La géométrie	
4.2. Modélisation sur StarCCM+	51
4.3. La pente	58
Conclusion	60
Chapitre 3 :Partie réseau	62
Introduction	
1. Récupération des données	
1.1.Récupération de la carte de la zone d'étude	
1.2.Positionner les différentes entrées et les longueurs des conduites	63
1.3.Estimation de nombre de maison dans chaque entrée	
1.4. Estimation de débit à chaque entrée	64
2. Hypothèses et simplifications	65
2.1. Simplification des profils	
2.2. Rigid-lid	
3.Génération de maillage	66
4.Methodologie	73
5.Analyse des résultats de la simulation	75
5.1. Analyse de surface	76
5.2. Analyse en aval	79
Conclusion	84
Bibliographie	85

Liste des figures

Figure 1.1 Evolution du champ de vitesse proche de la paroi - Echelle logarithmique.	24
Figure 2.1 : Schéma de l'écoulement	26
Figure 2.2 : Visualisation de l'écoulement avec du colorant à la place de la soude	27
Figure 2.3 Concentration de la soude en jonction - Résultats expérimentaux	28
Figure 2.4 : Vues générales de maillage utilisé	30
Figure 2.5 : Wall (paroi) Y^+ au fond de la structure	31
Figure 2.6 : Comparaison du champs de vitesse à la jonction : $X=[0\text{mm}-30\text{mm}]$, $Y=[0\text{mm}-30\text{mm}]$ aux hauteurs $Z=30\text{mm}$, $Z=50\text{mm}$, $Z=70\text{mm}$, $Z=90\text{mm}$	32
Figure 2.7 : Vitesse longitudinale en $X/b=2$	33
Figure 2.8 : Comparaison de modèle RSM avec les résultats expérimentaux $Z = 3\text{cm}$ - $Sct=0.7$	33
Figure 2.9 : Comparaison de modèle RSM avec les résultats expérimentaux $Z = 5\text{cm}$, $Sct =0.7$	34
Figure 2.10 : Comparaison de modèle RSM avec les résultats expérimentaux $Z=7\text{ cm}$, $Sct =0.7$	34
Figure 2.11 : Comparaison de modèle RSM avec les résultats expérimentaux $Z = 9\text{cm}$ et $Sct = 0.7$	35
Figure 2.12 : Concentration de la soude en jonction - Résultats numériques,modèle RSM	35
Figure 2.13 : Champ de vitesse et concentration en scalaire passif - plan (YZ), $X/b=0.0$	37
Figure 2.14 : Champ de vitesse et concentration en scalaire passif - plan (YZ), $X/b= 1.0$	37
Figure 2.15 Champ de vitesse et concentration en scalaire passif - plan (YZ), $X/b= 1,5$	38
Figure 2.16 : Champ de vitesse et concentration en scalaire passif - plan (YZ), $X/b= 2,0$	38
Figure 2.17 : Champ de vitesse et concentration en scalaire passif - plan (YZ), $X/b= 3,0$	39
Figure 2.18 : Champ de vitesse et concentration en scalaire passif - plan (YZ), $X/b= 0,0$	40
Figure 2.19 : Champ de vitesse et concentration en scalaire passif - plan (YZ), $X/b=1,0$	40
Figure 2.20 : Champ de vitesse et concentration en scalaire passif - plan (YZ), $X/b= 1,5$	41
Figure 2.21 : Champ de vitesse et concentration en scalaire passif - plan (YZ), $X/b=2,0$	41
Figure 2.22 : Champ de vitesse et concentration en scalaire passif - plan (YZ), $X/b= 3,0$	42

Figure 2.23 : Champ de vitesse - plan (XY), Z = 1cm	43
Figure 2.24 : Champ de vitesse - plan (XY), Z = 3cm	43
Figure 2.25 : Champ de vitesse - plan (XY), Z = 5cm	44
Figure 2.26 : Champ de vitesse - plan (XY), Z = 7cm	44
Figure 2.27 : Champ de vitesse - plan (XY), Z = 9cm	44
Figure 2.28 : Champ de vitesse et concentration en scalaire passif - plan (YZ),X/b= 0,0	45
Figure 2.29 : Champ de vitesse et concentration en scalaire passif - plan (YZ),X/b= 1,0	45
Figure 2.30 : Champ de vitesse et concentration en scalaire passif - plan (YZ),X/b= 1,5	46
Figure 2.31 : Champ de vitesse et concentration en scalaire passif - plan (YZ),X/b= 2,0	47
Figure 3.32 : Champ de vitesse et concentration en scalaire passif - plan (YZ),X/b= 3,0	48
Figure 2.33 : Champ de vitesse - plan (XY), Z = 3cm	48
Figure 2.34 : Champ de vitesse - plan (XY), Z = 5cm	49
Figure 2.35 : Champ de vitesse - plan (XY), Z = 7cm	49
Figure 2.36 : Champ de vitesse - plan (XY), Z = 9cm	49
Figure 2.37 : Le maillage au niveau de la jonction	51
Figure 3.38 : Concentration de la soude en jonction - Résultats numériques, modèle RSM	52
Figure 2.39 : Concentration de la soude en jonction - Résultats numériques, modèle K-ε	53
Figure 2.40 : Comparaison de modèle RSM _p /RSM _g /ExpZ _p =3 cm - Sct=0,7	54
Figure 2.41 : Comparaison de modèle RSM _p /RSM _g /ExpZ _p = 5 cm -Sct = 0,7	55
Figure 2.42 : Comparaison de modèle RSM _p /RSM _g /ExpZ _p =7 cm - Sct=0,7	55
Figure 2.43 : Comparaison de modèle RSM _p /RSM _g /ExpZ _p =9 cm -Sct = 0,7	56
Figure 2.44 : Comparaison de modèle RSM _p /K-ε _g /ExpZ _p = 3cm -Sct = 0,7	56
Figure 2.45 : Comparaison des modèlesRSM _p /K-ε _g /ExpZ _p = 5cm -Sct = 0,75	
Figure 2.46 : Comparaison des modèlesRSM _p /K-ε _g /ExpZ _p = 7cm -Sct = 0,7	57
Figure 2.47 : Comparaison des modèlesRSM _p /K-ε _g /ExpZ _p = 9cm -Sct = 0,7	58

Figure 2.48 : La hauteur d'eau en fonction de la distance dans le deuxième canal	59
Figure 2.49 : La hauteur d'eau en fonction de la distance dans le premier canal	60
Figure 3.1 : La carte de la zone d'étude	63
Figure 3.2 : Les différentes entrées et le nombre de maison correspondant	64
Figure 3.3 : Simplification de profil	65
Figure 3.4 : Génération de la géométrie	66
Figure3-5 : Injection de la pollution en régime transitoire	67
Figure3-6 : Les endroits ou les images ont été prises	74
Figure 3-7 : Advection de la pollution	75
Figure 3-8 : Concentration du polluant en fonction du temps pour (Sct = 0,2/ Sct = 0,9/ Sct = 2.0)	75
Figure 3-9 : Diffusion turbulente dans un tronçon pour les différents Sct	76
Figure 3.10 : Débit de pollution (mg/s) en fonction du temps pour des différents Sct	78
Figure 3.11 : Débit de polluant en fonction du temps pour les différentes entrées	80
Figure 3-12 : Maximum de débit en fonction de distance aval	81
Figure 3-13 : Maximum de débit en fonction de temps d'advection	82

Liste des tableaux

Tableau N° 2-1: Paramètres selon la géométrie	50
Tableau N° 2-2 : Caractéristiques de l'écoulement	58
Tableau N° 3-1 : les débits Q9 et Q12 les pentes et les différents diamètres	67
Tableau N° 3-2 : Passage à l'ovoïde	69
Tableau N° 3-3 : hauteur normale et nombre de Froude dans chaque tronçon	71

Introduction Générale

Cadre général

Ce projet effectué au sein du Laboratoire de Mécanique des fluides et d'acoustique (LMFA), consiste à étudier numériquement la propagation d'une nappe de polluant dans une canalisation urbaine. Cette étude s'inscrit dans un projet plus vaste, initié par la ville de Lyon, avec pour objectif une meilleure compréhension des habitudes et connaissances des usagers des systèmes de distribution et de traitement de l'eau. Ce projet regroupe différentes activités et implique des professionnels de différentes disciplines :

- Des représentants de la ville de Lyon, initiateurs du projet.
- Des économistes réalisent des sondages pour mieux appréhender les habitudes des gens et leur connaissance des normes en vigueur.
- Des chercheurs en mécanique des fluides pour comprendre les écoulements en canalisation urbaine et évaluer les possibilités d'effectuer des mesures en canalisation qui pourraient permettre de compléter et d'être corrélées aux sondages effectués en amont.

A terme, les différentes études doivent permettre d'avoir une meilleure connaissance de ce qui se passe dans les canalisations urbaines et d'être plus efficace dans la sensibilisation des gens aux normes de rejet dans le réseau de distribution urbain.

Objectif de projet

La modélisation numérique en mécanique des fluides (CFD) permet d'étudier efficacement les caractéristiques de différents écoulements et constitue donc un outil incontournable pour développer une compréhension approfondie des écoulements en canalisation urbaine (pouvant être assimilée à un canal à surface libre).

Cependant, un nombre très important de paramètres joue sur les résultats obtenus : modèle de turbulence utilisé, taille du maillage, conditions aux limites utilisées... et une étude approfondie de ces différents paramètres est nécessaire pour obtenir une modélisation numérique solide.

Dans le cadre d'une modélisation d'un réseau de canalisation urbain, la taille caractéristique du système à modéliser, de l'ordre du kilomètre, ne permet pas l'utilisation d'un maillage fin sous peine de faire exploser les temps de calcul. L'objectif n'est donc pas de modéliser chaque petit tourbillon mais d'obtenir une solution globale qui rend compte de l'écoulement général avec des temps de calculs acceptables.

L'objet de notre projet est donc tout d'abord de reproduire la modélisation expérimentale effectuée par W. Cai [1,2012] à l'aide d'un modèle numérique et de vérifier une concordance

des résultats. Puis, nous étudierons l'influence d'un agrandissement du maillage sur le résultat des calculs numériques et déterminerons s'il est possible d'effectuer une modélisation d'un système de l'ordre du kilomètre avec des temps de calcul acceptables et un bon rendu des caractéristiques principales de l'écoulement. Une importance particulière sera accordée au choix d'un modèle de turbulence et de conditions aux limites adéquats.

Dans un premier temps, nous considérerons un écoulement en jonction à trois branches, avec une arrivée d'eau pure et une arrivée d'eau polluée, correspondant au second dispositif expérimental mis en œuvre par W.Cai[1,2012]. Le comportement hydrodynamique et le mélange du polluant à la jonction et en aval de la jonction seront étudiés pour des conditions numériques similaires aux conditions expérimentales.

En deuxième temps on a passé à l'étude de réseau d'assainissement de la région de Saint-Priest en prenant en considération que ce dernier est séparatif en suivant toute une méthodologie et notre problématique était est ce que la trace de polluant en aval permet de localiser le pollueur en amont ?

Chapitre 01

**Modélisation mathématique des
écoulements dans un réseau
urbain**

Modélisation mathématique des écoulements dans un réseau urbain

Introduction

Les équations de Navier Stokes gouvernent la plupart des écoulements des fluides Newtoniens. Mais depuis leurs établissements ces équations ne sont pas encore totalement maîtrisées car leurs résolutions demeurent un problème sans solution analytique.

Le phénomène de la turbulence est la principale difficulté dans la résolution de ces équations. Ce phénomène est présent dans la plupart des écoulements rencontrés dans la nature. Entre autre le cas de la dispersion d'un polluant dans un canal à surface libre où la turbulence joue un rôle prépondérant.

Comme la majorité des écoulements dans des cas pratiques, les écoulements considérés dans ce projet sont tous turbulents. Dans cette section, nous rappellerons les bases théoriques de la turbulence et de sa modélisation numérique. Nous expliciterons la mise en forme de l'équation aux contraintes de Reynolds (RANS) et des modèles de turbulence k-ε et Reynolds Stress Model (RSM) qui sont utilisés par la suite.

1. Equations hydrodynamiques du mouvement

1.1. Les équations de Navier - Stokes

Les écoulements des fluides sont finement décrits par les équations de Navier - Stokes donc il est primordial de les développer.

1.1.1. Equation de continuité

$$\frac{d}{dt} \int_{\Omega} \rho d\Omega = 0 \quad (1.1)$$

où, Ω est le volume du domaine d'étude et ρ la masse volumique du fluide considéré.

Soit \vec{U} le vecteur vitesse de composantes (U, V, W).

Le théorème de Leibnitz décompose ce terme en variations observées à l'intérieur du domaine et en flux aux frontières (**Jean Michel, 2003**):

$$\frac{d}{dt} \int_{\Omega} \rho d\Omega = \int_{\Omega} \frac{\partial \rho}{\partial t} d\Omega + \int_{\Gamma} \rho \vec{U} \cdot \vec{n} d\Gamma \quad (1.2)$$

Où, Γ est la surface qui délimite le volume Ω .

En utilisant le théorème de Gauss qui transforme une intégrale surfacique en intégrale volumique, on obtient :

$$\frac{d}{dt} \int_{\Omega} \rho d\Omega = \int_{\Omega} \frac{\partial \rho}{\partial t} d\Omega + \int_{\Omega} \operatorname{div}(\rho \vec{U}) d\Omega \quad (1.3)$$

D'où l'équation de continuité :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \vec{U}) = 0 \quad (1.4)$$

Notre fluide étant incompressible (l'eau), sa masse volumique ρ est constante dans l'espace et dans le temps ; ainsi l'équation de la continuité devient :

$$\operatorname{div}(\vec{U}) = 0$$

Le développement de cette équation suivant un système de coordonnées (x, y, z) nous donne :

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z} = 0 \quad (1.5)$$

1.1.2. L'équation de la conservation de la quantité de mouvement

L'équation fondamentale de la dynamique nous donne :

$$F = \frac{d}{dt} \int_{\Omega} \rho \vec{U} d\Omega \quad (1.6)$$

Les théorèmes de Leibnitz et de Gauss nous donnent (**Jean Michel, 2003**) :

$$F = \int_{\Omega} \frac{\partial(\rho \vec{U})}{\partial t} .d\Omega + \int_{\Omega} \nabla(\rho \vec{U} \otimes \vec{U}) .d\Omega \quad (1.7)$$

La force F est la somme des forces extérieures de volume et de surface qui s'appliquent au fluide.

Les forces de surface sont déterminées à partir du tenseur de contrainte σ .

Notons par f la somme de toutes les forces de volume. Ainsi, on obtient :

$$F = \int_{\Omega} f d\Omega + \int_{\Gamma} \sigma . \vec{n} .d\Gamma$$

Le théorème de Gauss nous permet de transformer une intégrale surfacique en une intégrale de volume, ceci nous conduit à : $F = \int_{\Omega} f d\Omega + \int_{\Omega} \operatorname{div}(\sigma) . d\Omega$

Pour finir, nous obtenons :

$$\frac{\partial(\rho \vec{U})}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{U} \otimes \vec{U}) = \vec{f} + \operatorname{div}(\vec{\sigma}) \quad (1.8)$$

Notre fluide étant un fluide Newtonien incompressible, σ est donné par :

$$\sigma_{ij} = -P\delta_{ij} + 2\mu D_{ij}$$

où, δ_{ij} est le tenseur identité, μ le coefficient de viscosité dynamique, D_{ij} le tenseur des taux de déformation et P la pression exprimée en pascal.

En tenant compte du fait que le fluide est incompressible et en utilisant l'équation de continuité, on aboutit à la forme suivant :

$$\rho\left(\frac{\partial \vec{U}}{\partial t} + \vec{U}\nabla\vec{U}\right) = \text{div}(\vec{\sigma}) + \rho\vec{f}$$

En utilisant une écriture tensorielle et en utilisant l'expression du tenseur de déformation D_{ij}

donné par :

$$D_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i}\right) \quad (1.9)$$

On aboutit à l'équation finale de la quantité de mouvement donnée par ;

$$\rho\left(\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j}\right) = \rho f_i - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_j^2} \quad (1.10)$$

Dans un système de coordonnées cartésiennes, ces équations deviennent :

$$\rho\left(\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} + W \frac{\partial U}{\partial z}\right) = f_x - \frac{\partial P}{\partial x} + \mu\left[\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2}\right] \quad (1.11)$$

$$\rho\left(\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + W \frac{\partial V}{\partial z}\right) = f_y - \frac{\partial P}{\partial y} + \mu\left[\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2}\right] \quad (1.12)$$

$$\rho\left(\frac{\partial W}{\partial t} + U \frac{\partial W}{\partial x} + V \frac{\partial W}{\partial y} + W \frac{\partial W}{\partial z}\right) = f_z - \frac{\partial P}{\partial z} + \mu\left[\frac{\partial^2 W}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial z^2}\right] \quad (1.13)$$

2. Les équations du mouvement moyen

2.1. Le phénomène de la turbulence

La turbulence est un phénomène présent de manière très facilement visible dans la nature ; de ce fait, c'est sous ce régime que se présentent la plupart des écoulements naturels des fluides usuels que sont l'air et l'eau.

2.1.1. Définition de la turbulence

L'agitation turbulente se manifeste par la présence au sein même de l'écoulement de nombreux mouvements secondaires d'aspect chaotique, c'est-à-dire sans organisation apparente, et parfaitement observable à l'échelle macroscopique au sens supra moléculaire.

Les caractéristiques principales de la turbulence sont :

- Incertitudes (de mesures, de calculs...) ;
- Grande variété des échelles spatiales (taille de tourbillon) dans l'écoulement ;
- Caractères aléatoire, chaotique, désordonné, fluctuant ;
- Imprévisibilité, non déterminisme ;
- Augmentation du mélange : forte diffusion des quantités transportées ;
- Très large gamme de longueurs d'ondes : tourbillons présents de tailles très variées;
- Le bruit : les écoulements turbulents sont bruyants du fait des sources acoustiques créées par des fluctuations de pression dans le fluide.

Vu cette multitude de forme que peut prendre le phénomène, il est difficile de définir exactement ce que l'on entend par turbulence. Néanmoins, plusieurs définitions ont été proposées parmi lesquelles celle donnée par P. CHASSAING qui définit l'écoulement turbulent comme étant un mode naturel de mouvement de fluide visqueux où des mécanismes internes d'échanges énergétiques assurent, au sein même de l'écoulement, la création et le maintien de toute une hiérarchie de mouvements chaotiques répartis continûment sur une large gamme d'échelle macroscopique (**Chassaing, 2000**).

2.1.2. Les approches de la turbulence

Il existe trois principales méthodes de modélisation numérique d'un écoulement turbulent:

1. la simulation numérique directe, dans laquelle on cherche à représenter la totalité des phénomènes physiques DNS.
2. la simulation des grandes échelles, dans laquelle on représente seulement les plus gros tourbillons LES.
3. la simulation moyennée ou approche statistique dans laquelle on représente seulement l'écoulement moyen RANS.

Dans notre étude, nous allons opter pour l'approche statistique de la turbulence ; ceci nous amènera à utiliser la décomposition de Reynolds pour établir les équations du mouvement moyen.

2.1.3. Moyenne d'ensemble

Soit une grandeur hydrodynamique T (vitesse, pression,...) à mesurer(**Cadot, 2006**).

On effectue N expériences indépendantes portant sur le même écoulement. A chaque expérience, on enregistre la valeur de T à la même position et au même temps ; on obtient ainsi le vecteur T(x,t).

La moyenne d'ensemble est donnée par :

$$\bar{T}(s, t) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_i(x, t) \quad (1.14)$$

Cette moyenne vérifie les propriétés suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} \overline{f+g} = \bar{f} + \bar{g} \\ \overline{\alpha f} = \alpha \bar{f} \\ \bar{\bar{f}} = \bar{f} \\ \overline{fg} = \bar{f}\bar{g} \quad \text{avec } \alpha = \text{constante} \\ \frac{\partial \bar{f}}{\partial x} = \overline{\frac{\partial f}{\partial x}} \\ \frac{\partial \bar{f}}{\partial t} = \overline{\frac{\partial f}{\partial t}} \end{array} \right. \quad (1.15)$$

A partir de l'opérateur « moyenne statistique », on définit la décomposition de Reynolds de la quantité T(x, t) donnée par :

$$T = \bar{T} + t \quad (1.16)$$

t est la valeur fluctuante ; par définition, la moyenne de cette valeur est nulle : $\bar{t} = 0$

Dans le cadre de notre étude, la décomposition des variables qui nous intéressent se fait comme suite :

$$U = \bar{U} + u \quad (1.17)$$

$$V = \bar{V} + v \quad (1.18)$$

$$W = \bar{W} + w \quad (1.19)$$

$$P = \bar{P} + p \quad (1.20)$$

$$C = \bar{C} + c \quad \text{Avec, } C \text{ est la concentration en scalaire passif} \quad (1.21)$$

2.2. Equation de continuité dans le mouvement moyen

En partant de l'équation de continuité (1-5), on a :

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = \frac{\partial (\bar{U} + u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \quad (1.22)$$

En moyennant l'équation précédente, on obtient :

$$\overline{\frac{\partial U_i}{\partial x_i}} = \overline{\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_i}} + \overline{\frac{\partial u_i}{\partial x_i}}$$

Comme $\overline{\frac{\partial u_i}{\partial x_i}} = 0$, il en résulte :

$$\overline{\frac{\partial U_i}{\partial x_i}} = 0 \quad (1.23)$$

Cette dernière équation (1.23) est l'équation de continuité de l'écoulement moyen.

En coordonnées cartésiennes, cette équation devient :

$$\frac{\partial \bar{U}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{V}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{W}}{\partial z} = 0 \quad (1.24)$$

2.3. Equation de la quantité de mouvement pour l'écoulement moyen

Partons de l'équation (1-10) ; en décomposant la vitesse instantanée en vitesse moyenne et vitesse fluctuante, on obtient :

$$\rho \left(\frac{\partial (\bar{U}_i + u_i)}{\partial t} \right) + \rho (\bar{U}_j + u_j) \frac{\partial (\bar{U}_i + u_i)}{\partial x_j} = \rho f_i - \frac{\partial (\bar{P} + p)}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 (\bar{U}_i + u_i)}{\partial x_j^2} \quad (1.25)$$

En moyennant l'équation (1-25), on obtient :

$$\rho \left(\frac{\partial (\overline{\bar{U}_i + u_i})}{\partial t} \right) + \rho \left(\overline{\bar{U}_j + u_j} \right) \frac{\partial (\overline{\bar{U}_i + u_i})}{\partial x_j} = \rho f_i - \frac{\partial (\overline{\bar{P} + p})}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 (\overline{\bar{U}_i + u_i})}{\partial x_j^2}$$

En appliquant les propriétés de l'opérateur « moyenne statistique », l'équation précédente devient:

$$\rho \left(\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} \right) + \rho \left(\bar{U}_j \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} + \bar{U}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) = \rho f_i - \left(\frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} \right) + \mu \left(\frac{\partial^2 \bar{U}_i}{\partial x_j^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j^2} \right)$$

En tenant compte du fait que la moyenne de la vitesse fluctuante et la pression fluctuante sont nulles, on aboutit à l'équation suivante :

$$\rho \left(\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial t} + \bar{U}_j \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) = \rho f_i - \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 \bar{U}_i}{\partial x_j^2} \quad (1.26)$$

Cette équation peut également s'écrire sous la forme suivante :

$$\rho \left(\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial t} + \bar{U}_j \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} \right) = \rho f_i - \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 \bar{U}_i}{\partial x_j^2} - \rho \frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} \quad (1.27)$$

Enfin en divisant par ρ , on aboutit à l'équation suivante qui est celle de la quantité du mouvement pour l'écoulement moyen :

$$\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial t} + \bar{U}_j \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} = f_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{U}_i}{\partial x_j^2} - \frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} \quad (1.28)$$

où, $\nu = \frac{\mu}{\rho}$ Correspond à la viscosité cinématique de l'eau.

En coordonnées cartésiennes, on obtient :

$$\frac{\partial \bar{U}}{\partial t} + \bar{U} \frac{\partial \bar{U}}{\partial x} + \bar{V} \frac{\partial \bar{U}}{\partial y} + \bar{W} \frac{\partial \bar{U}}{\partial z} = f_x - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x} + \nu \left[\frac{\partial^2 \bar{U}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{U}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \bar{U}}{\partial z^2} \right] - \left[\frac{\partial \overline{uu}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{uv}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{uw}}{\partial z} \right] \quad (1.29)$$

$$\frac{\partial \bar{V}}{\partial t} + \bar{U} \frac{\partial \bar{V}}{\partial x} + \bar{V} \frac{\partial \bar{V}}{\partial y} + \bar{W} \frac{\partial \bar{V}}{\partial z} = f_y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial y} + \nu \left[\frac{\partial^2 \bar{V}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{V}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \bar{V}}{\partial z^2} \right] - \left[\frac{\partial \overline{vu}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{vv}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{vw}}{\partial z} \right] \quad (1.30)$$

$$\frac{\partial \bar{W}}{\partial t} + \bar{U} \frac{\partial \bar{W}}{\partial x} + \bar{V} \frac{\partial \bar{W}}{\partial y} + \bar{W} \frac{\partial \bar{W}}{\partial z} = f_z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial z} + \nu \left[\frac{\partial^2 \bar{W}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{W}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \bar{W}}{\partial z^2} \right] - \left[\frac{\partial \overline{wu}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{wv}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{ww}}{\partial z} \right] \quad (1.31)$$

Nous constatons qu'il y a apparition des nouveaux termes dans les équations de la quantité de mouvement de l'écoulement moyen ; ainsi, les termes \overline{uu} , \overline{uw} , \overline{wu} , et \overline{ww} donnent naissance aux tensions de Reynolds ; Elles proviennent de la non linéarité des équations de Navier - Stokes et traduisent l'interaction entre mouvement moyen et mouvement fluctuant.

Ces termes ont alors introduit des inconnus supplémentaires nous conduisant à un système d'équation ouvert. Nous avons donc plus d'inconnus que d'équation, ce qui nous amène à choisir dans le prochain point, un modèle de turbulence afin d'obtenir des équations supplémentaires pour la fermeture de notre système.

3. Les modèles de turbulence

Pour pouvoir résoudre les équations de Reynolds, il faut fermer le problème, c'est-à-dire exprimer les tensions de Reynolds en fonction des grandeurs physiques moyennes à l'aide d'un modèle de turbulence.

On distingue généralement deux grandes classes de modèle de turbulence :

- Les modèles à viscosité turbulente basée sur l'hypothèse dite de BOUSSINESQ qui consiste à modéliser directement les tensions de Reynolds à partir d'une viscosité turbulente.
- Le modèle aux tensions de Reynolds dans lesquels, nos inconnus c'est-à-dire les tensions de Reynolds sont directement calculées en se portant sur les moments d'ordres supérieurs.

3.1. Les modèles à viscosité turbulente (Chassaing, 2000)

En se basant sur une similitude avec la loi de comportement d'un fluide visqueux reliant le tenseur de contrainte aux champs de vitesse, Boussinesq (1877) a introduit la notion de la viscosité turbulente. Cette notion consiste à mettre en relation le tenseur de Reynolds R_{ij} au champ moyen de vitesse par l'équation suivante :

$$-\overline{u_i u_j} = R_{ij} = \nu_t \left(\frac{\partial \overline{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{U}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{3}{2} k \delta_{ij} \quad (1.32)$$

avec, ν_t : la viscosité turbulente, k : l'énergie cinétique turbulente et δ_{ij} est le tenseur de Kronecker.

Contrairement à la viscosité moléculaire qui est une propriété du fluide, la viscosité turbulente est une propriété de l'écoulement qui varie au cours du temps et dans l'espace.

Les modèles à viscosité turbulente sont classés en sous groupes suivant le nombre d'équations supplémentaires intervenant dans la modélisation.

Ainsi on distingue :

➤ Les modèles à zéro équation

Ce sont des modèles très simples qui supposent que la viscosité turbulente est constante dans l'espace et dans le temps, ou directement fonction des paramètres connus ou facilement calculables.

➤ Les modèles à une équation de transport

Dans ces modèle, on considère une seule équation de transport (généralement on considère l'équation de transport k où les différents termes sont modélisés pour déterminer la viscosité turbulente

➤ Les modèles à deux équations de transport

Il existe plusieurs modèles à deux équations de transport. Comme leur nom l'indique, ces modèles font intervenir deux équations de transport.

Le plus utilisé jusqu'à là est le modèle $k - \varepsilon$ que nous allons d'ailleurs retenir dans le cadre de notre étude.

Le principe du modèle $k - \varepsilon$ est relativement simple et il est très utilisé dans les codes de calcul CFD. Il définit un nouveau terme appelé viscosité turbulente μ_t de manière à pouvoir écrire l'équation de Reynolds de la façon suivante :

$$\rho \frac{d\overline{u}_i}{dt} = - \frac{\partial \overline{p}}{\partial x_i} + \text{div}((\mu + \mu_t) \vec{\nabla}(\overline{u}_i)) \quad (1.33)$$

Avec,

$$\mu_t = - \frac{\rho \|\overline{u'_i u'_j}\|}{\|\vec{\nabla}(\overline{u}_i)\|} \quad (1.34)$$

Pour respecter l'équivalence avec l'équation (1.8). En trois dimensions, μ_t est une matrice 3*3.

La principale simplification du modèle $k-\varepsilon$ consiste à réduire cette matrice 3×3 à une constante (comportement isotrope des fluctuations), supprimant ainsi 5 inconnues (Nous avons donc à ce stade 4 équations et 5 inconnues). La viscosité turbulente est exprimée en fonction de deux inconnues k et ε :

$$\frac{\mu_t \varepsilon}{\rho k^2} = C_{ste} = C_\mu \quad (1.35)$$

Nous avons maintenant 4 équations et 6 inconnues. Nous rajoutons enfin deux équations de transports sur k et sur ε .

Nous obtenons alors un système de 6 équations ($1.10 \times 3 + 1.5 + 2$ équations de transports sur k et ε), à 6 inconnues ($u, v, w, p, k, \varepsilon$) qu'il est possible de résoudre.

Les constantes intervenant dans les équations sont établies empiriquement. Pour le modèle $k-\varepsilon$ standard, nous avons :

$$C_\mu = 0,09 \quad C_{\varepsilon 1} = 1,44 \quad C_{\varepsilon 2} = 1,92 \quad \sigma_\varepsilon = 1,00 \quad \sigma_k = 1,30$$

Le modèle décrit ici est le modèle $k-\varepsilon$ de base. De nombreuses variantes à ce modèle ont été développées pour l'améliorer ou pour qu'il corresponde mieux à un type d'écoulement donné.

3.2. Les modèles aux tensions de Reynolds

Les modèles à viscosité turbulente tel que $k-\varepsilon$ supposent que la turbulence est isotrope. Ceci constitue une limite pour ces modèles car la plupart des écoulements turbulents sont anisotropes.

Un modèle d'ordre supérieur est le modèle aux tensions de Reynolds. Ce modèle propose de résoudre directement les équations de tension de Reynolds (au nombre de 6), et l'équation de la dissipation. Seul un tel modèle est capable de prendre en compte l'anisotropie de la turbulence en renonçant à l'hypothèse de Boussinesq qui fait intervenir la viscosité turbulente **(Pierre-Louis, Jean-Paul, Pascal, Dominique, 1998)**.

Le modèle de turbulence RSM ne définit pas de termes de viscosité turbulente mais utilise une équation de transport pour chaque composante du tenseur de Reynolds R (équation 1.11). Ce tenseur est symétrique, il comporte six composantes donc on a six équations de transports. Ces équations font intervenir le terme de dissipation de l'énergie cinétique (ε) qui possède lui-même une équation de transport. On arrive donc à 11 inconnues ($\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}, \bar{p}$, les six termes du tenseur de Reynolds R et ε) avec 11 équations (les six équations de transports sur les termes du tenseur R , l'équation de transport sur ε , les trois équations de Navier-Stokes et l'équation de continuité). Le système peut être résolu.

3. La sous-couche visqueuse

A proximité de la paroi, des précautions doivent être prises au niveau du maillage pour calculer les contraintes tangentielles à la paroi et donc obtenir une bonne résolution du profil de vitesse de l'écoulement. Ces précautions sont décrites dans cette section.

Les contraintes (τ) dans l'écoulement se décomposent en deux termes selon l'équation :

$$\tau = \mu \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} - \overline{\rho u'v'} \quad (1.36)$$

Le premier terme correspond aux contraintes visqueuses et le second terme aux contraintes de Reynolds. Le second terme (contraintes de Reynolds) devient prépondérant lorsque l'on s'éloigne des parois (vitesse moyenne élevée) tandis que le premier terme régit le comportement des contraintes lorsque la vitesse moyenne tend vers zéro à proximité des parois. La variation de la vitesse en fonction de l'éloignement de la paroi est donc différente dans ces deux zones.

Un paramètre adimensionnel y^+ qui s'affranchit de la géométrie réelle a été défini de façon à marquer la limite entre les différentes zones. La répartition est la suivante :

$0 < y^+ < 5$: Cette zone est la sous couche visqueuse, variation linéaire de la vitesse, contraintes visqueuses prépondérantes.

$50 < y^+ < 500$: Cette zone est la zone logarithmique, variation logarithmique de la vitesse, contraintes de Reynolds prépondérantes.

On peut observer la variation de la vitesse en fonction de l'éloignement de la paroi (adimensionné) :

A la paroi, $\tau = \mu \left. \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right|_{y=0}$ car $u'=v'=0$. La difficulté est alors de calculer le gradient de vitesse $\mu \left. \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right|_{y=0}$ à la paroi.

Lors de la modélisation numérique, deux solutions sont alors possibles :

Le centre de la première maille adjacente à la paroi se situe dans la zone SCV ($y^+ < 5$), auquel cas le code de calcul résout les équations pour la zone de la variation linéaire de la vitesse moyenne. Le gradient de vitesse est alors très simple à calculer : $\mu \left. \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right|_{y=0} = \frac{\bar{u}}{y}$ à la première maille. Le centre de la première maille adjacente à la paroi se situe dans la zone logarithmique ($50 < y^+ < 500$), auquel cas le code de calcul utilise des "lois de paroi empiriques" pour calculer le gradient de vitesse dans la SCV et donc τ à la paroi.

Il est important de noter que pour le bon déroulement du calcul, le centre de la première maille ne doit pas se situer dans la zone intermédiaire entre $y^+ = 5$ et $y^+ = 50$, sans quoi il n'est pas correct d'utiliser les lois de paroi.

Le calcul de la valeur réelle de l'éloignement y correspondant à $y^+ = 5$ permet de faire le meilleur choix selon la taille des mailles. La relation entre y et y^+ est donnée par :

$$y = \frac{y^+ \nu}{u_*} \quad (1.37)$$

U_* correspond à la vitesse de cisaillement définie comme suit :

$$\mu \left. \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right|_{y=0} = \tau_0 = \rho u_*^2 = \frac{\rho \bar{u}^2 \lambda}{8} = \rho \frac{Q^2 \lambda}{8S^2} \quad (1.38)$$

Soit

$$u_* = \sqrt{Q^2 \lambda / 8S^2} \quad (1.39)$$

Avec, λ le coefficient de frottement de Darcy qui peut être déterminé à partir des abaques de Moody.

Une fois u_* estimé, il est possible de calculer la valeur dimensionnée y correspondante à la valeur adimensionnée y^+ avec la relation (1.37).

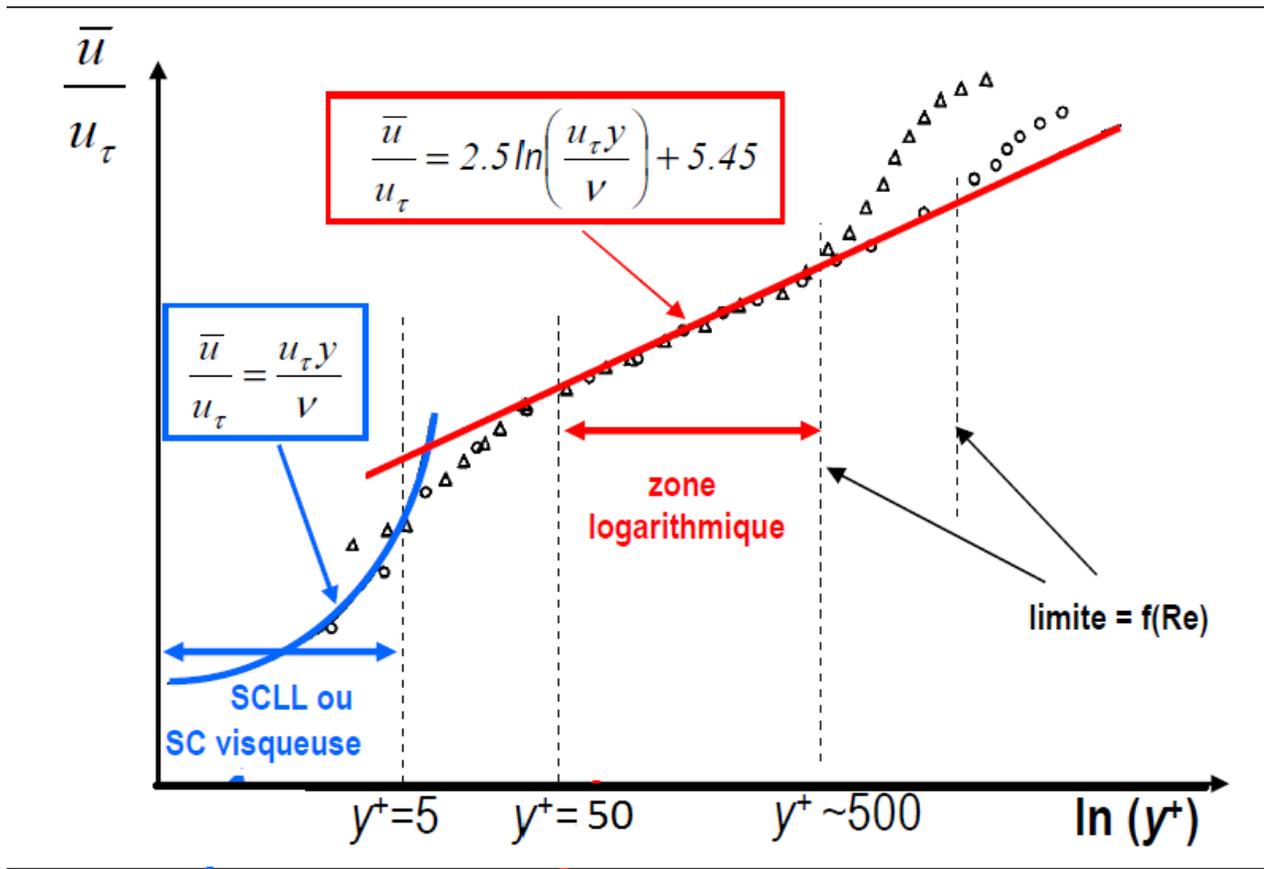


Figure 1.1 Evolution du champ de vitesse proche de la paroi - Echelle logarithmique.

Chapitre 2

Partie expérimentale

(Etude de jonction)

Chapitre 2

Écoulement en jonction à trois branches

Introduction

Mignot et al. [4] ont mesuré le champ de vitesse ainsi que la dispersion d'une pollution dans un écoulement en jonction. La première étape consistera à modéliser cet écoulement numériquement avec un maillage fin et de comparer les caractéristiques de l'écoulement avec celles obtenues expérimentalement, pour ensuite grossir le maillage et observer l'influence sur les résultats.

1. Description de l'écoulement

1.1. Schéma et données expérimentales

Les débits d'eau en amont sont $Q_u=1$ l/s et $Q_b=3$ l/s, soit un débit total en sortie $Q_d=4$ l/s. La soude est répartie uniformément dans le débit latéral en amont Q_u et on étudie le mélange entre le débit pollué par la soude de 1 l/s et le débit d'eau propre de 3 l/s. Le canal a une largeur $b=30$ cm et une hauteur $h=12$ cm. L'écoulement est représenté ci-dessous (Mignot et al. [7], 2012).

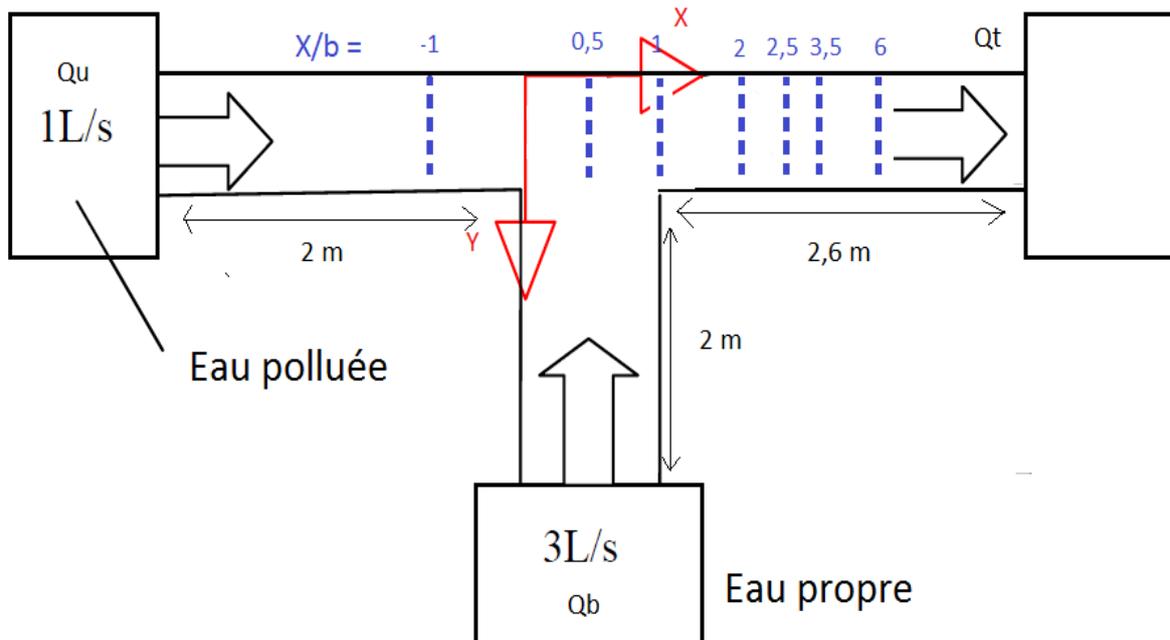


Figure 2.1 : Schéma de l'écoulement

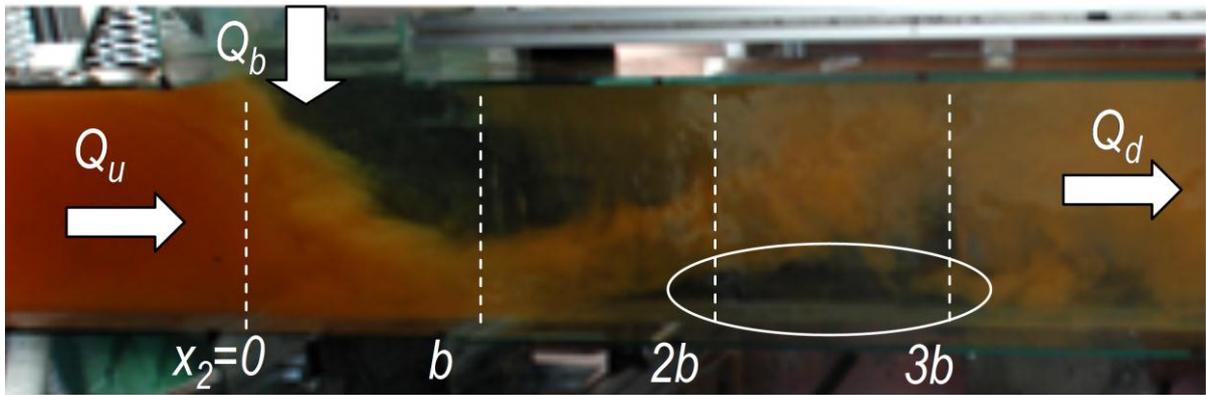


Figure 2.2 : Visualisation de l'écoulement avec du colorant à la place de la soude

Le débit de soude injecté expérimentalement dans l'écoulement à 1 l/s est de 0,5952 ml/s. Les mesures expérimentales de soude dans la jonction ont été effectuées par Cai (année) aux distances $X/b = -1,0$; $X/b = 0,5$; $X/b = 1,0$; $X/b = 2,0$; $X/b = 2,5$; $X/b = 3,5$ et $X/b = 6,0$ et à chaque fois aux hauteurs $Z = 3\text{cm}$, $Z = 5\text{cm}$, $Z = 7\text{cm}$ et $Z = 9\text{cm}$ dans toute la largeur de la section $Y = 0$ jusqu'à $Y = b$. On dispose également de caractéristiques hydrodynamiques mesurées expérimentalement de cet écoulement (Mathieu. [6], 2012). Les résultats expérimentaux de mélange de soude sont rappelés

Dans la figure 2.3, sur les différentes courbes, la concentration volumique C en scalaire passif dans la jonction a été normalisée (C_n) de la façon suivante :

$$C_n = \frac{C}{C_i}$$

Avec, C_i la concentration volumique en scalaire passif en amont.

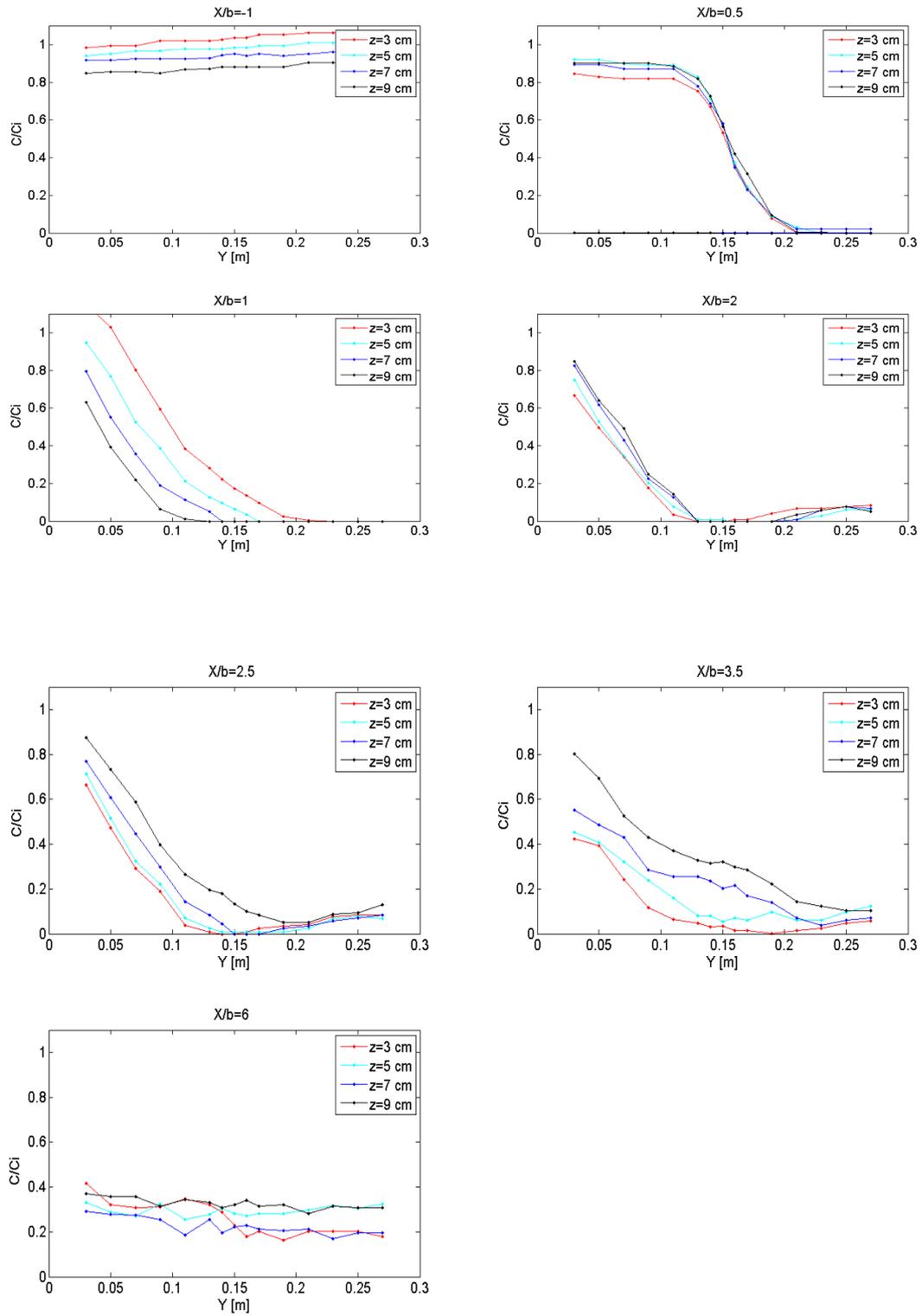


Figure 2.3 Concentration de la soude en jonction - Résultats expérimentaux

Il apparait qu'à $X/b = -1$, le scalaire passif est mélangé uniformément et vaut 100% tandis qu'à l'aval à $X/b=6$, il ne vaut plus que 25%. Ces observations sont en accord avec les débits dans les différentes branches de la jonction puisqu'on a $\frac{Q_u}{Q_t} = 0,25$. A $X/b=0$, l'eau propre ($C=0\%$) arrive par $Y=0,3m$ (voir le graphique correspondant à $X/b=0,5$).

Deux éléments sont particulièrement intéressants dans les résultats obtenus :

- Le renversement de la concentration à la hauteur $z=3cm$ qui est plus importante qu'aux autres hauteurs jusqu'à $X/b=1,0$ et qui devient moins importante ensuite (inversion du gradient de concentration selon z).
- Aux distances $x/b=2,0$ et $X/b = 2,5$, le passage à 0 des concentrations à toutes les hauteurs aux milieux de section pour ensuite remonter en fin de section (par où passe la soude pour aller des y faibles au y élevés ?).

2. Modélisation sur STAR-CCM+

2.1. Modèle utilisé

Le maillage a été réalisé à l'aide de l'outil "trimmer" du mailleur de Star-CCM.

Cet outil permet de contrôler approximativement les dimensions du maillage dans les différentes dimensions. Pour faire le maillage, on a essayé d'avoir un maillage intermédiaire entre le maillage grossier et le maillage fin c'est-à-dire un nombre de mailles :

$$34.471 < \text{nombre de maille} < 504.419.$$

Le maillage qu'on a pris est de 140465 mailles tel que :

Dans la jonction :

- Selon x : la taille de la maille est de 0,8 cm
- Selon y : la taille de la maille est de 0,8 cm
- Selon z : la taille de la maille est de 1,5 cm

Dans le reste de canal :

- Selon x : la taille de la maille est de 6,25 cm
- Selon y : la taille de la maille est de 3,00 cm
- Selon z : la taille de la maille est de 1,50 cm

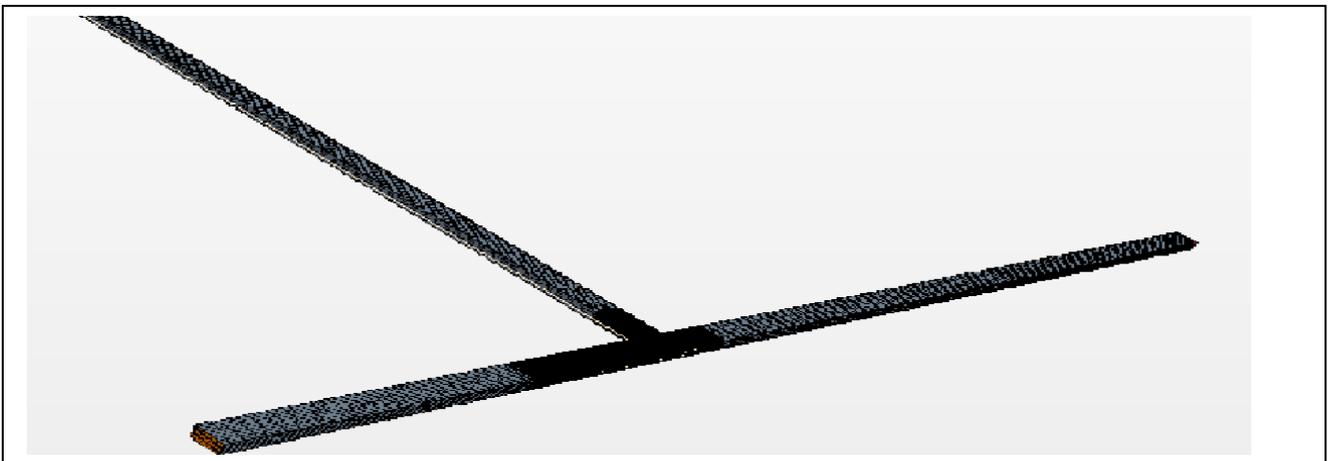
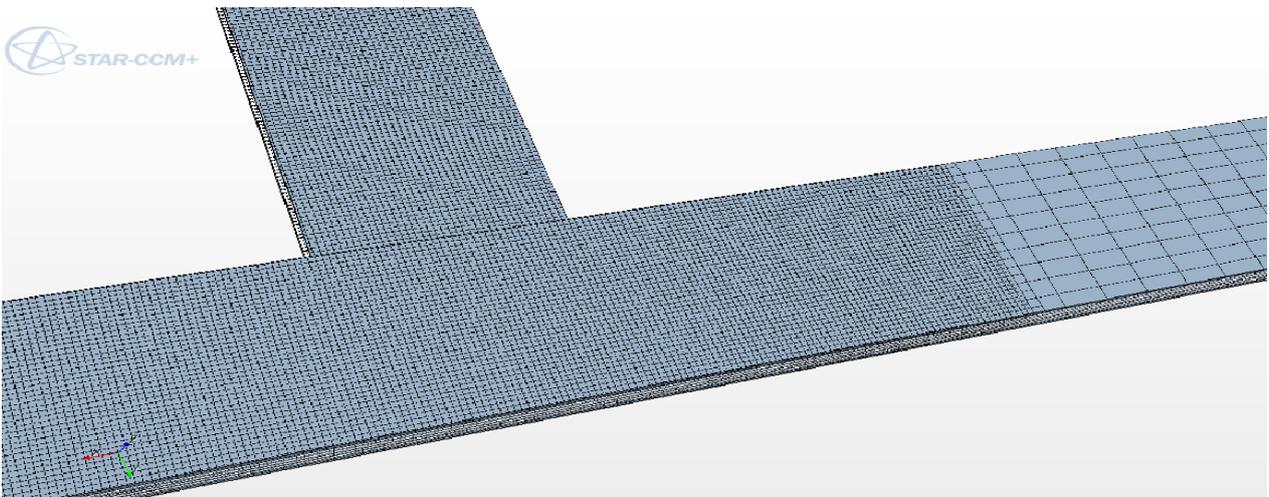
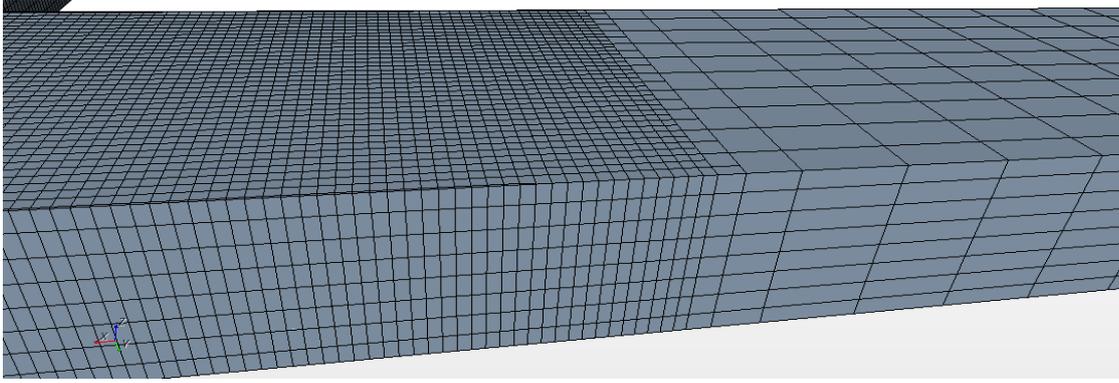


Figure 2.4 : Vues générales de maillage utilisé

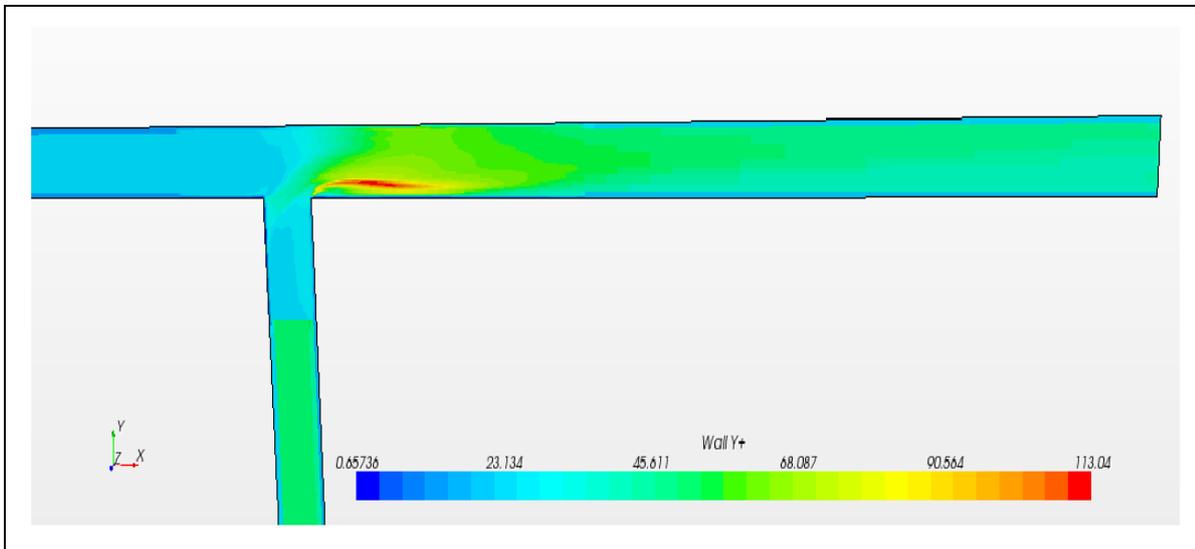


Figure 2.5 : Wall (paroi) Y+ au fond de la structure.

En faisant ce maillage on a pris en considération la valeur de WALL (paroi) Y+ de telle façon qu'elle soit > 30 afin qu'on reste dans la zone logarithmique où les lois de paroi sont applicables comme le montre la (figure 2.5).

2.2. Conditions aux limites

L'écoulement est modélisé d'une part avec le modèle de turbulence k- ϵ et d'autre part avec le modèle RSM. Les résultats obtenus seront ensuite comparés aux résultats expérimentaux.

Les conditions aux limites utilisées sont :

- Adhérence à la paroi sur les parois latérales et sur le fond du canal (régime lisse).
- Condition de rigide-lid pour la surface de dessus (il y'a glissement).
- Vitesses uniformes correspondant aux vitesses moyennes pour les débits donnés sur la limite amont de l'écoulement amont et latéral. La distance condition limite amont/jonction a été agrandie pour que l'écoulement soit établi à la jonction.
- Distribution hydrostatique de la pression sur la limite aval de l'écoulement.

2.3. Le nombre de Schmidt

Vu les résultats obtenus auparavant on s'aperçoit que l'influence du nombre de Schmidt turbulent est très faible et ne change pas l'allure de la répartition. On utilisera donc un nombre de Schmidt turbulent $S_{ct} = 0,7$ par la suite.

3. Hydrodynamique de l'écoulement

Des données hydrodynamiques obtenues expérimentalement par PIV (Particle Image Velocimetry) de l'écoulement sont disponibles (Mignot et al.[8], 2012). L'hydrodynamique de notre écoulement, moteur de la dispersion de polluant, peut ainsi être validée. On pourra ensuite éventuellement relier des erreurs dans le mélange du scalaire passif à des erreurs hydrodynamiques.

Pour chaque maillage, les champs de vitesse expérimentaux sont comparés visuellement dans la jonction et sur deux lignes à $X/b = 2,0$ et $X/b = 3,0$ en aval de la jonction avec les résultats numériques (modèle K-epsilon et RSM). Nous obtenons les résultats suivants :

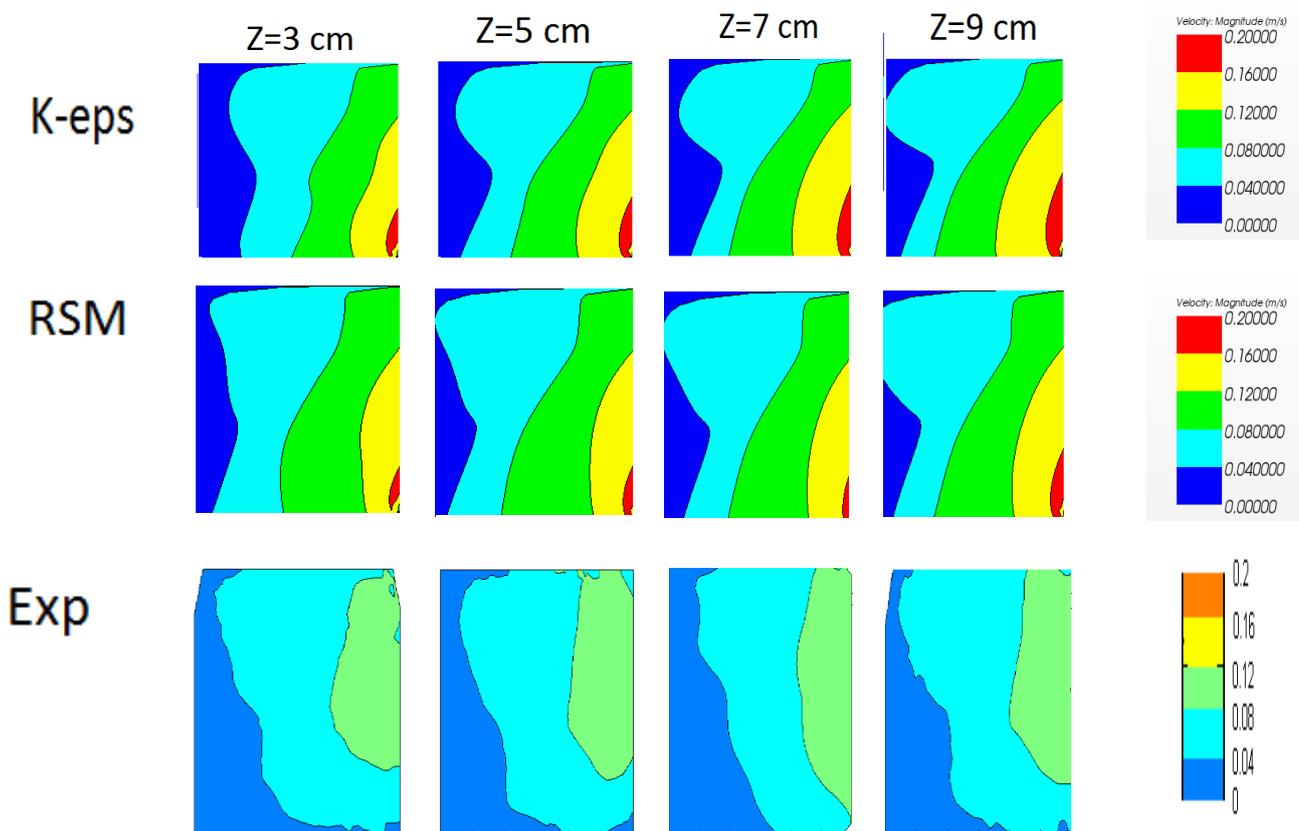


Figure 2.6 : Comparaison du champs de vitesse à la jonction : $X=[0\text{mm}- 30\text{mm}]$, $Y=[0\text{mm}- 30\text{mm}]$ aux hauteurs $Z=30\text{mm}$, $Z=50\text{mm}$, $Z=70\text{mm}$, $Z=90\text{mm}$.

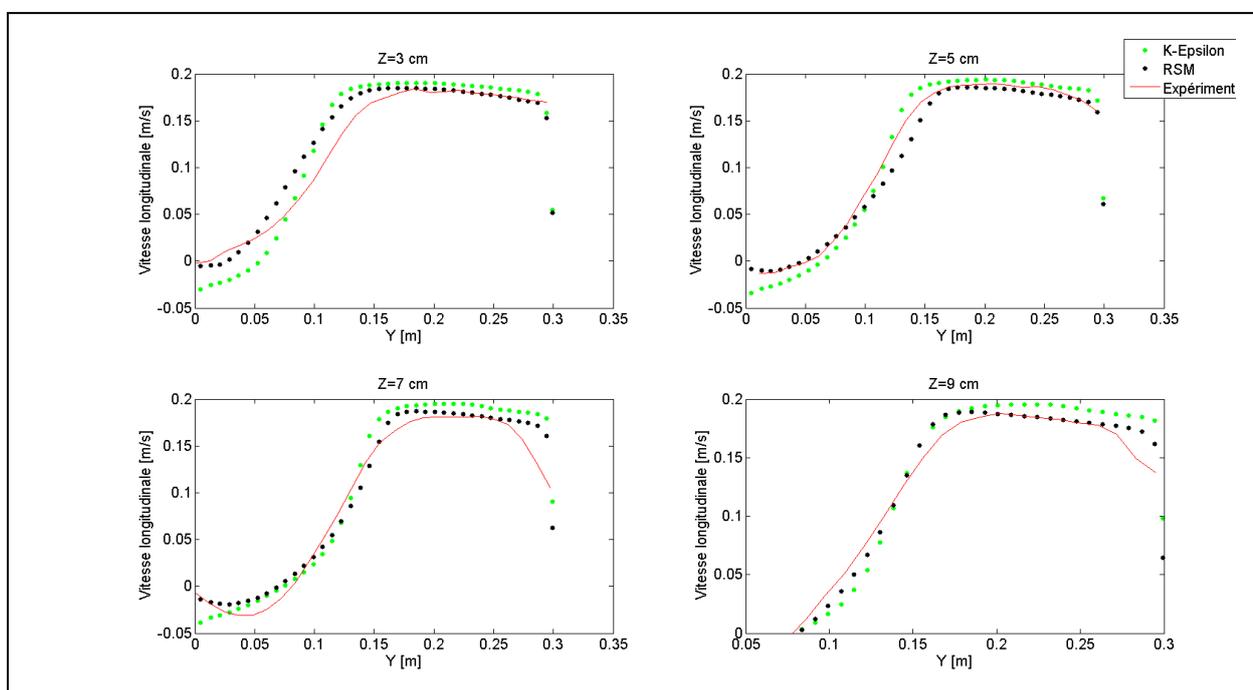


Figure 2.7 : Vitesse longitudinale en $X/b=2$

D'après les figures ci-dessus, on constate que les résultats sont qualitativement justes avec les deux modèles en $X/b = 2$, même si le modèle RSM donne des résultats plus proches à ceux obtenus expérimentalement.

3.1. Concentration en scalaire passif dans la jonction

L'objectif est à présent d'étudier la répartition de scalaire passif dans la jonction.

On pourra comparer les résultats numériques aux résultats expérimentaux obtenus par Mignot et al [4,2012] et les relier aux caractéristiques hydrodynamiques de l'écoulement.

3.1.1. Modélisation numérique de la répartition en scalaire passif

Comme l'étude hydrodynamique a montré que les résultats obtenus par le modèle RSM sont les plus proches des résultats expérimentaux par rapport à $K-\epsilon$, on a pris en considération que le modèle RSM.

La modélisation a été effectuée avec le modèle de turbulence RSM, puis les résultats ont été tracés sur un même graphique avec les résultats expérimentaux, pour chaque distance X/b et à chaque élévation sur les figures qui suivent.

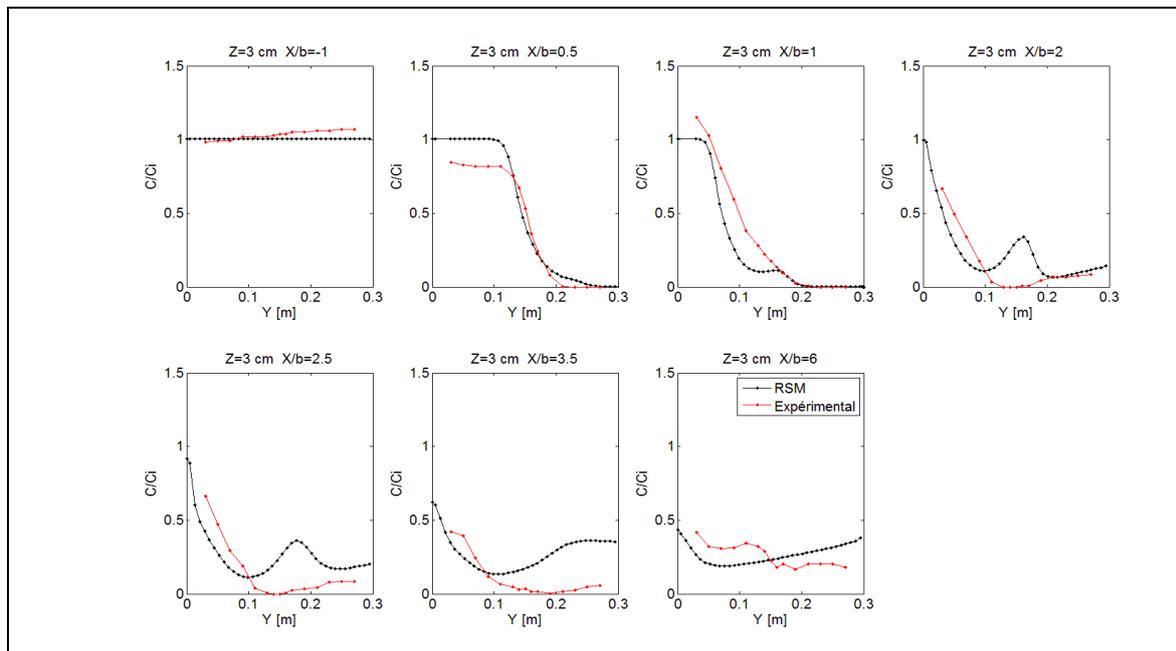


Figure 2.8 : Comparaison de modèle RSM avec les résultats expérimentaux $Z = 3\text{cm}$ - $Sct=0.7$

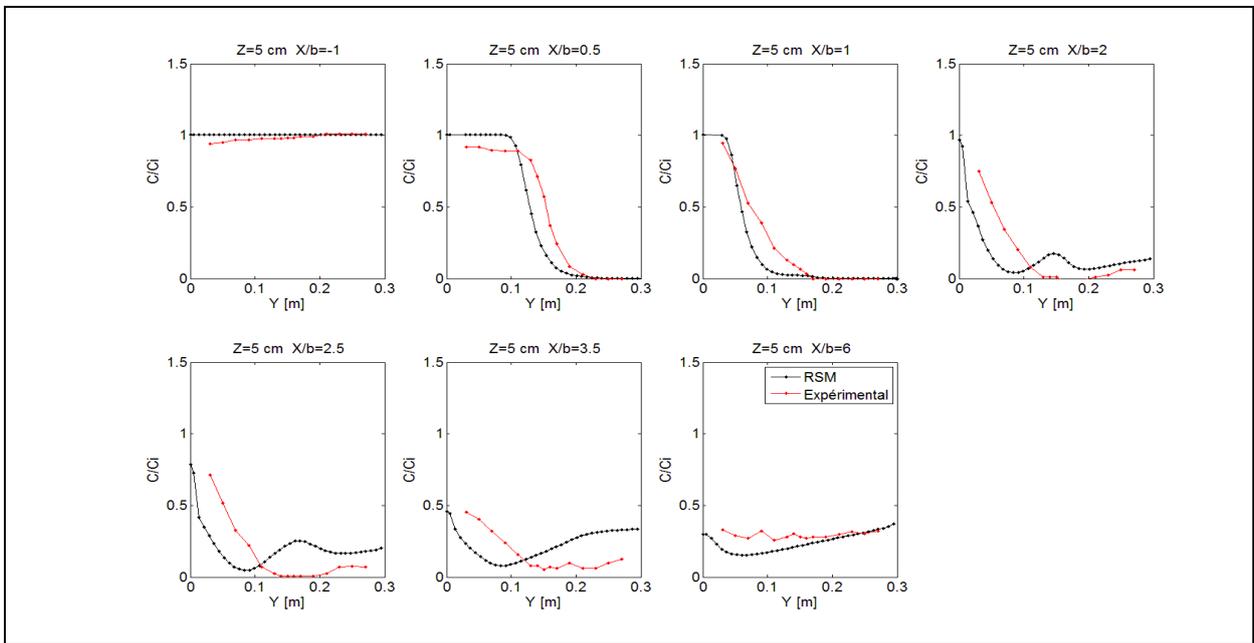


Figure 2.9 : Comparaison de modèle RSM avec les résultats expérimentaux $Z = 5\text{ cm}$, $Sct = 0.7$

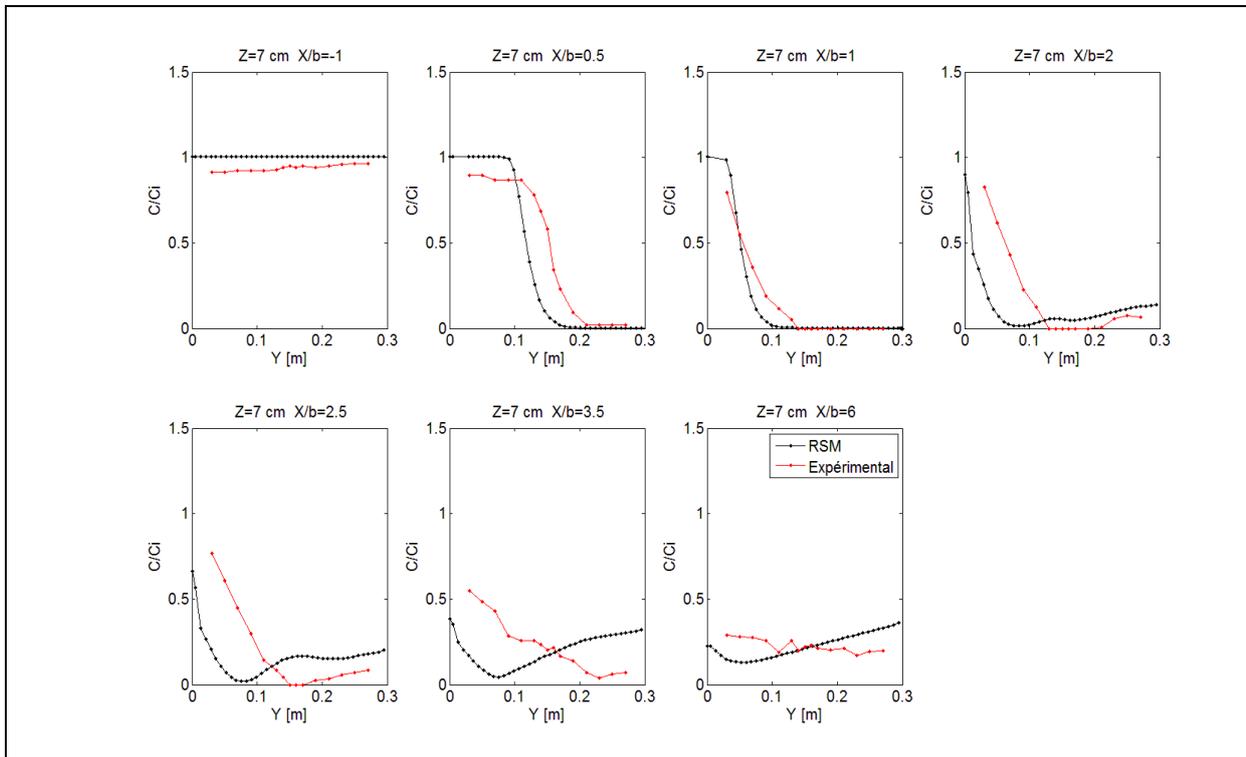


Figure 2.10 : Comparaison de modèle RSM avec les résultats expérimentaux $Z = 7\text{ cm}$, $Sct = 0.7$

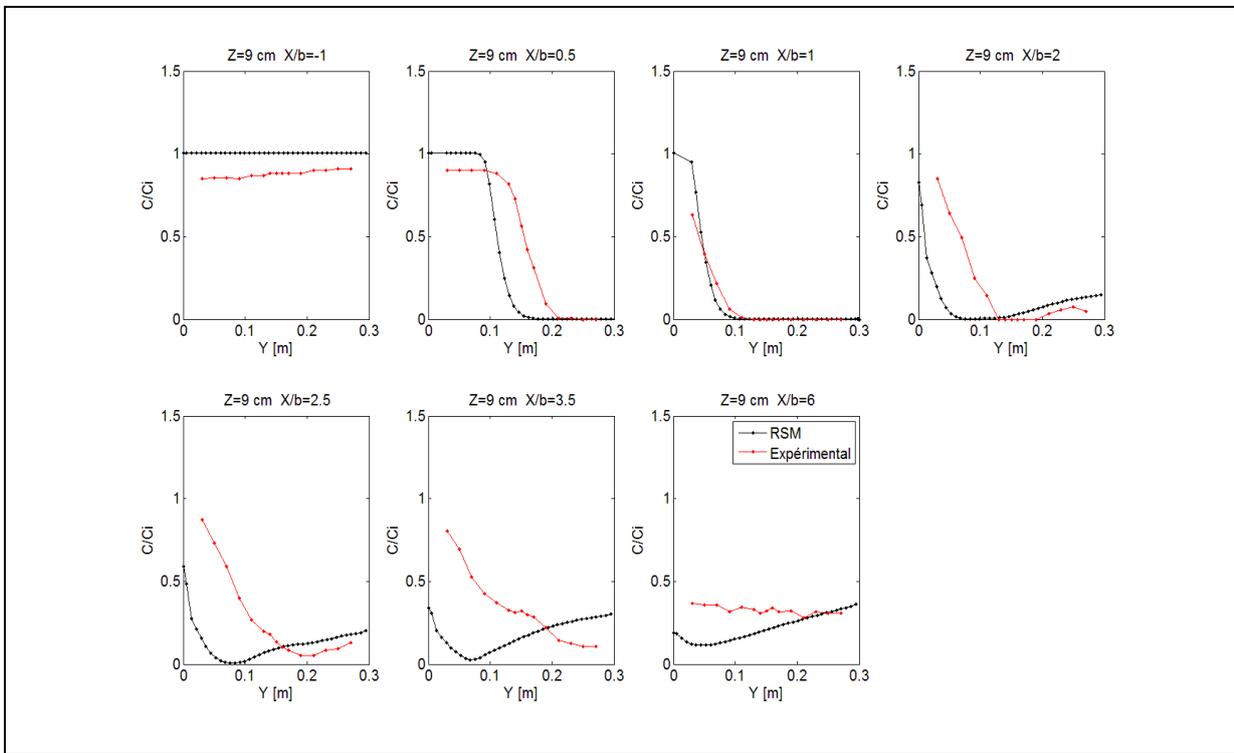


Figure 2.11 : Comparaison de modèle RSM avec les résultats expérimentaux $Z = 9\text{cm}$ et $Sct = 0.7$

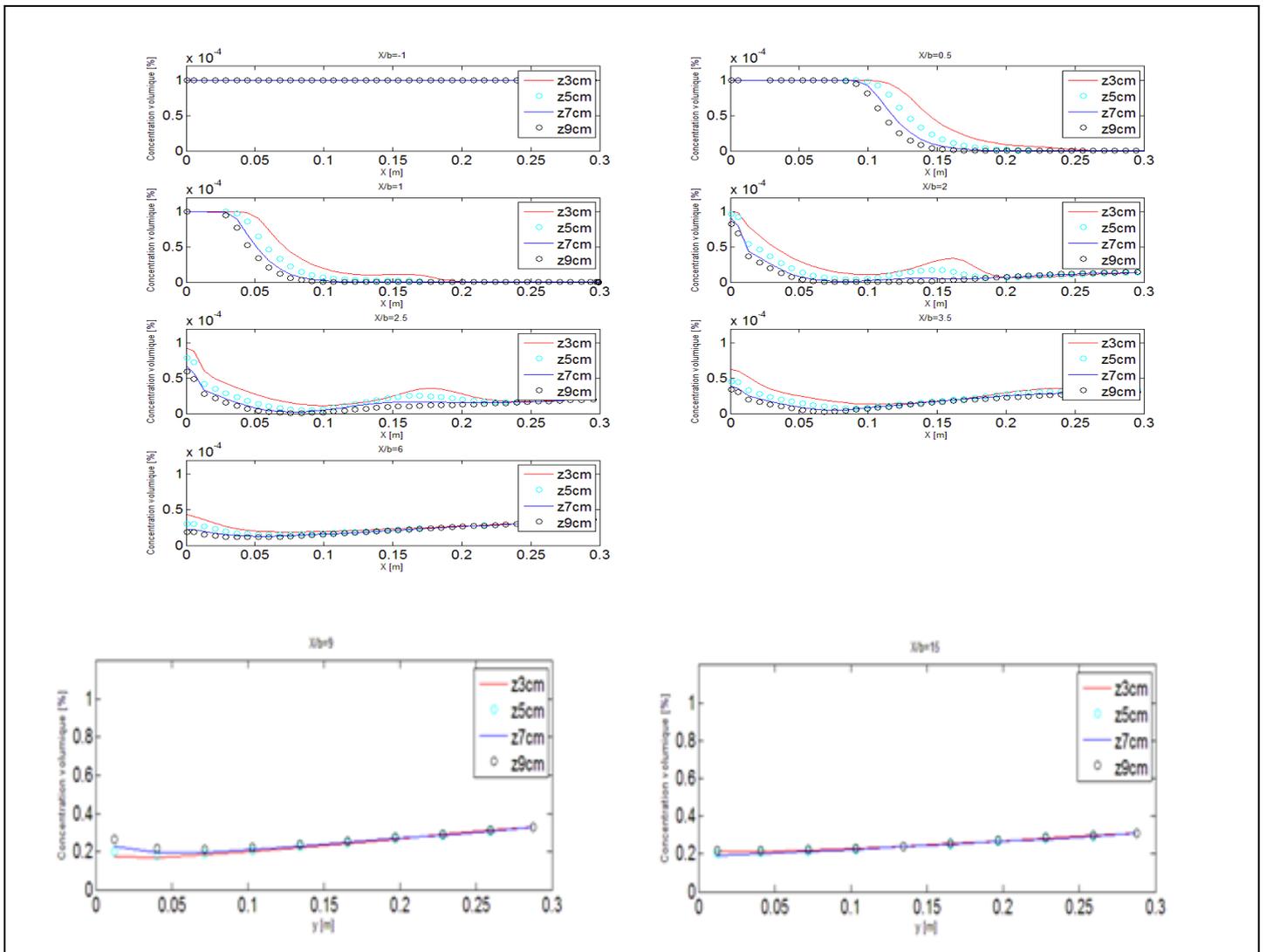


Figure 2.12 : Concentration de la soude en jonction - Résultats numériques, modèle RSM

A partir de ces figures, on peut constater que la répartition en scalaire passif est beaucoup mieux approchée par le modèle numérique pour les faibles valeurs d'élévation Z ($Z= 3\text{cm}$) que pour les fortes valeurs de Z ($Z= 9\text{cm}$).

Pour chaque distance X/b , les résultats numériques (modèle RSM) pour les différentes élévations sont tracés sur un même graphe (figure 2.12), permettant ainsi une comparaison directe avec les figures expérimentales.

D'après la figure 2.12, on remarque bien qu'après l'introduction de scalaire passive il y a une zone de mélange qui commence à partir de $y = 0,3\text{m}$ et qui se dirige vers $y = 0.0\text{m}$ au fur et à mesure que x/b augmente et ce mélange se produit par une sorte de tourbillon qui se dirige vers le bas et après il remonte c'est pourquoi on voit bien que la concentration de scalaire passive est inversement proportionnelle à la hauteur z , et plus on se rapproche de l'aval plus notre mélange commence à être homogène.

En revanche, le phénomène de concentration nulle en milieu de section pour les distances $x/b=2,0$ et $x/b= 2,5$ et qui remonte au bout de la section est bien présent dans les résultats numériques. Ce phénomène difficilement explicable par les mesures numériques va pouvoir être étudié à l'aide du modèle numérique.

3.1.2. Interprétation des résultats

Le modèle numérique de l'écoulement va être utilisé pour tenter d'expliquer le phénomène de concentration nulle en milieu de section pour les distances $x/b=2,0$ et $x/b= 2,5$ et qui remonte au bout de la section, présents dans les résultats numériques et expérimentaux (voir figures 2.8 jusqu'au 2.12). Pour cela, on peut s'aider des représentations des champs de vitesse et de la répartition de scalaire passif dans différents plans en aval de la jonction, dans la zone où le phénomène se produit.

Les champs de vitesse tangentielle accompagnés de la répartition en scalaire passif dans les plans YZ de la section aux distances $X/b = 0,0$; $X/b=1,0$; $X/b= 1,5$; $X/b=2,0$ et $X/b=3,0$ sont juxtaposés ci-après ($Y = b$ à droite et $Y = 0$ à gauche).

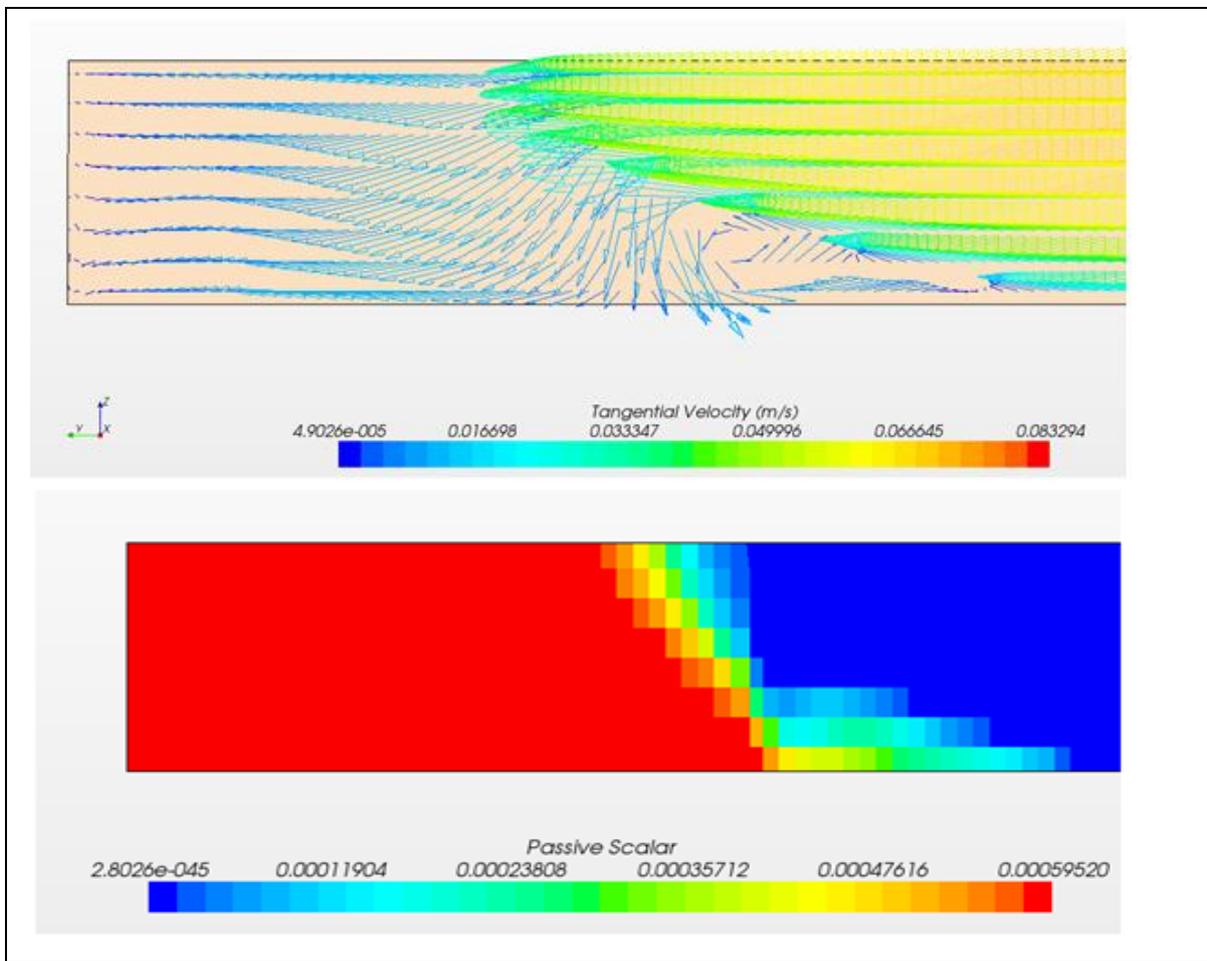


Figure 2.13 : Champ de vitesse et concentration en scalaire passif - plan (YZ), $X/b=0.0$

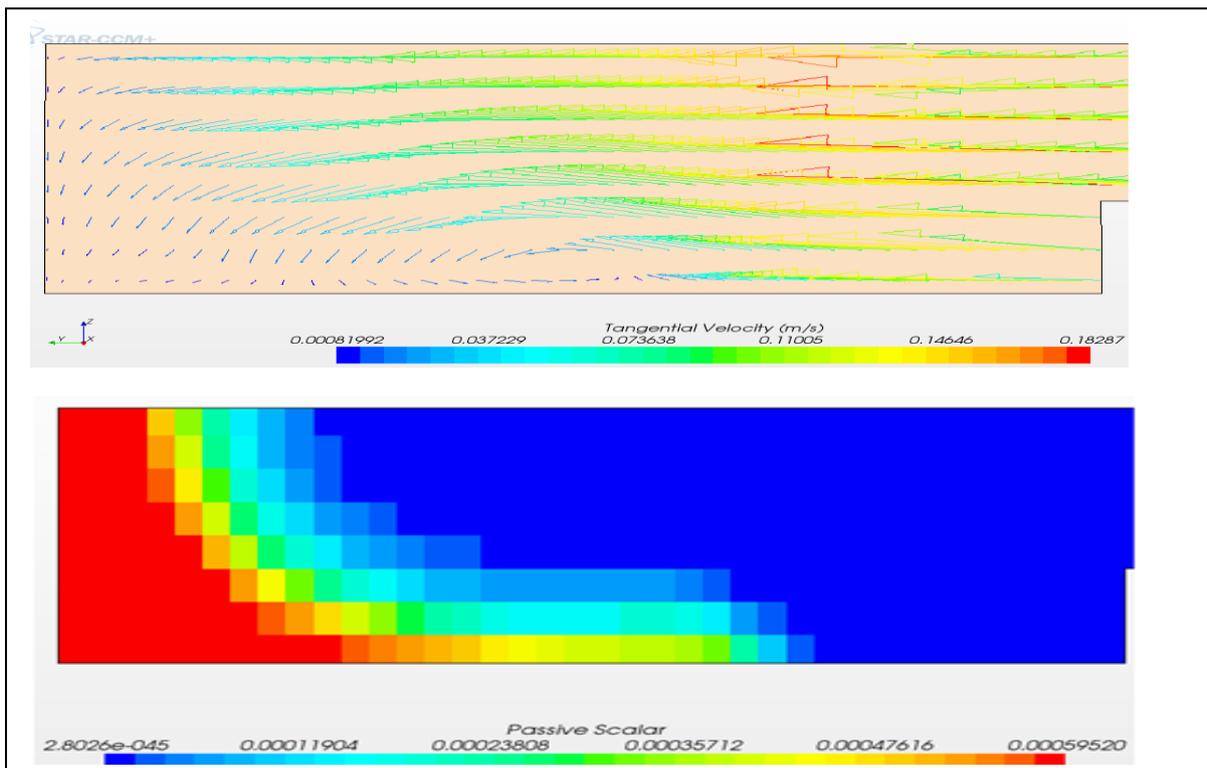


Figure 2.14 : Champ de vitesse et concentration en scalaire passif - plan (YZ), $X/b= 1.0$

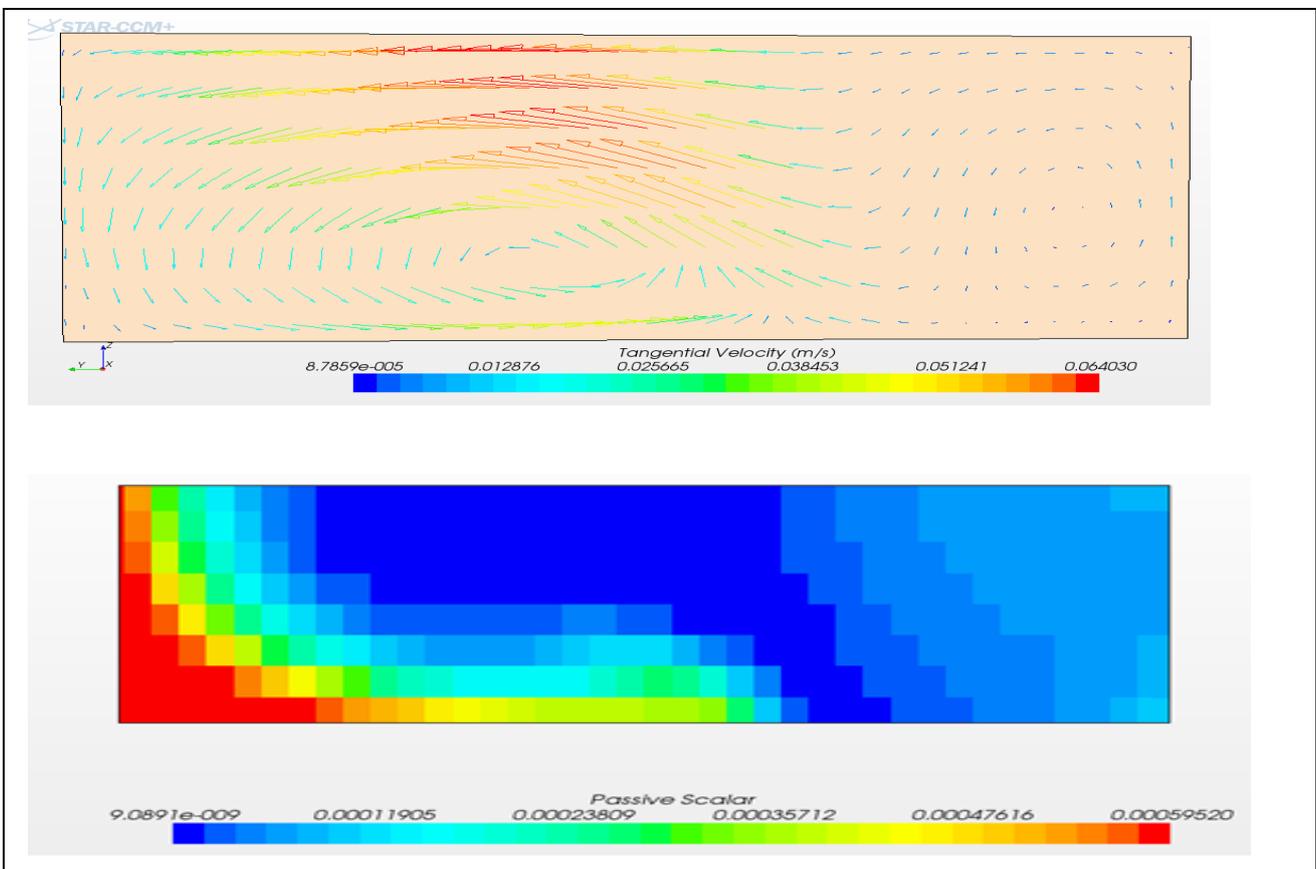


Figure 2.15 Champ de vitesse et concentration en scalaire passif - plan (YZ), $X/b=1,5$

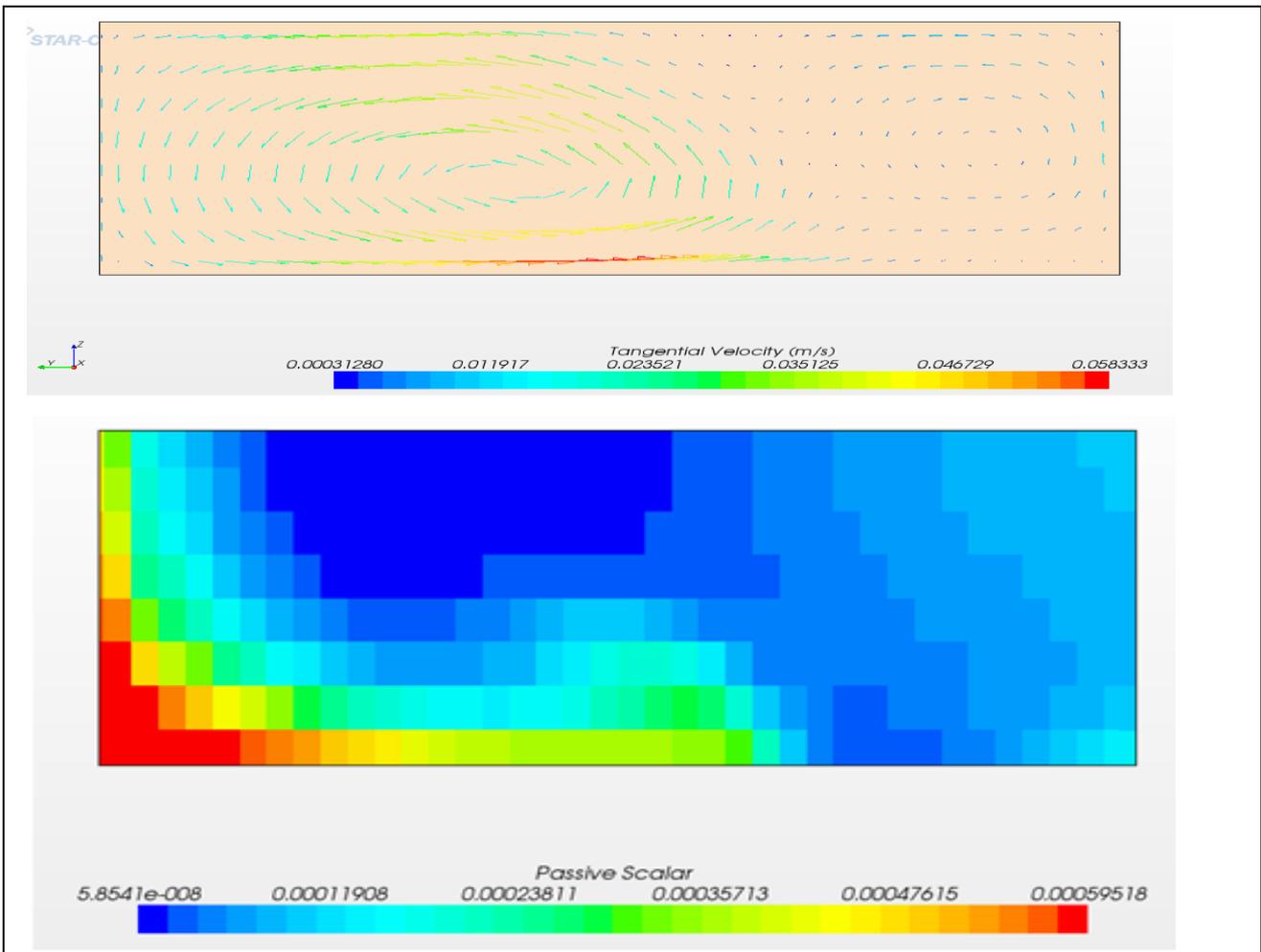


Figure 2.16 : Champ de vitesse et concentration en scalaire passif - plan (YZ), $X/b= 2,0$

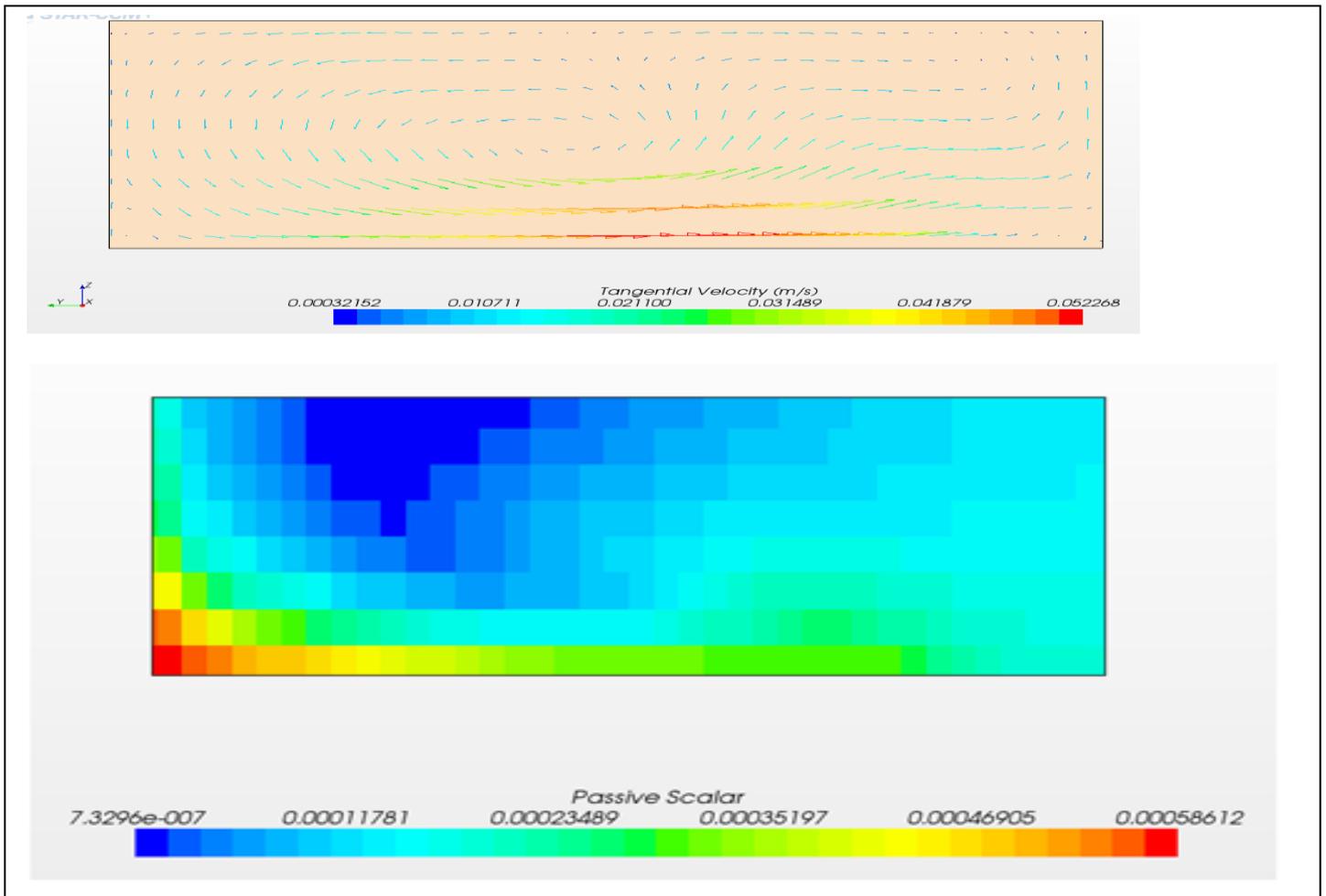


Figure 2.17 : Champ de vitesse et concentration en scalaire passif - plan (YZ), $X/b= 3,0$

En $X/b=1,0$, on peut observer que le gros débit d'eau pure qui vient de la droite confine le scalaire passif sur la gauche sur quasiment toute la hauteur de l'écoulement.

Le scalaire passif est cependant plus déplacé à la surface (vitesse de l'écoulement transversale élevée) qu'au fond (vitesse de l'écoulement transversale plus faible). Pour $X/b > 1,0$, on observe une recirculation transversale de l'écoulement dans le sens antihoraire. C'est cette recirculation qui serait responsable de l'advection de scalaire passif près de $Y/b = 1,0$ alors qu'il n'est présent que sur quelques millimètres en milieu de section.

La représentation en $X/b=3,0$ montre une homogénéisation progressive de la concentration en scalaire passif par le bas sur l'ensemble de la section.

3.2. Influence de débit

Afin de voir comment se fait la dispersion de polluant au niveau de la jonction on a essayé de changer à chaque fois le débit au niveau des deux entrées ce qui permet de connaître l'influence de débit.

Pour cela, on a rajouté deux cas :

- $Q_u = 3\text{l/s}$ et $Q_b = 1\text{l/s}$.
- $Q_u = 2\text{l/s}$ et $Q_b = 2\text{l/s}$.

En ce qui concerne la démarche à suivre, le maillage, les conditions aux limites et les hypothèses de base on a gardé les mêmes que ceux de $Q_u = 1\text{l/s}$ et $Q_b = 3\text{l/s}$. Pour pouvoir faire la comparaison, on va montrer des représentations des champs de vitesse et de la répartition de scalaire passif dans différents plans en aval de la jonction, dans la zone où le phénomène se produit.

1^{er} Cas : $Q_u = 3\text{ l/s}$ et $Q_b = 1\text{ l/s}$.

Les différents résultats obtenus sont représentés ci-dessous.

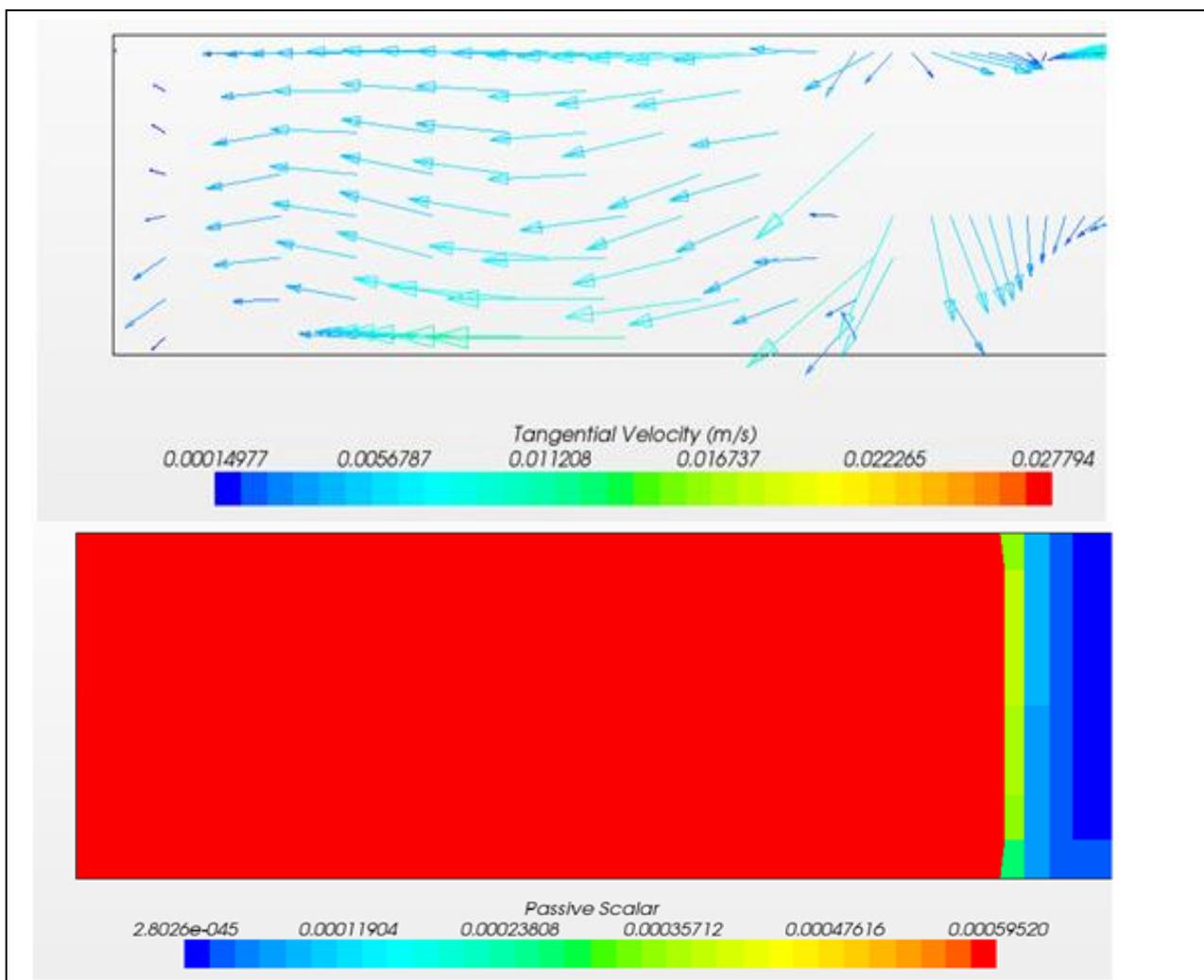


Figure 2.18 : Champ de vitesse et concentration en scalaire passif - plan (YZ), $X/b= 0,0$

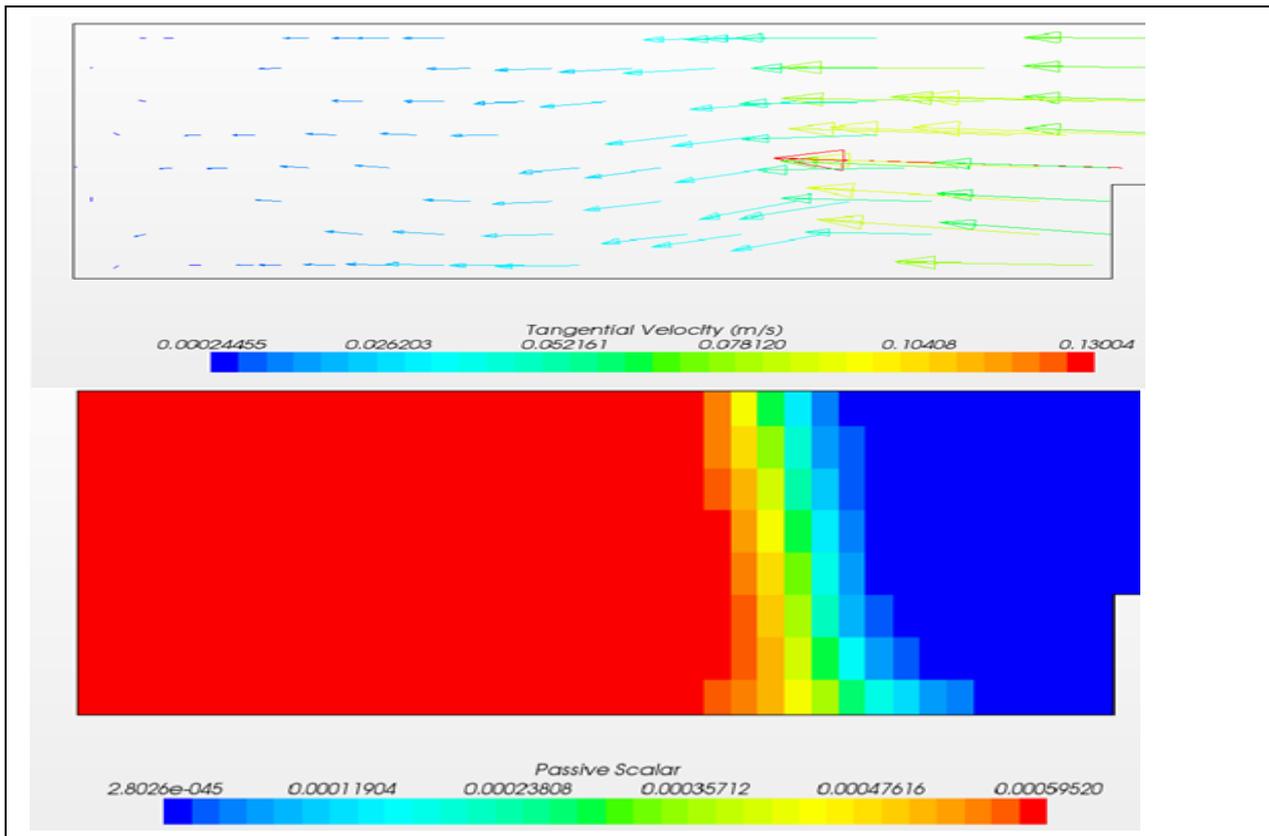


Figure 2.19 : Champ de vitesse et concentration en scalaire passif - plan (YZ), $X/b=1,0$

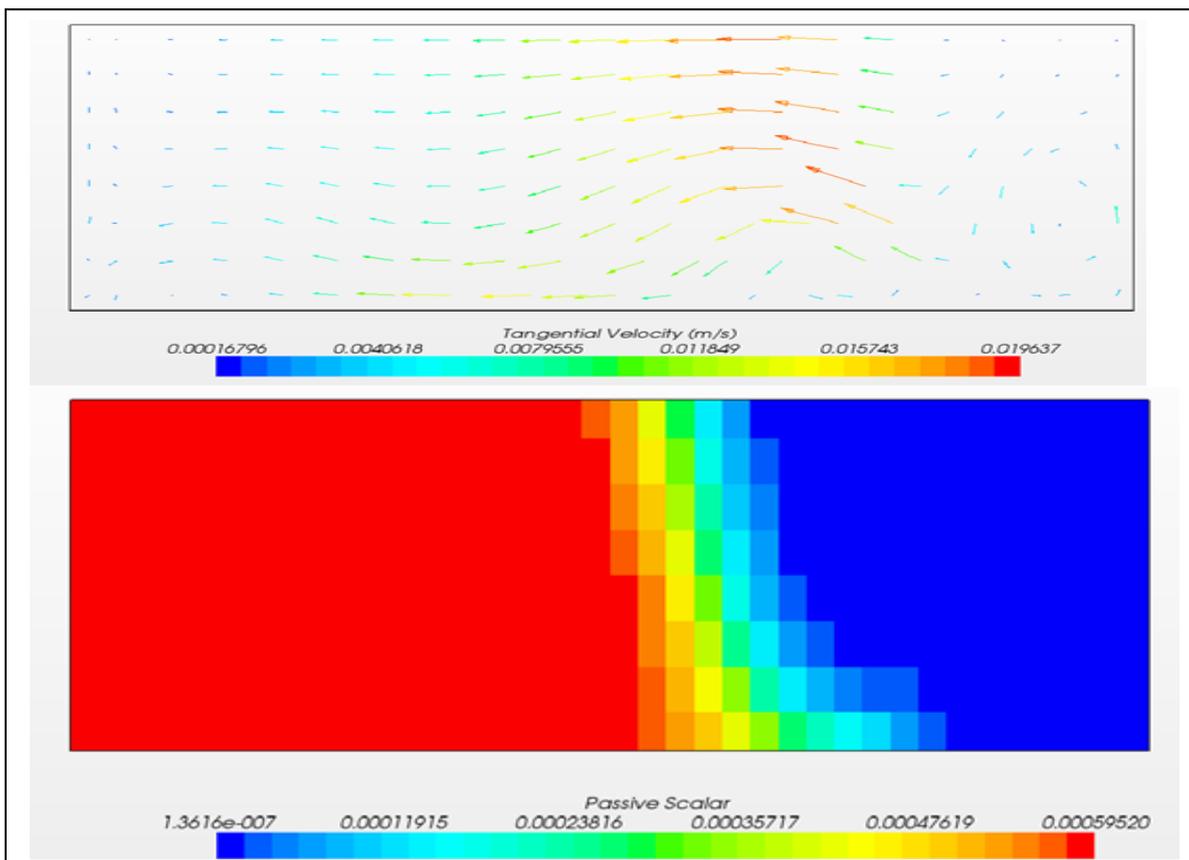


Figure 2.20 : Champ de vitesse et concentration en scalaire passif - plan (YZ), $X/b= 1,5$

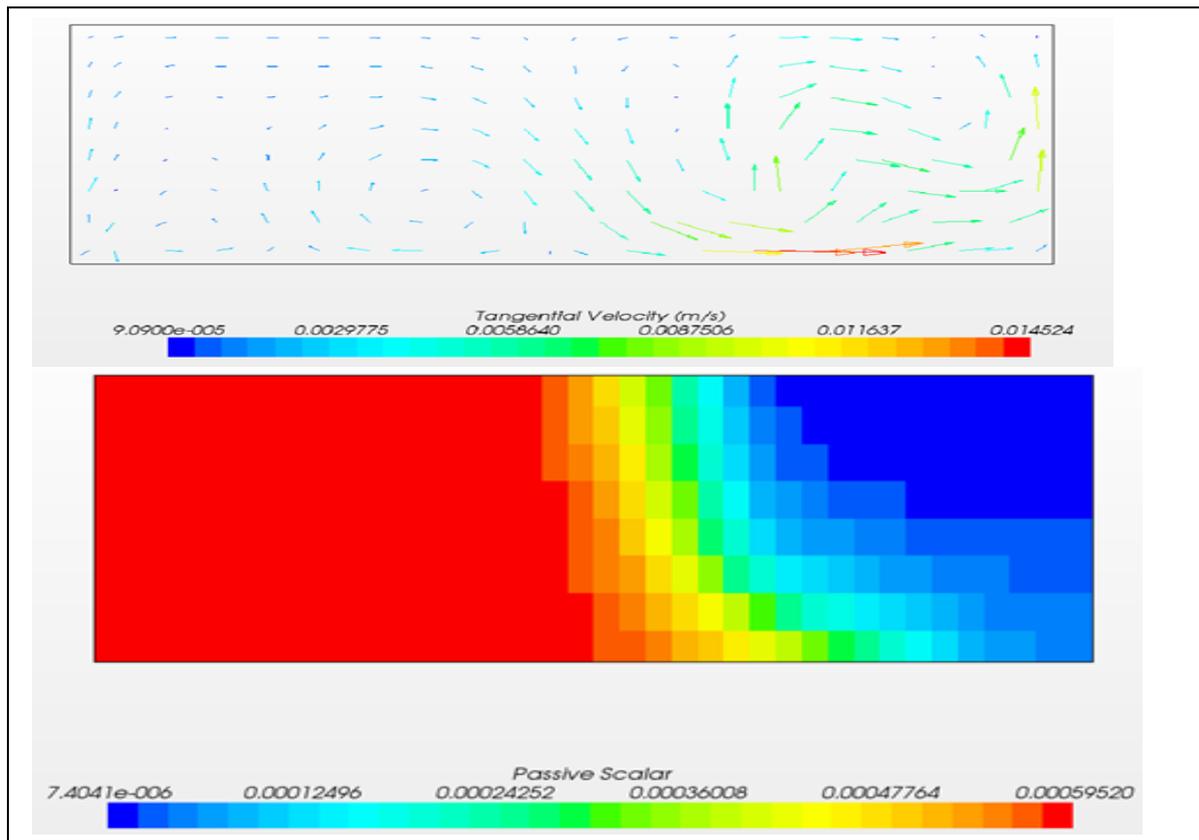


Figure 2.21 : Champ de vitesse et concentration en scalaire passif - plan (YZ), $X/b= 2,0$

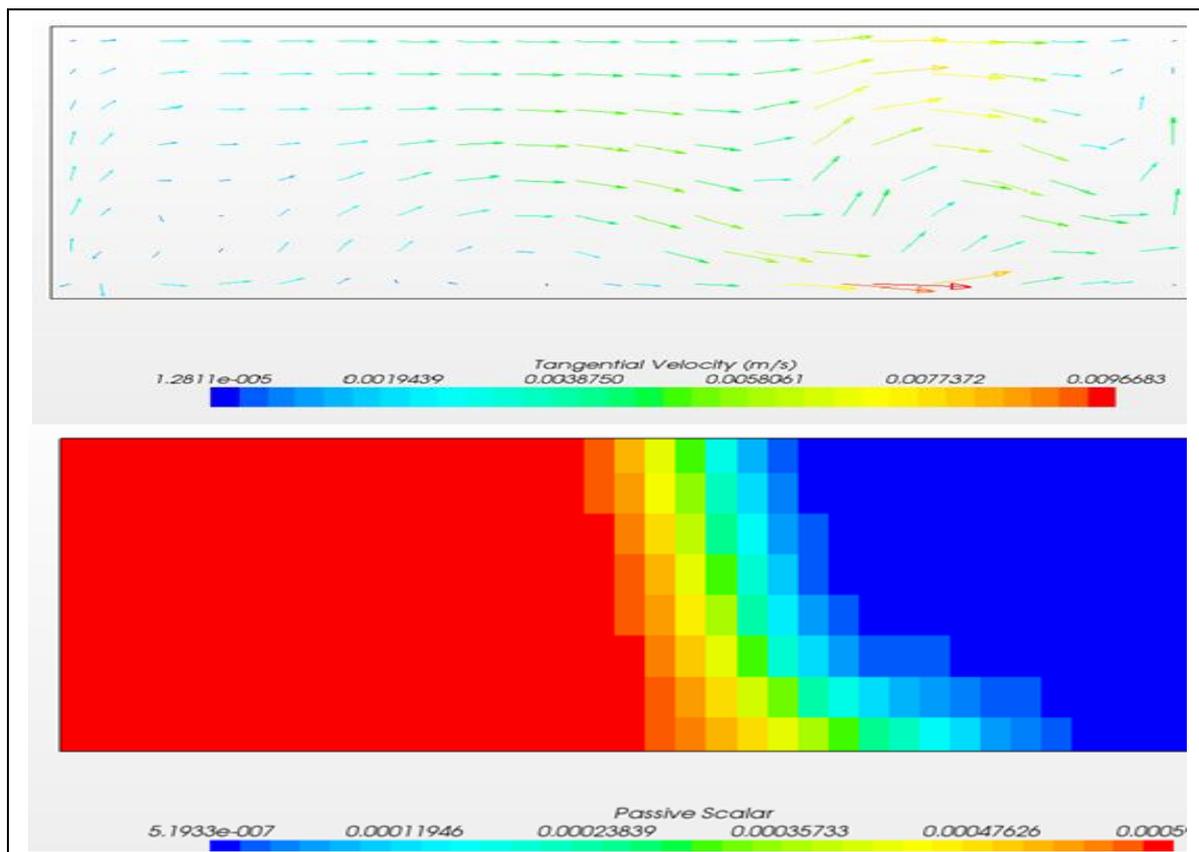


Figure 2.22 : Champ de vitesse et concentration en scalaire passif - plan (YZ), $X/b= 3,0$

Les champs de vitesses sur des différentes sections selon z sont représentés dans les figures ci-dessous :

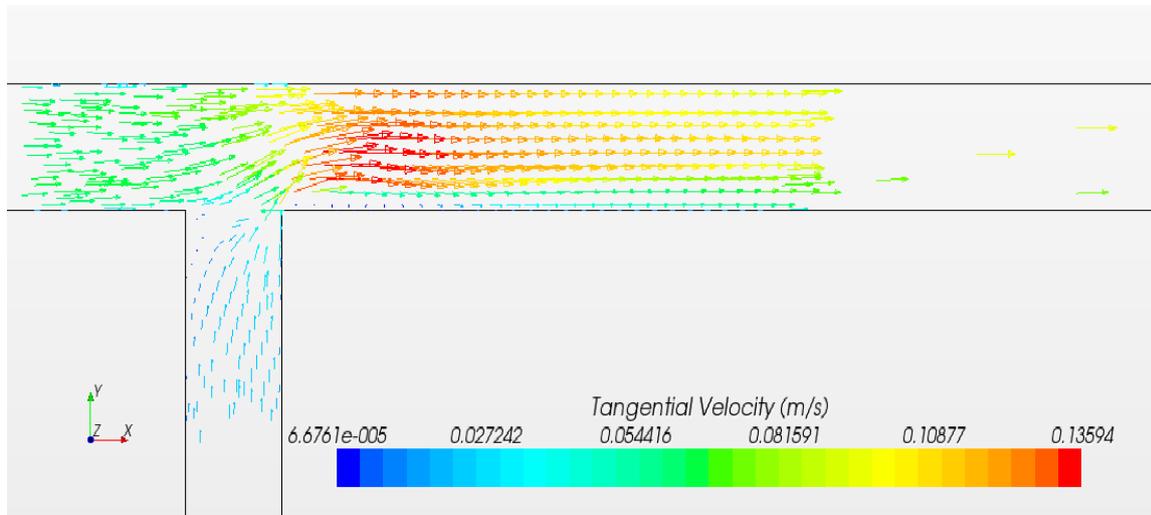


Figure 2.23 : Champ de vitesse - plan (XY), $Z = 1\text{cm}$

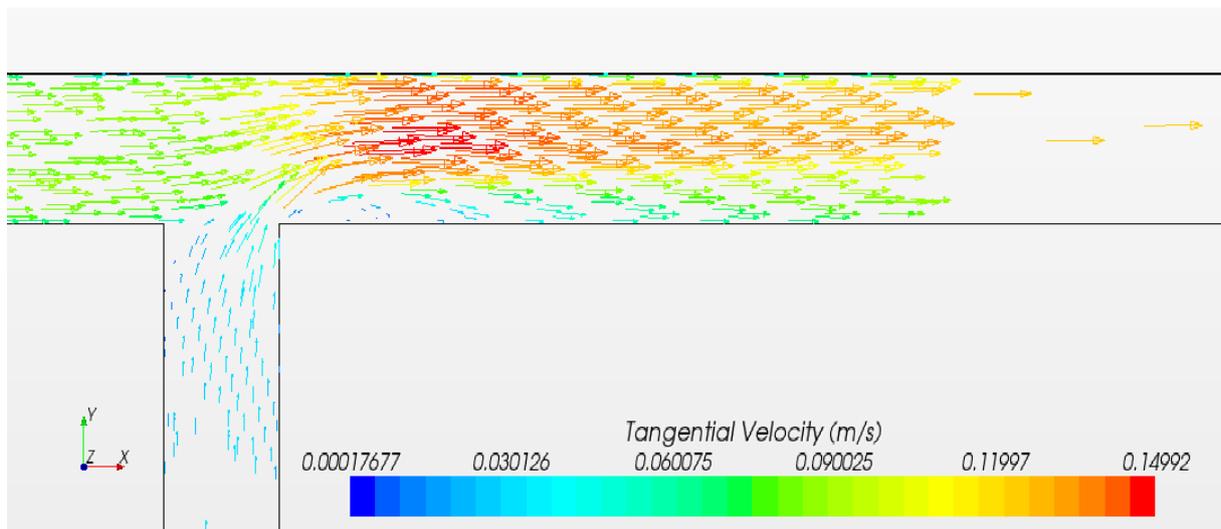


Figure 2.24 : Champ de vitesse - plan (XY), $Z = 3\text{cm}$

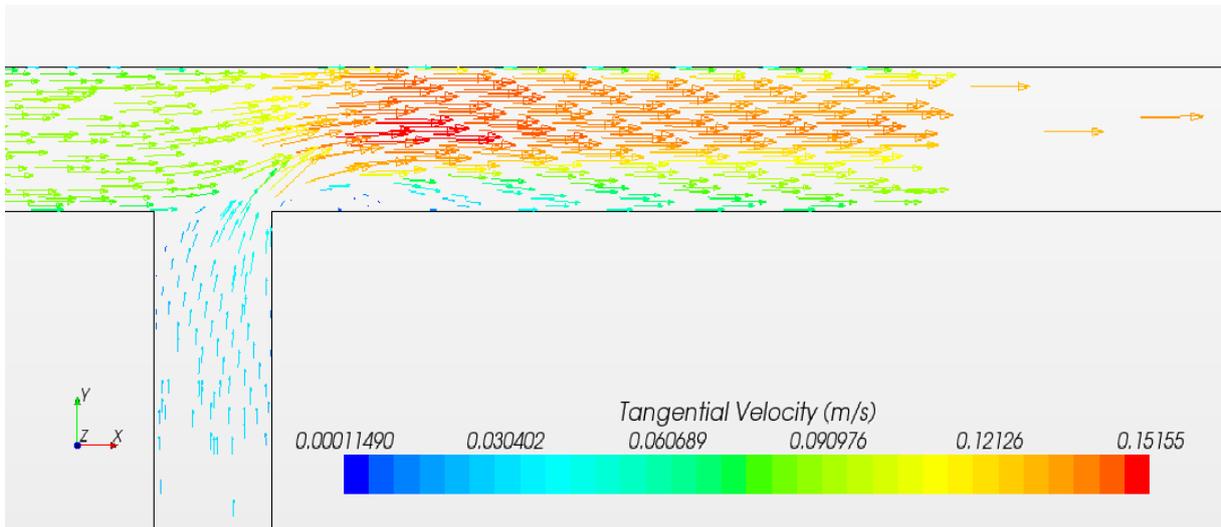


Figure 2.25 : Champ de vitesse - plan (XY), Z = 5cm

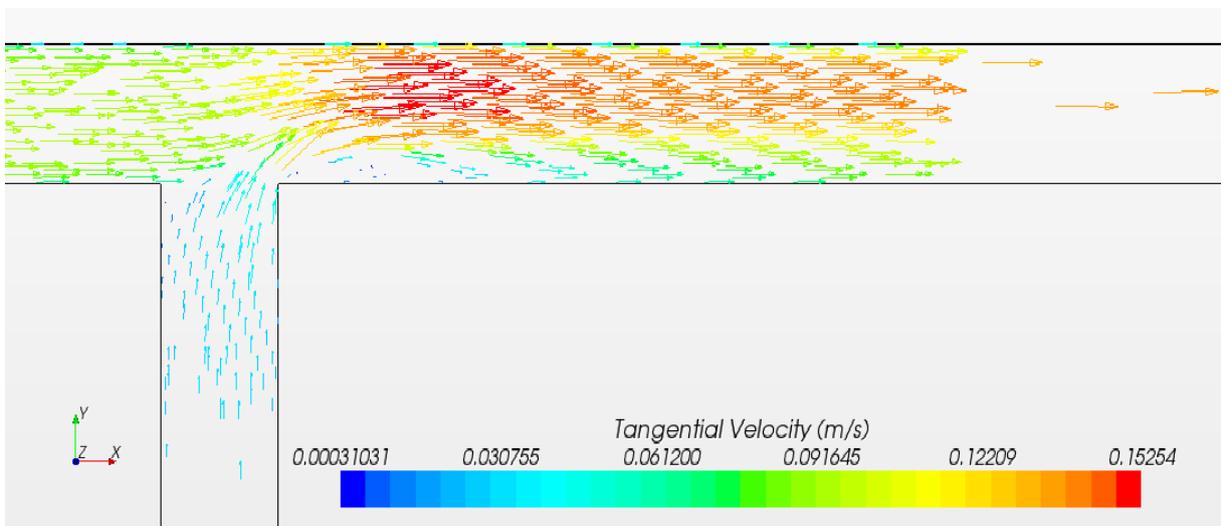


Figure 2.26 : Champ de vitesse - plan (XY), Z = 7cm

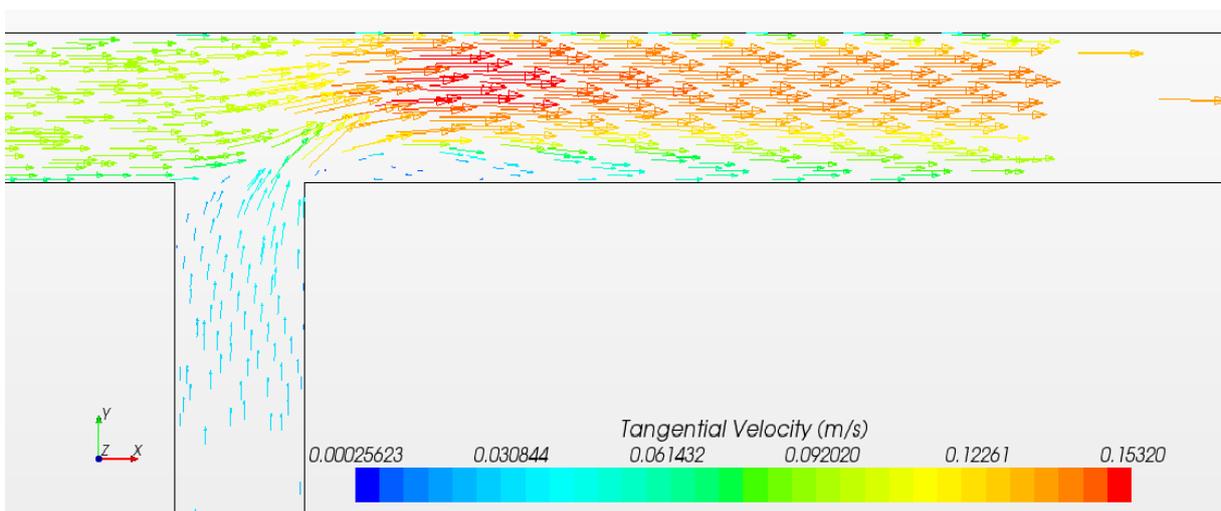


Figure 2.27 : Champ de vitesse - plan (XY), Z = 9cm

2^{eme} Cas : $Q_u = 2$ l/s et $Q_b = 2$ l/s.

Les différents résultats obtenus sont représentés ci-dessous.

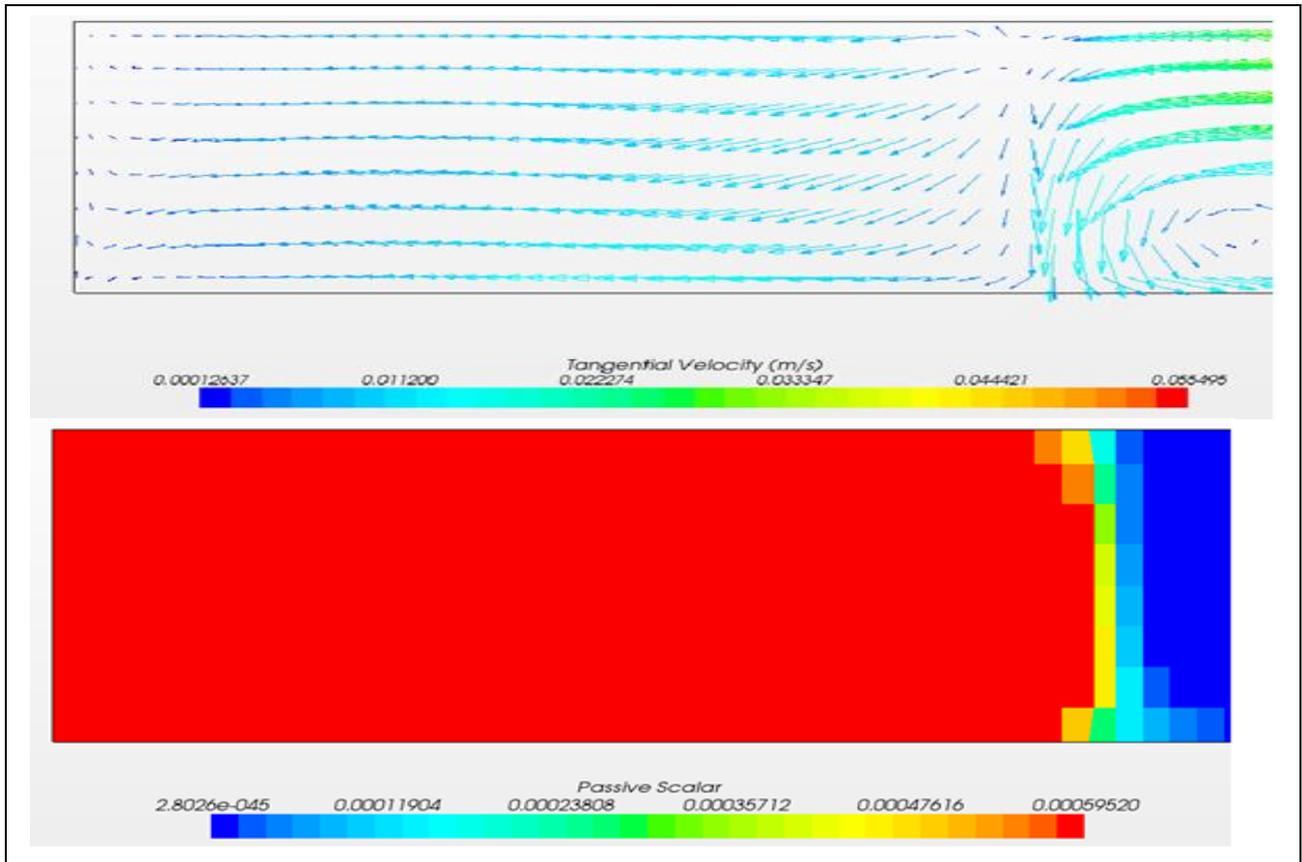


Figure 2.28 : Champ de vitesse et concentration en scalaire passif - plan (YZ), X/b= 0 ,0

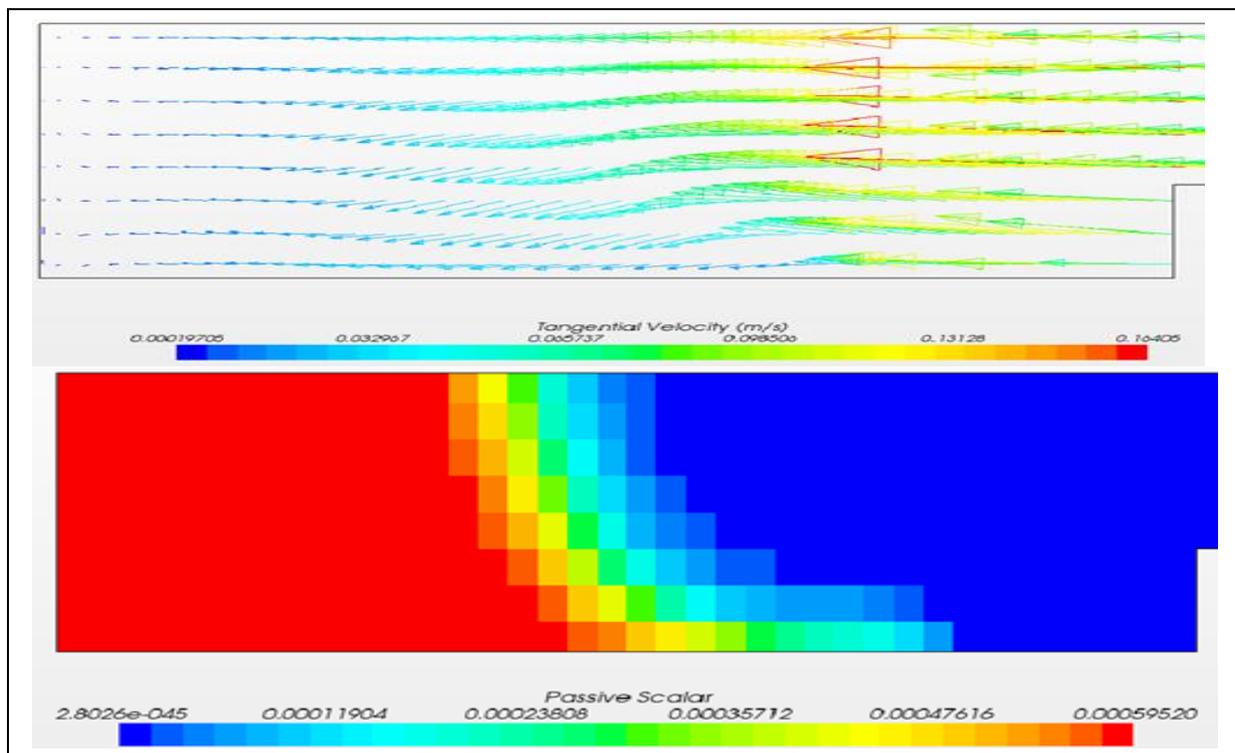


Figure 2.29 : Champ de vitesse et concentration en scalaire passif - plan (YZ), $X/b= 1,0$

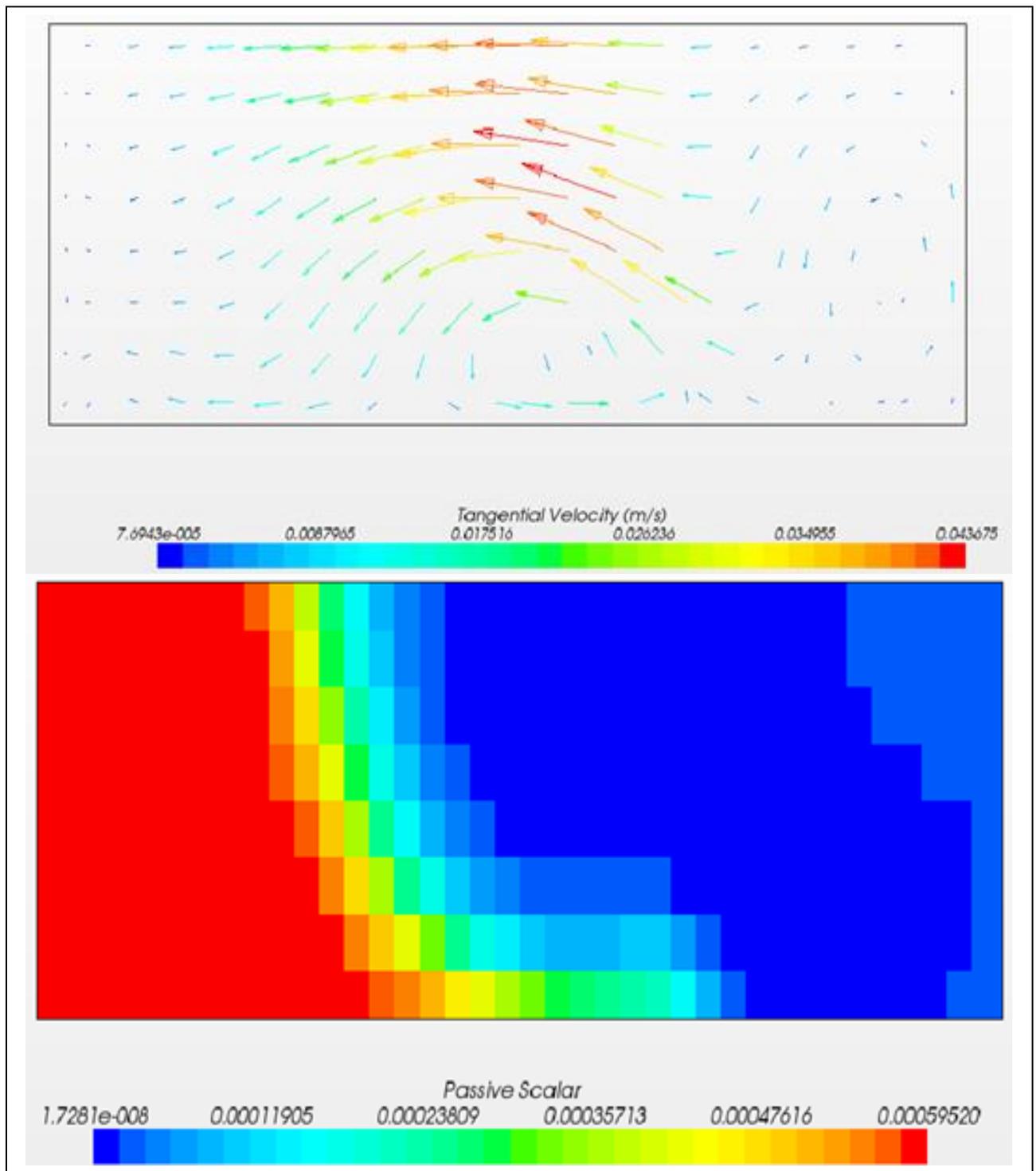


Figure 2.30 : Champ de vitesse et concentration en scalaire passif - plan (YZ), $X/b= 1,5$

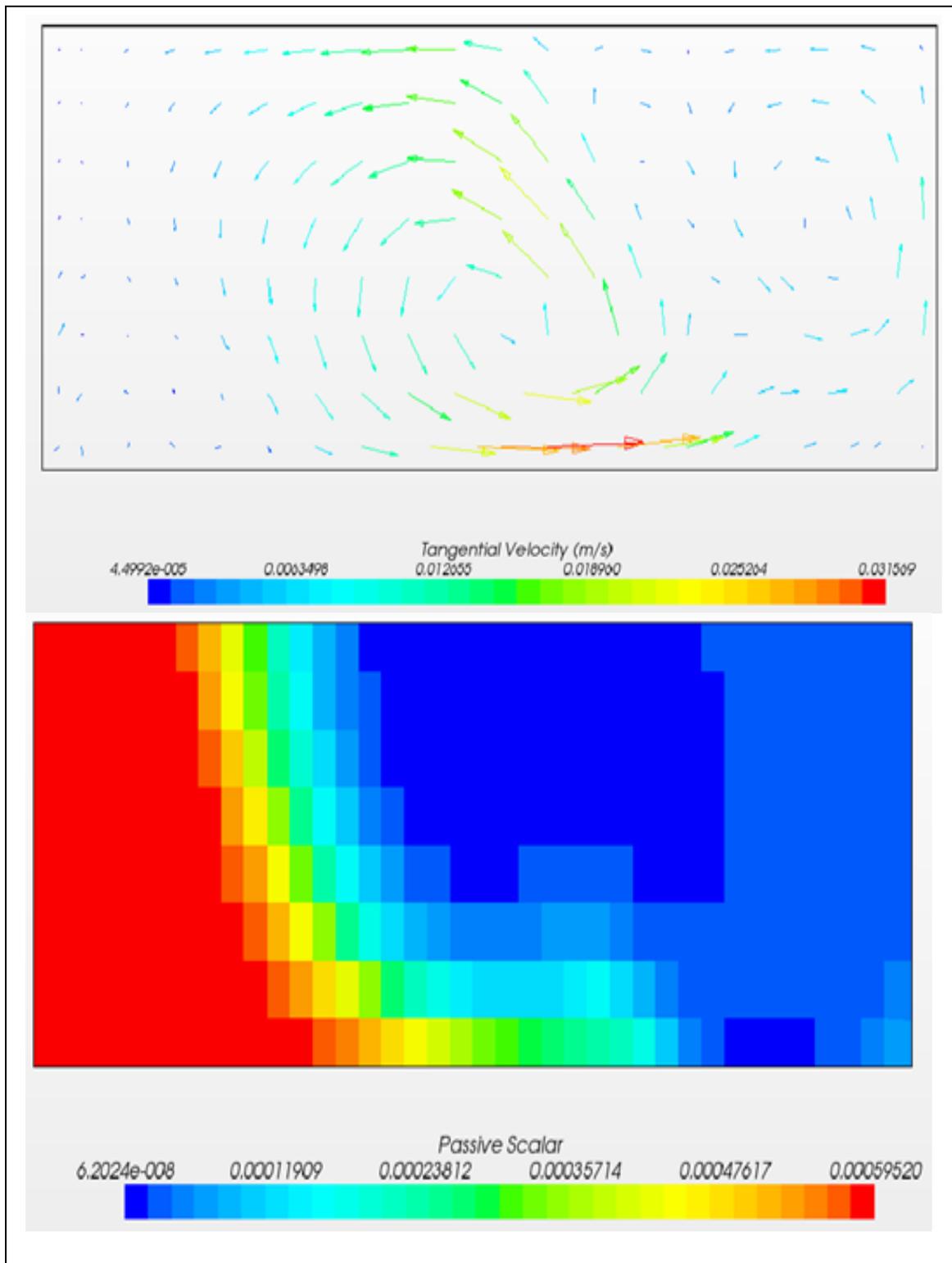


Figure 2.31 : Champ de vitesse et concentration en scalaire passif - plan (YZ), $X/b = 2,0$

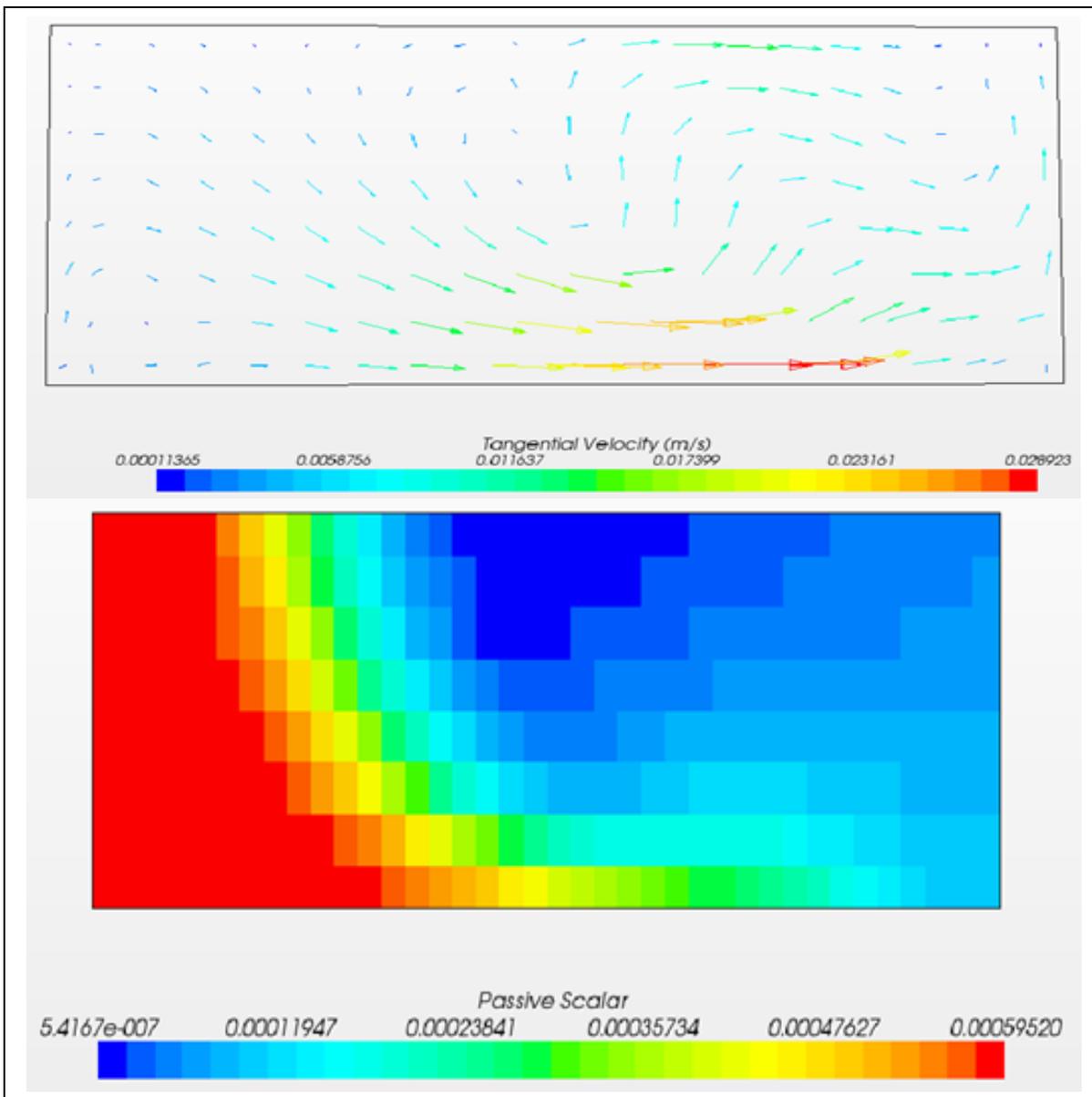


Figure 3.32 : Champ de vitesse et concentration en scalaire passif - plan $(YZ), X/b= 3,0$

Les champs de vitesses sur des différentes sections selon z sont représentés dans les figures ci-dessous :

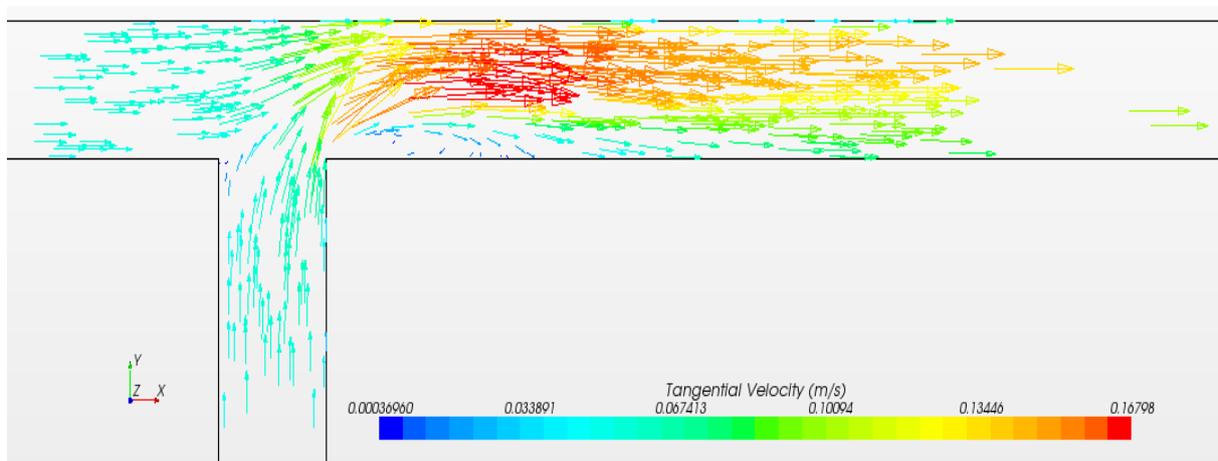


Figure 2.33 : Champ de vitesse - plan $(XY), Z = 3\text{cm}$

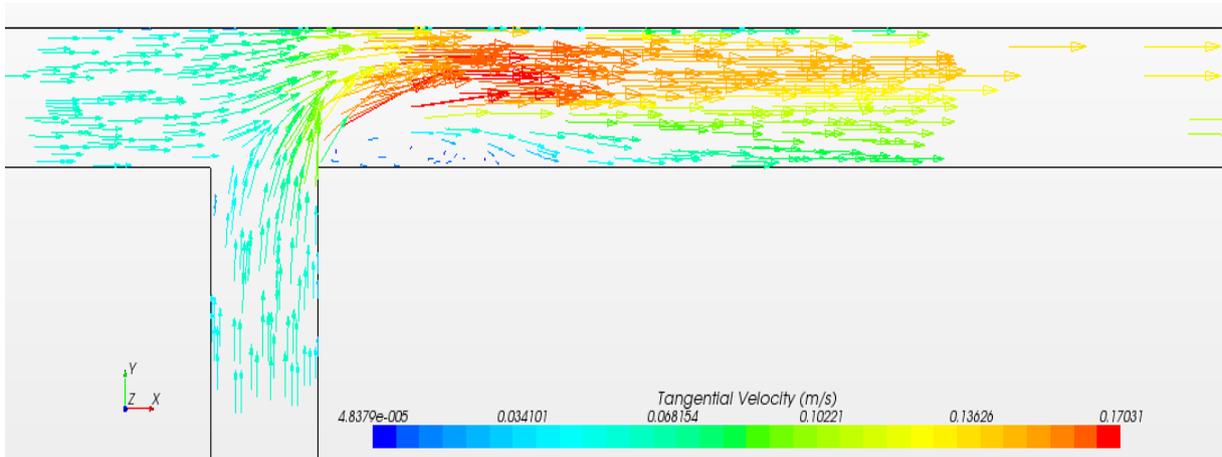


Figure 2.34 : Champ de vitesse - plan (XY), Z = 5cm

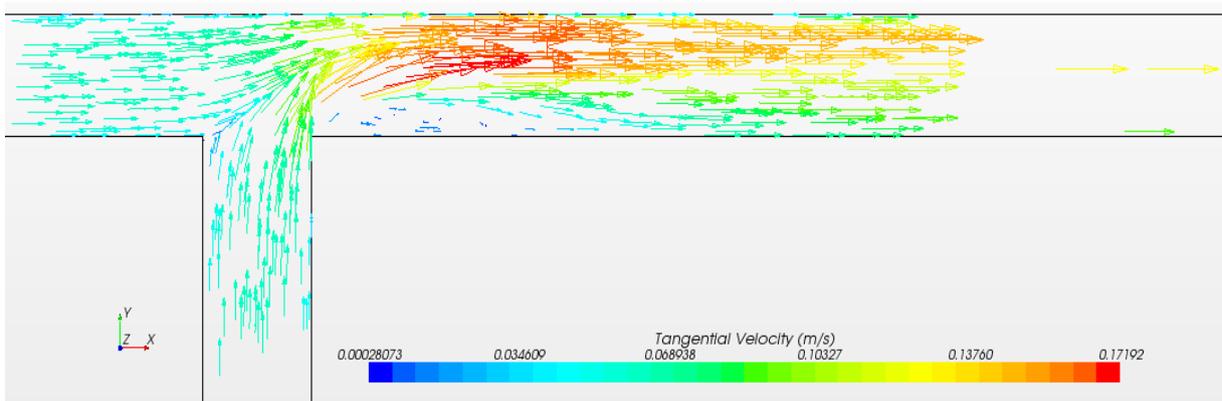


Figure 2.35 : Champ de vitesse - plan (XY), Z = 7cm

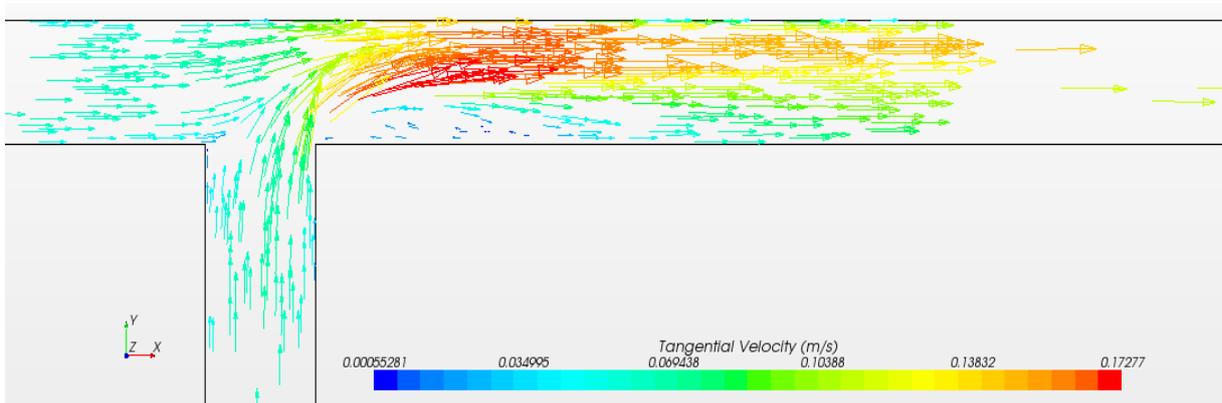


Figure 2.36 : Champ de vitesse - plan (XY), Z = 9cm

D'après les figures qu'on a obtenu pour les différents débits, on remarque que plus le débit de la pollution augmente plus sa dispersion devient lente et son homogénéisation en aval prend plus de temps mais le phénomène physique reste le même c'est-à-dire qu'il y'a des rouleaux de recirculation qui se forme comme les montres les figures et qui permettent de mélanger et homogénéiser la pollution.

En plus on remarque que plus la hauteur augmente plus la vitesse augmente parce qu'il y a l'adhérence des parois au fond et les rouleaux de recirculation qui se forment au milieu or pour la surface de dessus il y a un écoulement avec glissement.

Comme conséquence, on peut dire que le changement de débit joue beaucoup plus sur le temps et la distance nécessaires pour avoir un mélange homogène en aval.

4. Influence de la géométrie et de la pente

4.1. La géométrie

Au début on voulait faire la similitude directement mais on a trouvé un problème qui concerne la diffusivité turbulente parce qu'il n'existe pas une formule appropriée pour la jonction pour cela, on a retracé la géométrie et on a fait les simulations comme avant.

La géométrie qu'on va traiter vaut 4 fois l'ancienne géométrie (x4) et le tableau ci-dessous montre les différents résultats :

Tableau N°2-1 Paramètres selon la géométrie

	H	B	L ₁	L ₂	U _b	U _u	Q _u	Q _b	Q _t	Re _u	Re _b	Re _j
	(m)	(m)	(m)	(m)	(m/s)	(m/s)	(m ³ /s)	(m ³ /s)	(m ³ /s)			
Petite échelle(P)	0,12	0,30	2,00	2,9	0,083	0,027	10 ⁻³	3,10 ⁻³	4,10 ⁻³	22222	7407	26929
Grande échelle(G)	0,48	1,20	8,00	11,6	0,166	0,055	0,032	0,096	0,128	177778	59259	237037

De telle sorte que :

H : hauteur d'eau (m) ; B : Largeur de la jonction (m) ; L₁ et L₂ : Longueurs de premier et de deuxième tronçons respectivement (m) ; U_b et U_u : Vitesse de l'eau et de scalaire passif respectivement (m/s) ; Q_u, Q_b et Q_t : Débits d'eau et de scalaire passif et le total respectivement (m³/s) et Re_u, Re_b et Re_t : le nombre de Reynolds dans les canaux 1 et 2 et dans la jonction.

Avec,

$$Re = \frac{4UR_H}{\nu} \text{ et } R_H = \frac{HB}{2H+B}$$

Pour les grands échelles, on a essayé de faire la comparaison entre les modèles RSM et K-ε afin de voir est-ce-que le modèle RSM reste le plus fiable ou pas.

Le maillage opté pour la grande échelle (x4) est le suivant :

Nombre de mailles : 1163065 mailles avec $Y^+ \approx 50$

Jonction($x=0,0312\text{m}$ $y=0,03158\text{m}$ et $z=0,0075\text{m}$) bras1/2($x=0,0625\text{m}$ $y=0,12\text{m}$ et $z=0,03\text{m}$)

4.2. Modélisation sur StarCCM+

Après la génération de la géométrie et de maillage approprié des simulations numériques ont été faite pour voir qu'est-ce-qui ce passe au niveau des grands échelles et voir s'il y'a une différence avec les petits échelles.

Les résultats obtenus sont représentés dans les figures ci-dessous :

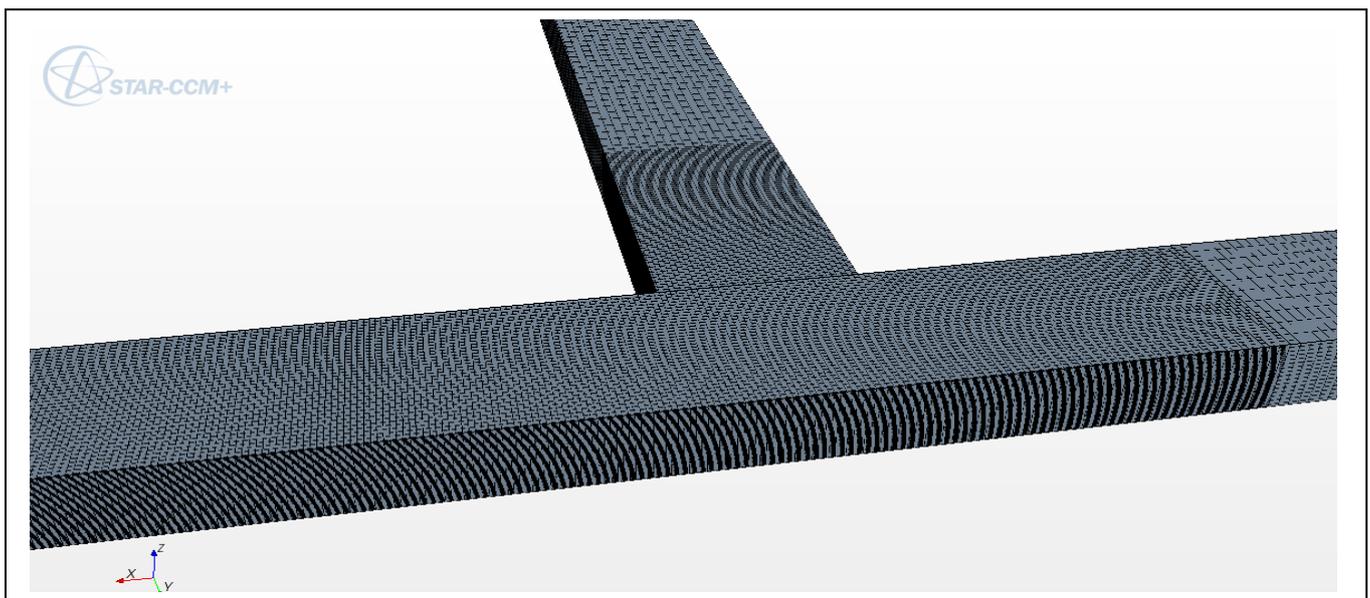


Figure 2.37 : Le maillage au niveau de la jonction.

Pour chaque distance X/b , les résultats numériques (modèle RSM/K- ϵ) pour les différentes élévations sont tracés sur un même graphe (figures 2.38 et 2.39).

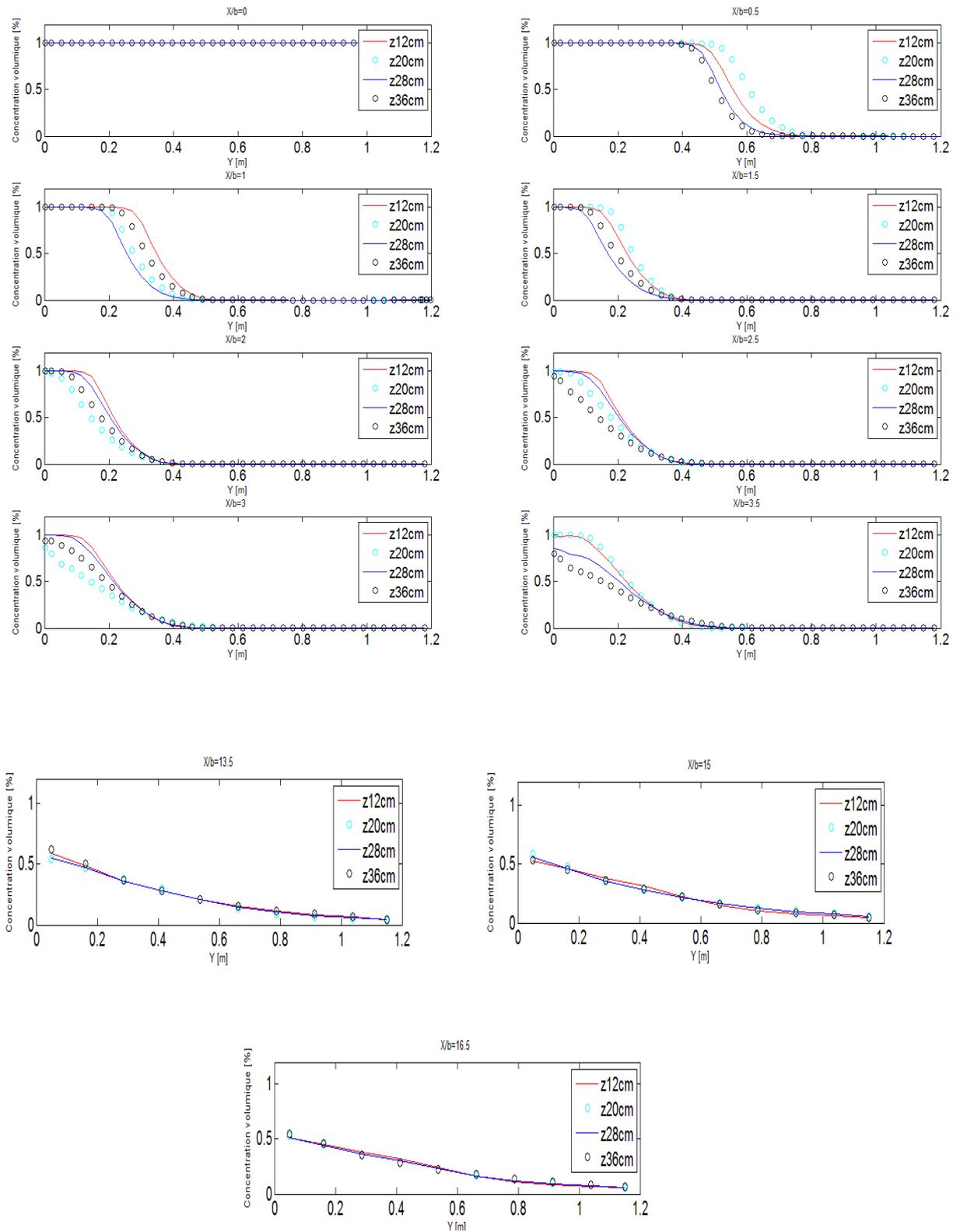


Figure 3.38 : Concentration de la soude en jonction - Résultats numériques, modèle RSM

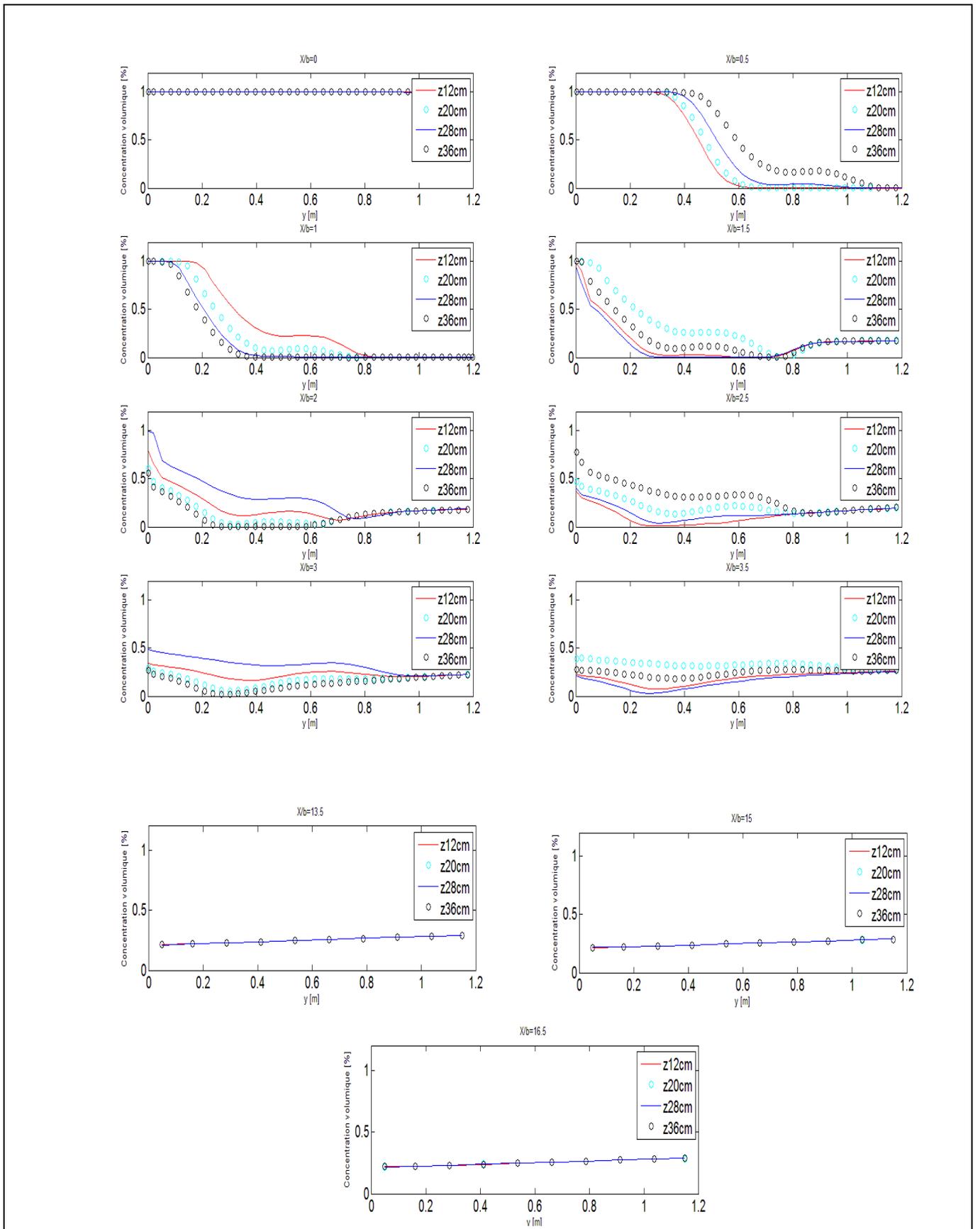


Figure 2.39 : Concentration de la soude en jonction - Résultats numériques, modèle K- ϵ

D'après ces résultats on voit bien que l'homogénéisation de la pollution à travers les différentes altitudes et pour les différentes valeurs de X/b se fait d'une manière remarquable pour le modèle RSM que pour $K-\epsilon$.

Maintenant on va exposer quelques résultats qui permettent la comparaison entre les résultats expérimentaux et les modèles RSM pour les petites échelles (RSM_p) et RSM pour les grandes échelles (RSM_g) d'un côté, et de l'autre côté on compare les résultats expérimentaux et ceux de RSM_p avec les résultats obtenus par le modèle $K-\epsilon_g$.

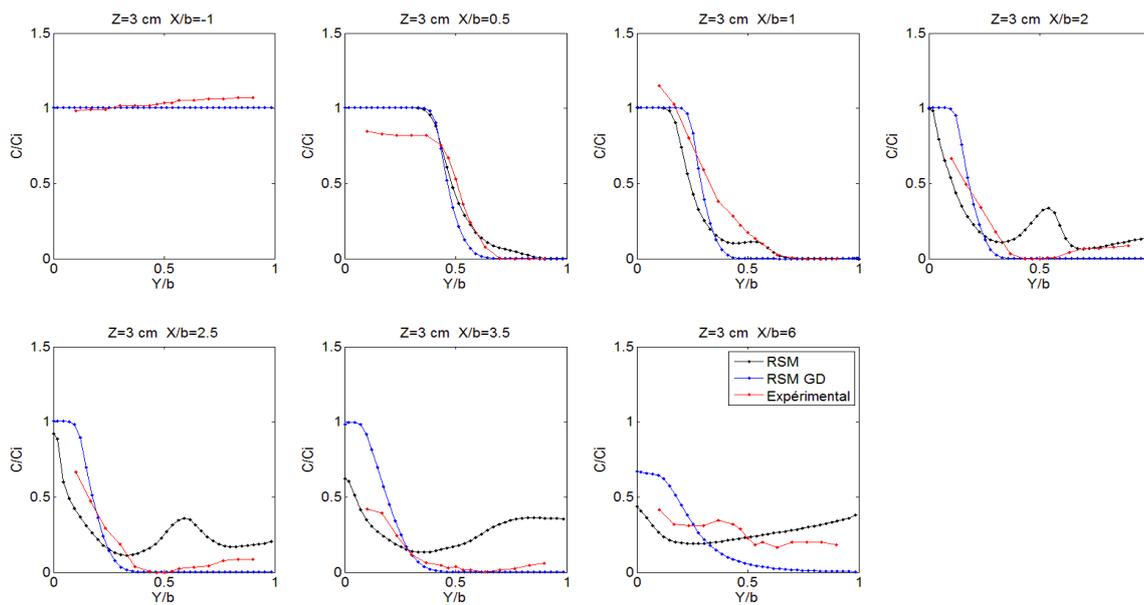


Figure 2.40 : Comparaison de modèle $RSM_p/RSM_g/Exp$ $Z_p=3$ cm - $Sct=0.7$

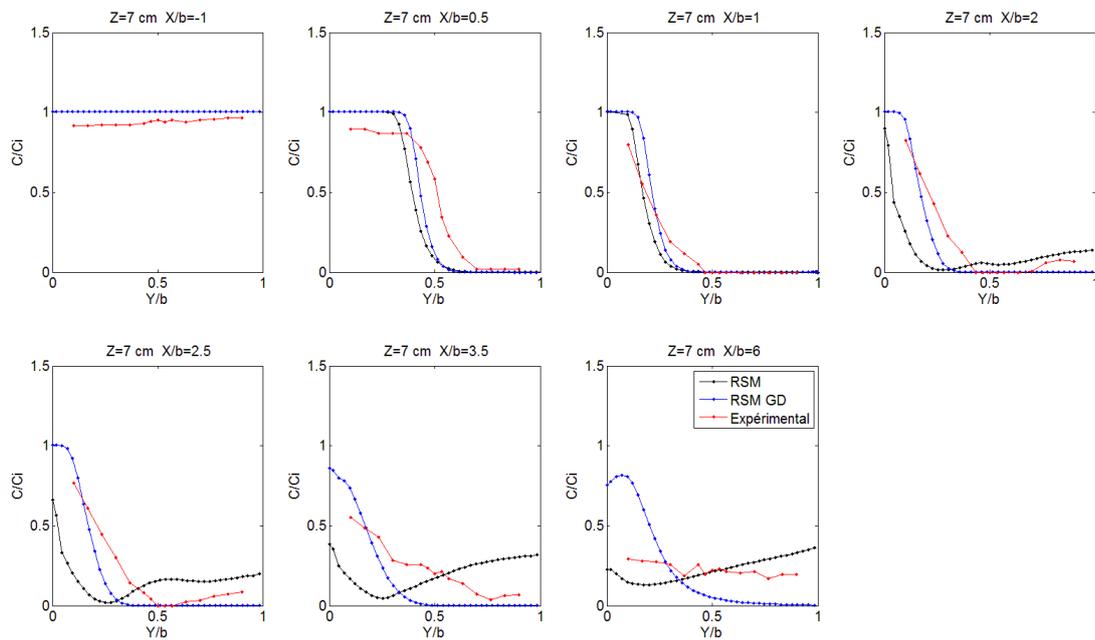


Figure 2.41 Comparaison de modèle RSM_p/RSM_g/ExpZ_p=5 cm –Sct = 0,7

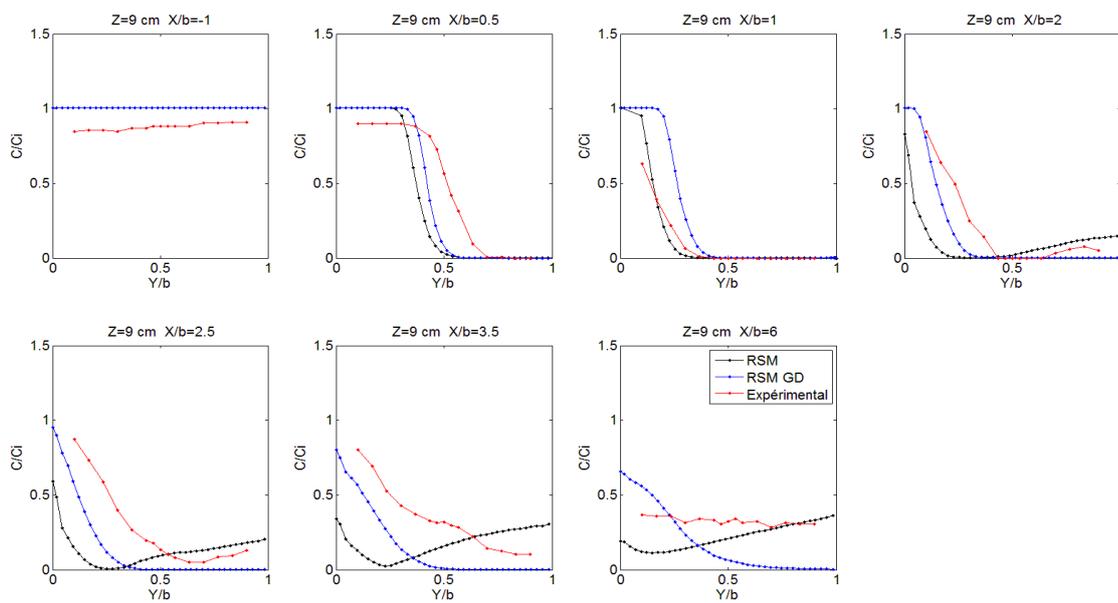


Figure 2.42 Comparaison de modèle RSM_p/RSM_g/ExpZ_p=7 cm - Sct=0,7

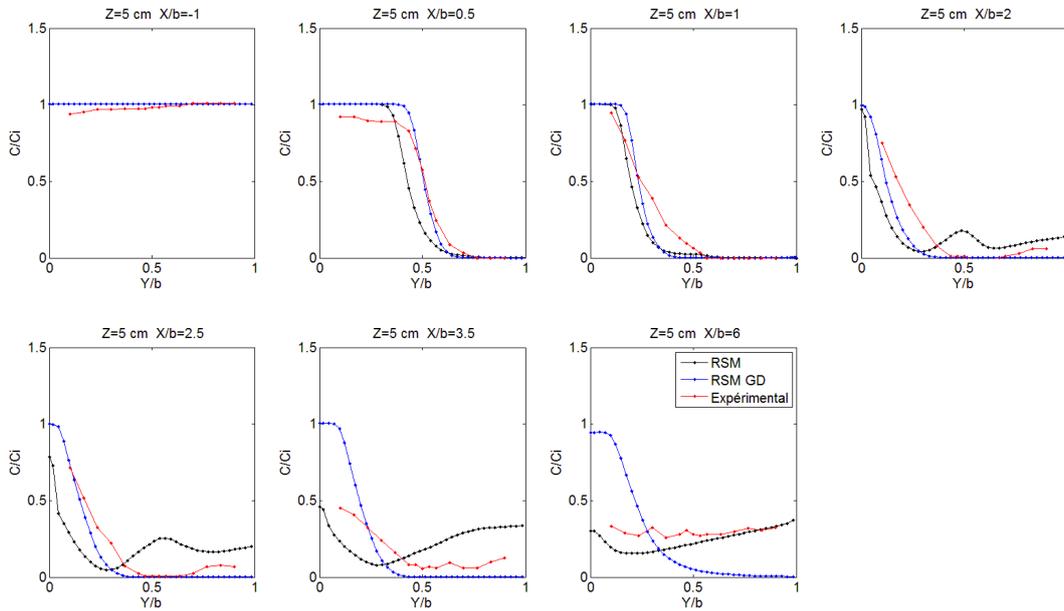


Figure 2.43 : Comparaison de modèle $RSM_p/RSM_g/ExpZ_p=9\text{ cm}$ – $Sct = 0,7$

D’après ces résultat, on remarque que les résultats obtenus par RSM_g sont plus proche des résultats expérimentaux par rapport à RSM_p ce qui permet l’application de ce modèle sur les grands échelles.

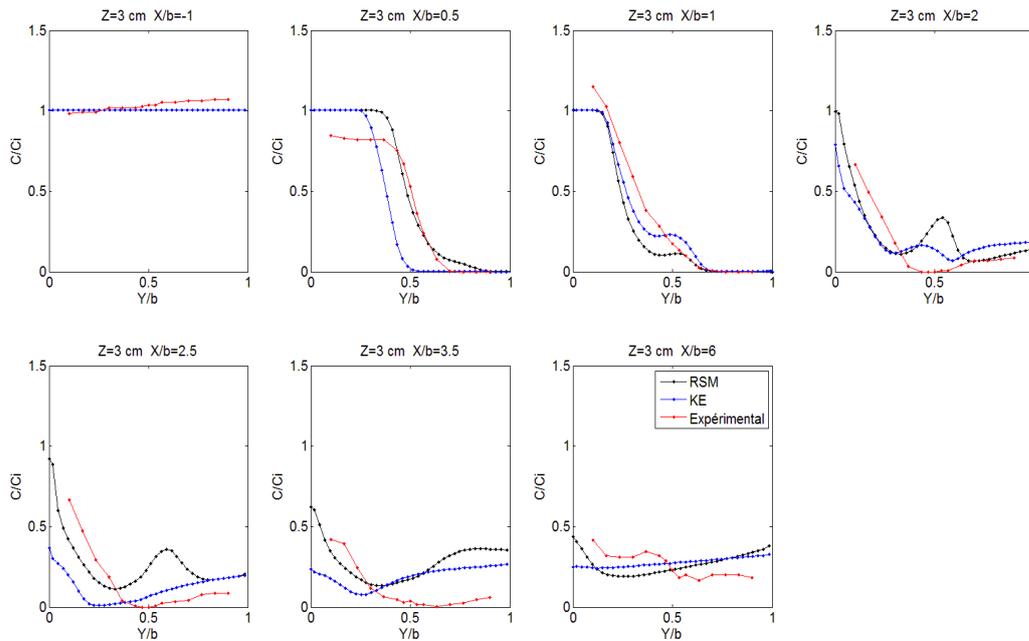


Figure 2.44 : Comparaison de modèle $RSM_p/K-\epsilon_g/ExpZ_p=3\text{cm}$ – $Sct = 0,7$

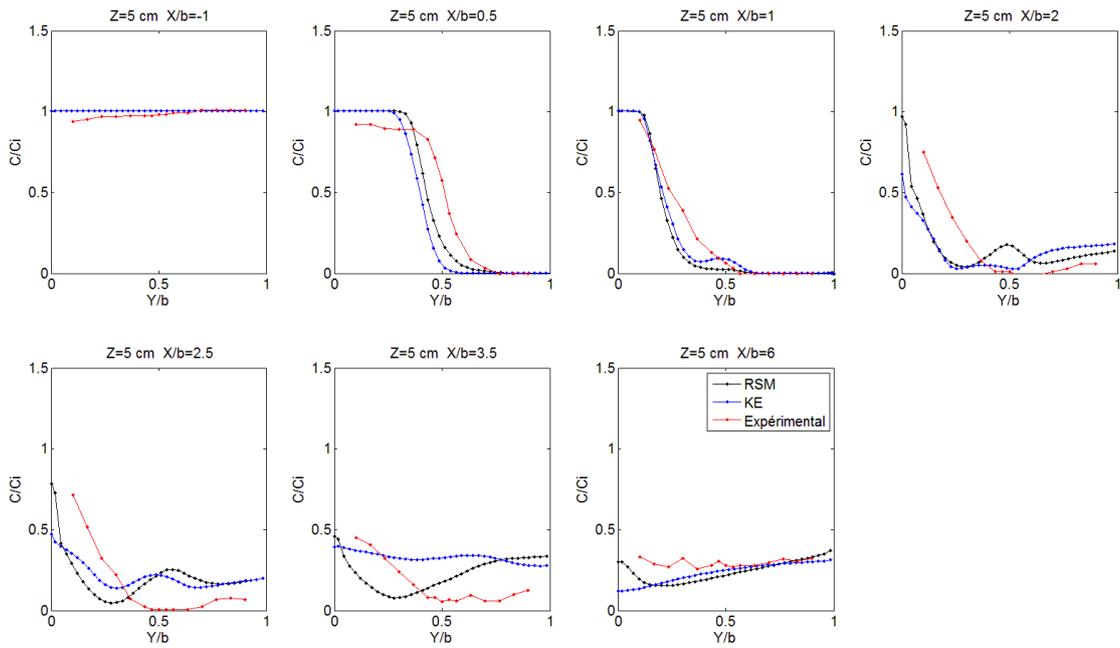


Figure 2.45 : Comparaison des modèles RSM_p/K-ε_g/Exp Z_p = 5 cm – Sct = 0,7

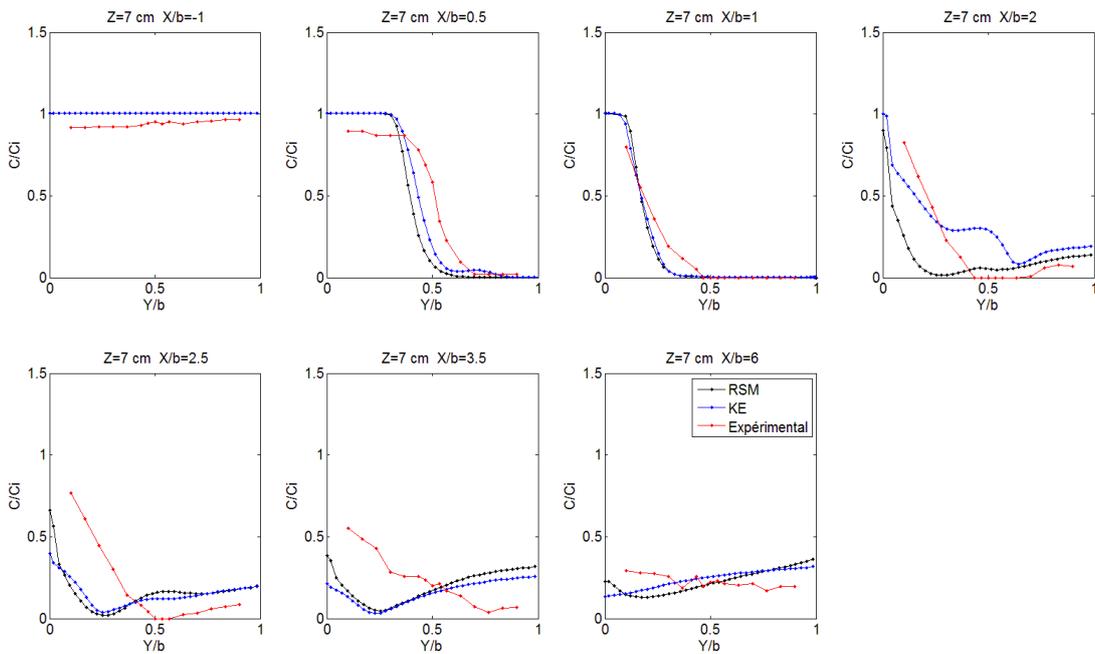


Figure 2.46 : Comparaison des modèles RSM_p/K-ε_g/Exp Z_p = 7 cm – Sct = 0,7

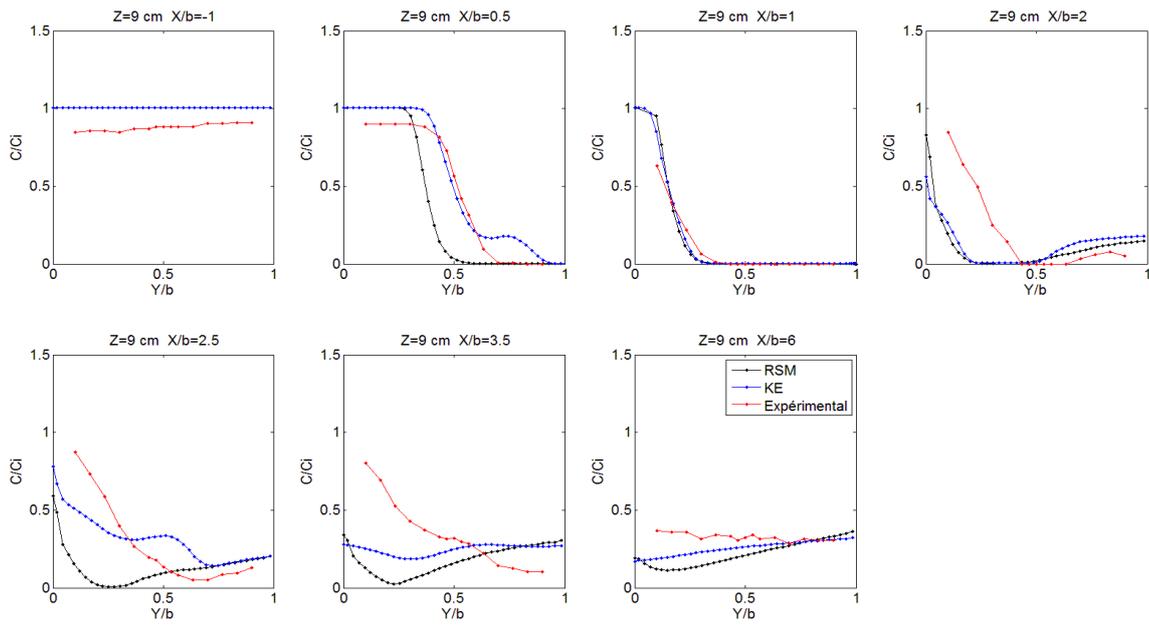


Figure 2.47 Comparaison de modèles RSM_p/K-ε_g/Exp Z_p= 9cm - Sct = 0,7

D'après ces résultats, on voit bien que le K-ε_g converge beaucoup plus vers les résultats expérimentaux par rapport à RSM_p.

Comme conclusion on peut dire que pour les grands échelles on peut appliquer les deux modèles K-ε ou bien RSM.

4.3. La pente

Afin de connaître l'effet de la pente sur la dispersion de pollution et sur le mélange et qui exprime la réalité parce que les écoulements dans les réseaux d'assainissement s'effectuent d'une manière gravitaire, il a été proposé de garder la même géométrie qu'avant mais cette fois-ci en rajoutant une petite pente de 0,5‰ sur tout le canal et voir son influence.

La première chose remarquée concerne la surface de dessus qui ne devient plus parallèle à celle du fond et donc les hauteurs d'eau ont changé grâce au changement dû à la pente (Graf,[5]).

Le tableau ci-dessous montre les différentes hauteurs normales et les différents nombre de Reynolds dans les différentes branches de la jonction.

Tableau N° 2-1 : Caractéristiques de l'écoulement

H _n (m)	Rh(m)	Q(m ³ /s)	λ	Ks	Re
0,220	0,161	0,128	0,026871	73,270	312195,10

0,181	0,139	0,096	0,028032	73,499	245764,40
0,088	0,077	0,032	0,033723	73,890	92907,12

Pour les calculs après on va prendre un $K_s = 73.5$ avec une rugosité de $r = 0.002m$.

Les hauteurs d'eau dans les canaux ont été calcul via la formule suivante :

$$\frac{dh}{dx} = \frac{i - \left(\frac{Q^2(2h+b)^{\frac{4}{3}}}{K^2(hb)^{\frac{10}{3}}} \right)}{1 - \left(\frac{Q^2}{gh^3b^2} \right)} \quad (2.1)$$

$$h = h_0 - \frac{dh}{dx} dx \quad (2.2)$$

Avec, i : la pente 0.5‰ ; h_0 : la hauteur normale dans le tronçon aval et est égale à 0.22m

Et les résultats obtenus sont représenté dans les figures ci-dessous :

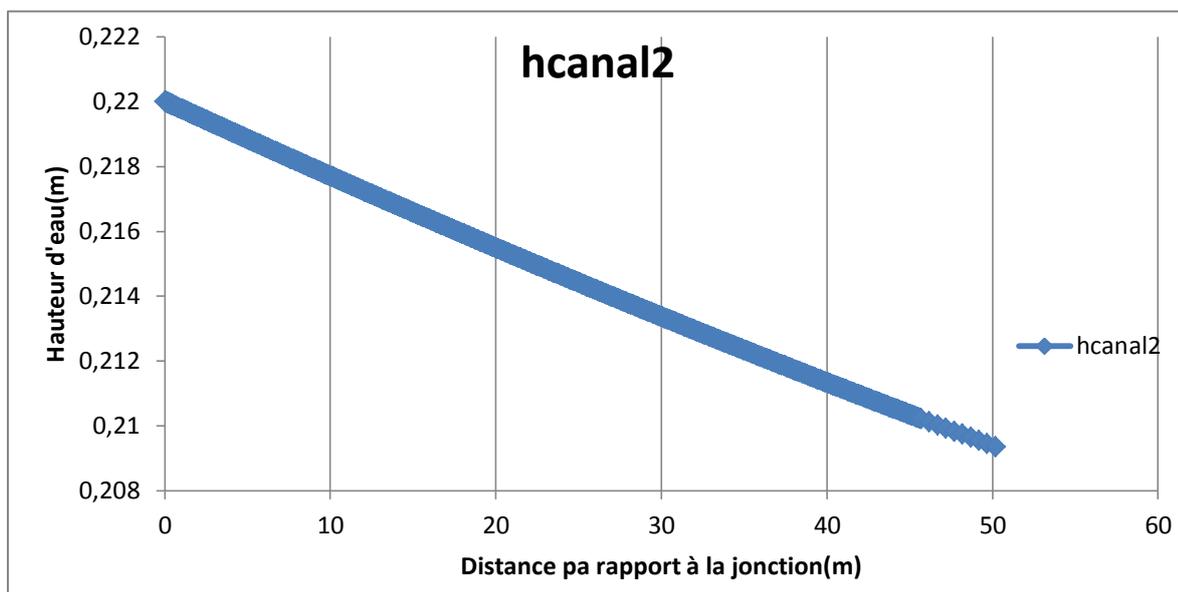


Figure 2.48 : La hauteur d'eau en fonction de la distance dans le deuxième canal

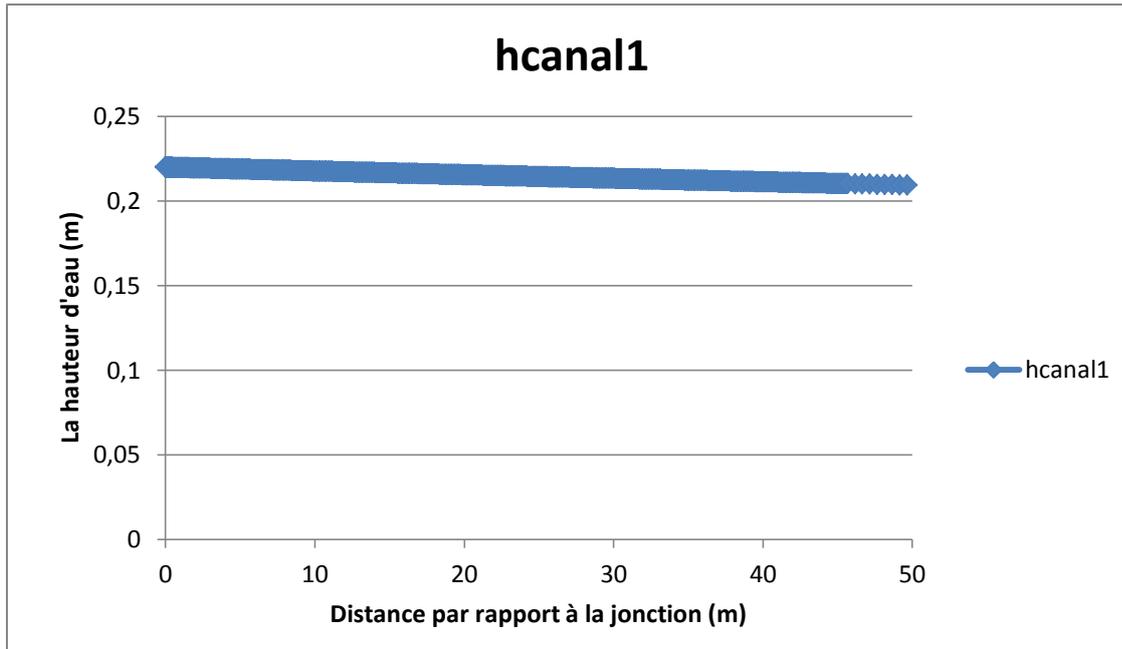
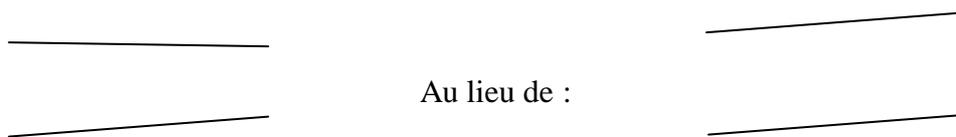


Figure 2.49 : La hauteur d'eau en fonction de la distance dans le premier canal

Après avoir lancé les simulations, on a constaté que si on prend en considération les hauteurs normales ça nous donne des résultats qui représentent beaucoup plus ce qui se passe en réalité.



Conclusion

D'après toute l'étude qui a été faite au niveau de la jonction on peut dire que le maillage grossier et le maillage fin n'ont pas donné des résultats très différents et on peut même dire qu'ils sont semblables quelque soit pour le modèle RSM ou bien pour K-ε.

Pour la fiabilité des modèles, on a trouvé qu'à la limite le modèle RSM est un peu plus fiable par rapport à K-ε mais la différence n'est pas très grande. En plus, on a vu qu'il faut prendre en considération l'effet de la pente sur la hauteur d'eau pour la génération de la géométrie et donc pour les simulations.

Pour cela, on peut dire que le maillage grossier est validé pour la jonction donc on peut l'appliquer sur le réseau avec un modèle de K-ε pour optimiser le temps de calculs parce que le modèle RSM prend beaucoup de temps vu la longueur du réseau en question.

Chapitre 03

Partie expérimentale

(Le réseau)

Chapitre 3

Partie réseau

Introduction

Après l'étude de la jonction simple et la validation de maillage grossier on passe maintenant à un problème plus grand au niveau géométrique et plus complexe au niveau de l'étude.

Comme première approche on a décidé de faire une simulation numérique en 3D parce qu'il est très difficile de suivre la pollution dans un réseau d'assainissement directement sur le terrain.

Vu la dimension de notre réseau et les résultats obtenus précédemment au niveau de la jonction dans cette partie de projet on prend en considération un maillage grossier et un modèle K- ϵ pour optimiser le temps de calcul.

Dans ce chapitre on a suivi une démarche appropriée et on a fait plusieurs simplifications vu la complexité de problème afin qu'on puisse faire la simulation en 3D de la pollution qui est un passif scalaire dans le réseau d'assainissement de Saint-Priest (seulement le séparatif) à l'aide de logiciel de CFD Star-CCM+. Pour cela on a mis en place plusieurs capteurs qui permettent la détermination de la concentration de la pollution aux différents endroits le long de notre réseau et sur la surface aval.

La problématique qui se pose est : Est-ce qu'on peut remonter en amont et déterminer la source de la pollution à partir des résultats obtenus en aval ?

1. Récupération des données

Afin qu'on puisse faire notre étude il y'a toute une démarche à suivre et on va citer les différentes étapes :

1.1. Récupération de la carte de la zone d'étude :

On a pris une zone où les diamètres sont plus ou moins grand afin qu'on puisse faire la simulation parce qu'en premier temps on a pris la zone amont et on a vu que les hauteurs d'eau sont de l'ordre de millimètre parce que le réseau est séparatif pour cela on a changé de zone et on a pris un endroit où il y a beaucoup de population et le réseau principale de la ville pour avoir des hauteurs d'eau qui peuvent être simulés par la suite. Les données récupérées sont les diamètres et les pentes de tout le réseau.

La zone d'étude est montrée dans la figure ci-dessous.

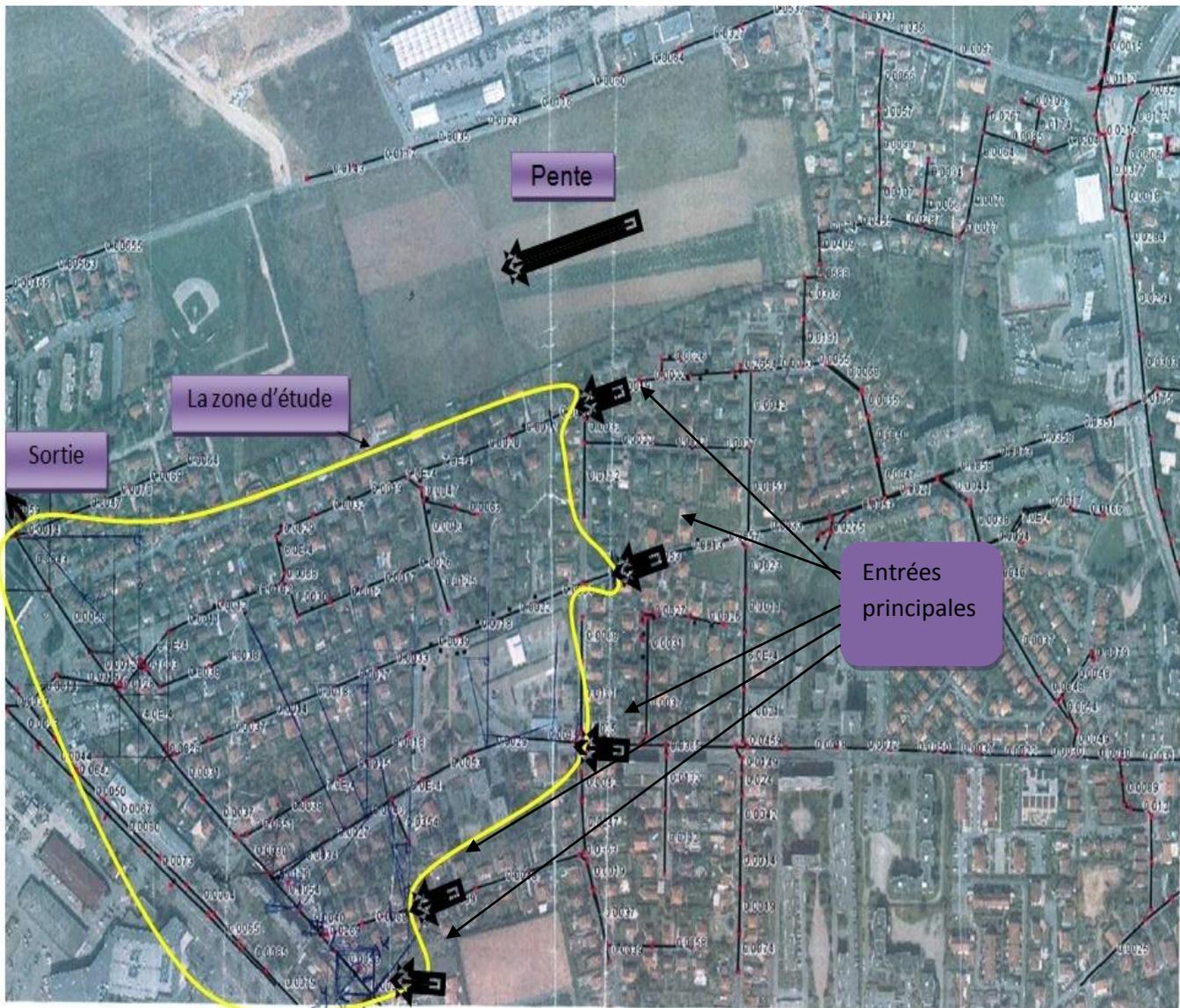


Figure 3.1 : La carte de la zone d'étude.

1.2. Positionner les différentes entrées et les longueurs des conduites

Le logiciel Google-Earth a été utilisé pour mettre le réseau sur la carte et déterminer les différentes coordonnées des points d'entrée de la pollution le long de ce dernier. En plus il permet la mesure des différentes longueurs des conduites.

1.3. Estimation de nombre de maison dans chaque entrée

Comme la zone est très grande on a rétréci le domaine d'étude à une surface de 1 Km²; en faisant cette simplification on était obligé d'estimer le nombre de maison qui jettent dans chaque entrée quelque soit le type d'entrée principale ou latérale ce qui nous permet l'estimation de débit par la suite.

La figure 3.2 montre les différentes entrées et le nombre de maison correspondant.

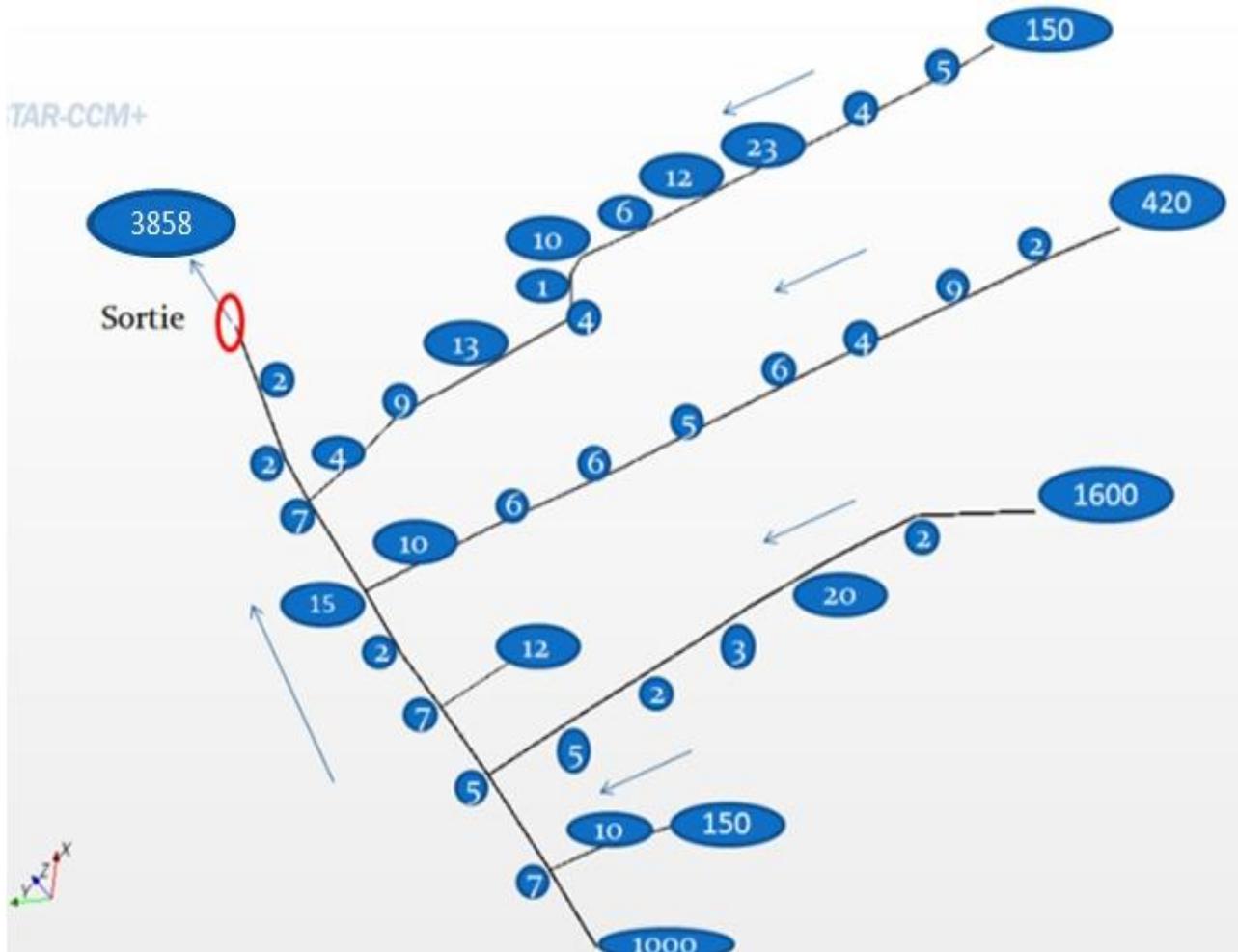


Figure 3.2 : Les différentes entrées et le nombre de maison correspondant

1.4. Estimation de débit à chaque entrée

Pour cette étape on a fait l'estimation qu'il y'a 4 individus par maison avec un débit journalier d'entrée de $Q_{rej}=150$ l/j/habitant donc le débit moyen d'une entrée sera :

$$Q_m = Q_{rej} * 4 * \text{nbre de maison} / (24 * 3600) \quad (l/s)$$

Les calculs de débit ont été faits pour deux débits :

- Débit à midi = Débit moyen
- Débit à 9.00 = 3 * débit moyen

Comme 9.00h est considéré comme une heure de pointe alors on lui a attribué un coefficient de pointe de telle façon que $C_p=3$.

2. Hypothèses et simplifications

2.1. Simplification des profils

Afin d'éviter de compliquer la génération de la géométrie et le maillage par la suite la forme des profils des conduites a été changé et on a passé de la section ovoïdale à une section rectangulaire en gardant la même largeur de miroir

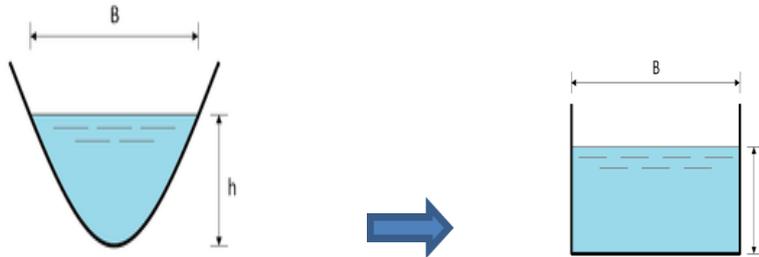


Figure 3.3 : Simplification de profil

- Dans certaines intersections avec le réseau principal quelque valeur de pente ont été réduite pour éviter le phénomène de ressaut hydraulique qui pose un autre problème pendant la simulation.

2.2. Rigid-lid

La surface de dessus a été traité par un Rigid-lid c'est-à-dire qu'on a considéré que l'écoulement s'effectue en charge avec un glissement sur la surface de dessus parce que les hauteurs d'eau est rectiligne donc il n'y a pas formation de vagues qui peuvent nous poser un problème vu le volume d'eau transporté.

En plus, la condition VOF c'est-à-dire que l'écoulement s'effectue à surface libre prend beaucoup de temps pour la convergence des calculs la raison pour laquelle on l'a évité.

Cette étape à son tour contient plusieurs sous-étapes :

- Le calcul des hauteurs normales dans chaque tronçon de réseau via:

$$h = \frac{Q^{\frac{2}{3}}(b+2h)^{\frac{1}{3}}}{b(8gi)^{1/3} \left[-2 \log \left[\frac{r(b+2h)}{3.7*4bh} + \frac{2.5lv(b+2h)^{3/2}}{4\sqrt{8gib^3h^3}} \right] \right]^{2/3}} \quad (3-1)$$

- Le calcul des lignes d'eau dans chaque tronçon via les formules (2-1) et (2-2).

- Une fois les hauteurs sont calculées, on passe à la génération de la géométrie sous le logiciel Gambit.

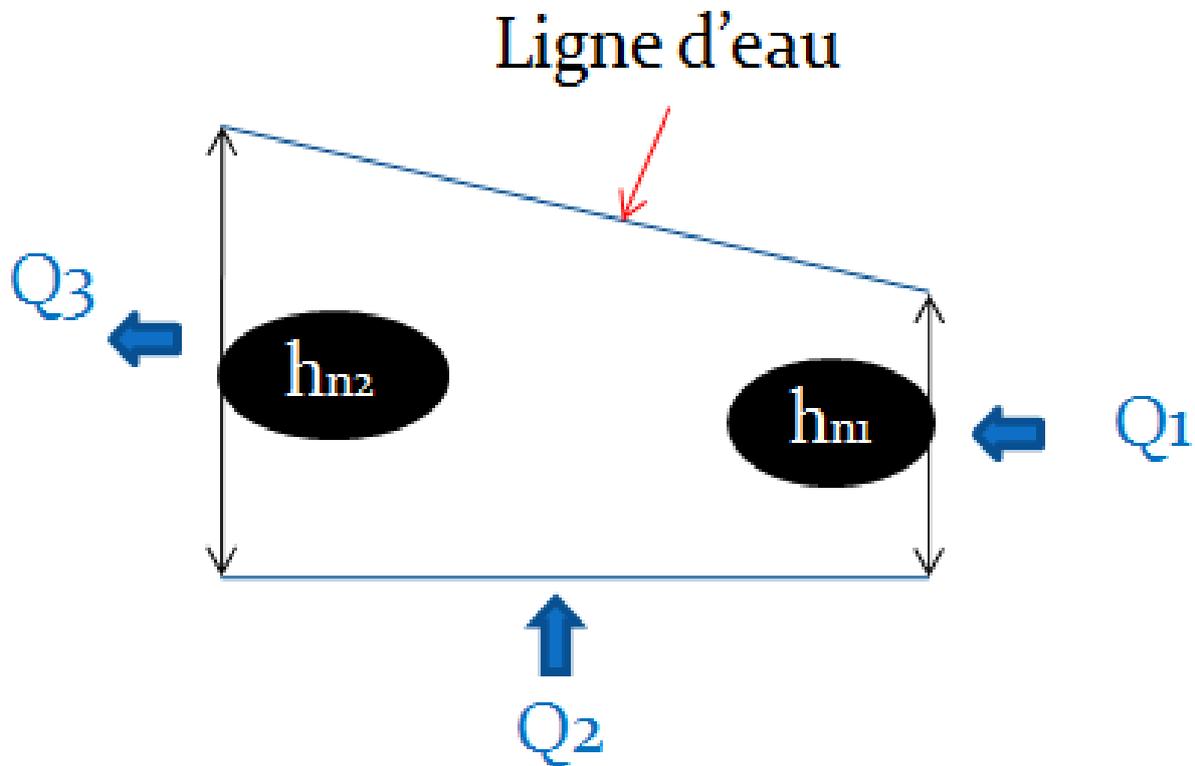


Figure 3.4 : Génération de la géométrie

3. Génération de maillage :

Le maillage est généré par le logiciel Gambit et d'après les résultats obtenus au niveau de la jonction le maillage opté est grossier de telle façon que :

Le nombre total de maille est de 1100000 mailles (au moyenne 4 mailles par hauteur et 8 mailles par largeur).

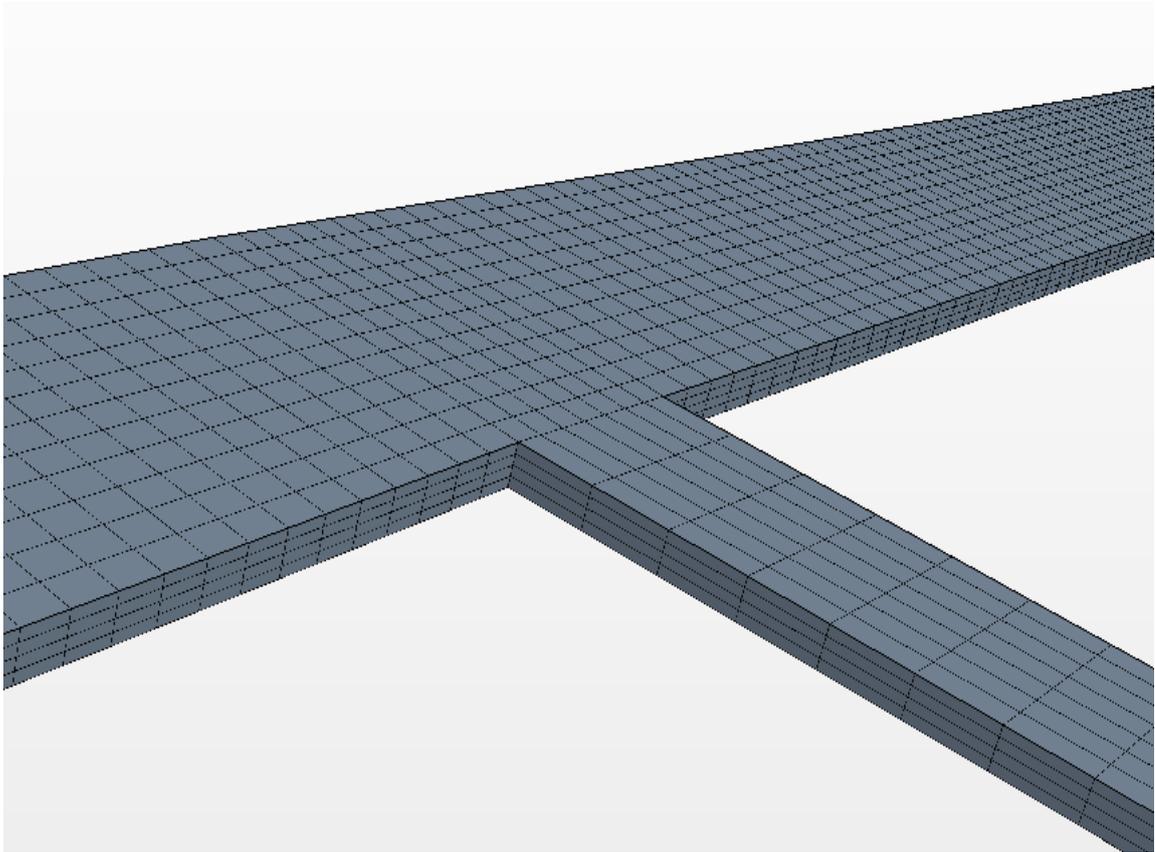


Figure 3.5 : Le maillage dans une jonction de réseaux

Les tableaux ci-dessous résument toutes les données utilisées dans les différentes étapes d'étude :
 Le tableau 3-1 représente : nombre de : maison/les diamètres /les pentes et les débits midi et à 9h.

Tableau N°3-1 : les débits Q9 et Q12 les pentes et les différents diamètres

N_{CONDUITE}	Nombre _{maisons}	D (m)	$A_{\text{EQUIV}} (m^2)$	pente	Q12h (m3/S)	Q9h (m3/S)
1—2	1000	1.08	0.9568	0.0033	0.0069	0.0208
11—12	150	0.40	0.3544	0.0068	0.0010	0.0031
12—2	160	0.40	0.3544	0.0068	0.0011	0.0033
2—3	1171	1.08	0.9569	0.0047	0.0081	0.0244

13—14	1600	1.00	0.8860	0.0029	0.0111	0.0333
14—15	1602	1.00	0.8860	0.0053	0.0111	0.0334
15--16	1622	1.00	0.8860	0.0008	0.0113	0.0338
16--17	1625	1.00	0.8860	0.0048	0.0113	0.0338
17--18	1627	1.00	0.8860	0.003	0.0113	0.0339
18--3	1633	1.00	0.8860	0.0034	0.0113	0.0340
3--4	2810	1.08	0.9569	0.003	0.0195	0.0585
19--4	12	0.20	0.1772	0.0038	8.33E-05	0.0002
4--5	2830	1.08	0.9569	0.0038	0,0196	0.0589
5--6	2834	1.08	0.9569	0.0031	0,0197	0.0590
20--21	420	1.00	0.8860	0.0034	0,0029	0.0087
21--22	422	1.00	0.8860	0.0022	0,0029	0.0088
22--23	433	1.00	0.8860	0.0018	0.0030	0.0090
23--24	437	1.00	0.8860	0.0039	0.0030	0.0091
24--25	443	1.00	0.8860	0.0033	0.0031	0.0092
25--26	448	1.00	0.8860	0.0027	0.0031	0.0093
26--27	454	1.00	0.8860	0.0018	0.0031	0.0095
27--28	460	1.00	0.8860	0.0014	0.0032	0.0096
28--6	470	1.00	0.8860	0.0034	0.0033	0.0098
6--7	3319	1.08	0.9569	0.0004	0.0230	0.0691
29--30	150	0.60	0.5316	0.0012	0.0010	0.0031
30--31	155	0.60	0.5316	0.0020	0.0011	0.0032
31--32	159	0.60	0.5316	0.0007	0.0011	0.0033

32--33	182	0.60	0.5316	0.0019	0.0013	0.0038
33--34	199	0.60	0.5316	0.0032	0.0014	0.0041
34--35	205	0.60	0.5316	0.0029	0.0014	0.0042
35--36	215	0.80	0.7088	0.0006	0.0015	0.0045
36--37	216	0.80	0.7088	0.0068	0.0015	0.0045
37--38	220	0.80	0.7088	0.0012	0.0015	0.0046
38--39	233	0.80	0.7088	0.0011	0.0016	0.0048
39--40	245	0.80	0.7088	0.0008	0.0017	0.0051
40--7	250	0.80	0.7088	0.0012	0.0017	0.0052
7--8	3576	1.08	0.9569	0.0019	0.0248	0.0745
8--9	3580	1.08	0.9569	0.0053	0.0248	0.0746
9--10	3585	1.08	0.9569	0.0043	0.0249	0.0747

Le tableau 3-2 représente le passage de la forme rectangulaire vers la forme ovoïdale

Tableau N°3-2 : Passage à l'ovoïde

coef A	Θ	$A*\theta^{(2/3)}$	H_0	H	Lmiroir
0.079	1.138	0.086	0.086	0.085	0.582
0.117	1.252	0.136	0.136	0.038	0.234
0.125	1.076	0.131	0.066	0.028	0.205
0.078	1.133	0.085	0.085	0.084	0.579
0.166	1.365	0.205	0.205	0.112	0.631
0.123	1.267	0.144	0.144	0.097	0.592
0.321	1.611	0.441	0.441	0.154	0.721

0.131	1.287	0.155	0.155	0.100	0.600
0.166	1.365	0.205	0.204	0.112	0.631
0.157	1.142	0.171	0.088	0.079	0.540
0.234	1.487	0.305	0.305	0.142	0.731
0.080	0.811	0.069	0.017	0.008	0.079
0.212	1.450	0.272	0.272	0.136	0.716
0.232	1.483	0.302	0.301	0.142	0.729
0.040	0.967	0.039	0.039	0.057	0.465
0.050	1.020	0.051	0.051	0.064	0.488
0.057	1.049	0.059	0.058	0.067	0.501
0.039	0.960	0.038	0.038	0.056	0.462
0.043	0.984	0.043	0.043	0.059	0.472
0.048	1.010	0.048	0.049	0.062	0.484
0.060	1.066	0.062	0.063	0.069	0.508
0.069	1.099	0.073	0.073	0.074	0.522
0.045	0.995	0.045	0.045	0.061	0.477
0.757	2.021	1.210	1.210	0.253	0.915
0.095	1.188	0.106	0.106	0.051	0.336
0.076	1.126	0.082	0.082	0.046	0.320
0.131	1.287	0.155	0.155	0.060	0.360
0.091	1.177	0.102	0.102	0.050	0.333
0.077	1.129	0.083	0.083	0.046	0.321
0.083	1.152	0.091	0.092	0.048	0.327

0.089	1.171	0.099	0.099	0.066	0.442
0.026	0.878	0.024	0.025	0.038	0.340
0.064	1.082	0.068	0.068	0.057	0.412
0.071	1.108	0.076	0.076	0.060	0.421
0.088	1.166	0.097	0.097	0.066	0.440
0.073	0.841	0.065	0.020	0.035	0.327
0.374	1.676	0.528	0.528	0.179	0.803
0.224	1.470	0.290	0.290	0.139	0.724
0.249	1.510	0.328	0.328	0.147	0.740

Le tableau 3-3 représente la hauteur normale et le nombre de Froude (à 12h et 9h) et la largeur moyenne de chaque tronçon.

Tableau N°3-3 : hauteur normale et nombre de Froude dans chaque tronçon

N_{conduite}	heqv9	Lmoy	heqv12	Fr12	Fr9
1—2	0.052	0.724	0.0263	0.51	0.59
11—12	0.028	0.220	0.0142	0.80	0.87
12—2	0.030	0.212	0.0148	0.81	0.87
2—3	0.052	0.724	0.0260	0.73	0.84
13—14	0.082	0.620	0.0407	0.48	0.53
14—15	0.068	0.620	0.0338	0.85	0.95
15—16	0.128	0.620	0.0620	0.14	0.14
16—17	0.071	0.620	0.0351	0.78	0.86
17—18	0.082	0.620	0.0407	0.50	0.54
18—3	0.079	0.620	0.0392	0.56	0.62

3—4	0.105	0.724	0.0517	0.54	0.58
19—4	0.014	0.079	0.0069	0.33	0.35
4—5	0.098	0.724	0.0486	0.65	0.71
5—6	0.104	0.724	0.0514	0.55	0.59
20—21	0.039	0.487	0.0197	0.47	0.54
21—22	0.045	0.487	0.0227	0.32	0.35
22—23	0.049	0.487	0.0245	0.26	0.29
23—24	0.038	0.487	0.0194	0.54	0.62
24—25	0.041	0.487	0.0206	0.46	0.53
25—26	0.044	0.487	0.0221	0.38	0.43
26—27	0.051	0.487	0.0253	0.26	0.29
27—28	0.055	0.487	0.0275	0.21	0.23
28—6	0.042	0.487	0.0212	0.48	0.54
6—7	0.234	0.724	0.1102	0.08	0.07
29—30	0.037	0.333	0.0185	0.16	0.17
30—31	0.032	0.333	0.0161	0.25	0.28
31—32	0.046	0.333	0.0227	0.09	0.10
32—33	0.036	0.333	0.0181	0.25	0.27
33—34	0.032	0.333	0.0162	0.41	0.46
34—35	0.034	0.333	0.0171	0.37	0.42
35—36	0.051	0.397	0.0256	0.09	0.09
36—37	0.024	0.397	0.0121	0.83	0.96
37—38	0.042	0.397	0.0209	0.16	0.18

38—39	0.045	0.397	0.0222	0.15	0.17
39—40	0.051	0.397	0.0253	0.11	0.12
40—7	0.045	0.397	0.0226	0.17	0.18
7—8	0.143	0.724	0.0697	0.35	0.36
8—9	0.103	0.724	0.0503	0.94	0.99
9—10	0.109	0.724	0.0538	0.77	0.83

D'après le tableau 3-3 on remarque bien que le nombre de Froude est toujours inférieur à 1 ce qui signifie que l'écoulement est toujours fluvial ce qui valide l'hypothèse de départ.

D'après les calculs effectués sur tous les tronçons il a été constaté que la hauteur d'eau tend à chaque fois vers la hauteur normale.

Maintenant on a toutes les données nécessaires pour passer à la simulation numérique.

4. Methodologie

Le calcul hydrodynamique est fait sous Star-CCM+ en prenant K- ϵ comme modèle de turbulence avec un Schmidt turbulent $S_{ct} = 0.9$ pour les deux débits à midi et à 9 heures de telle façon que :

- $Q(\text{midi})=Q(\text{moy})=0.00694$ l/s par maison.
- $Q(9h)=3*Q(\text{moy})=0.02083$ l/s par maison.

Les calculs ont été faits en utilisant un régime transitoire ce qui ressemble beaucoup plus à la réalité parce que les pollueurs n'envoient pas la pollution en permanence comme le montre la figure 3-5

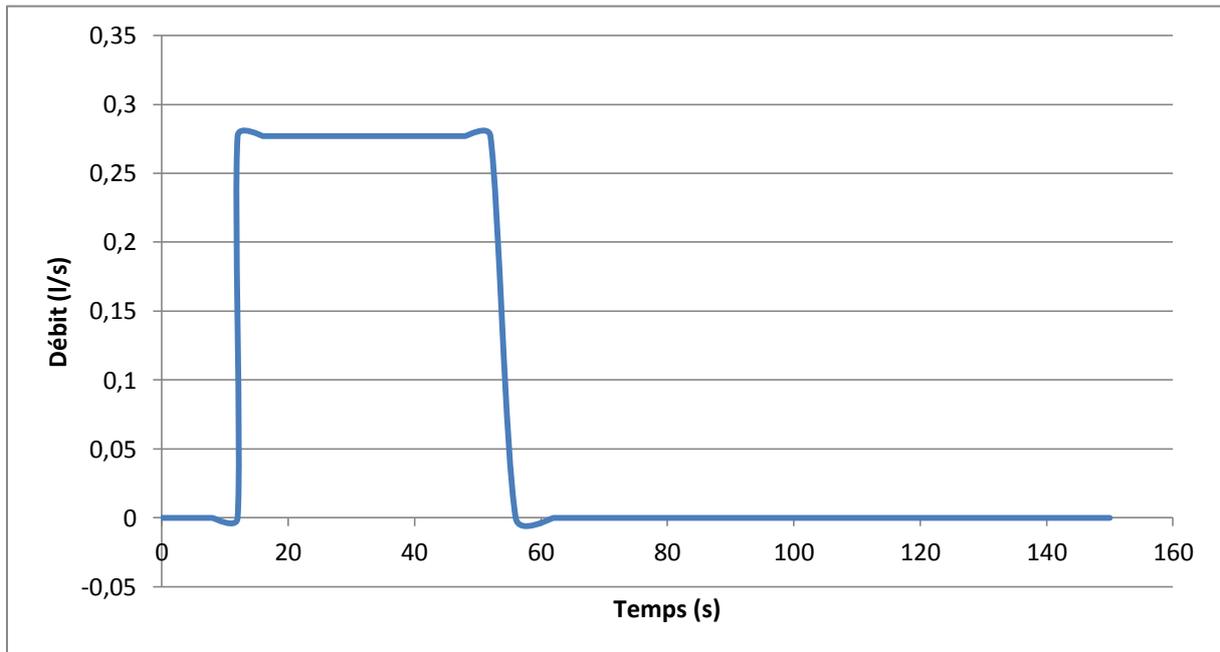


Figure3-6 : Injection de la pollution en régime transitoire.

D'après cette figure on distingue qu'on a 3 intervalles :

- $]-\infty, t_0[$ Ecoulement de l'eau pure en régime transitoire (pas de pollution).
- $[t_0, t_1]$ Injection de la pollution de telle sorte qu'on remplace le débit d'une maison d'une entrée par un débit de pollution sachant que le volume injecté est de : $V=27$ cl tel que :
 - * A midi : $t_1-t_0= 40$ secondes.
 - * A 9h : $t_1-t_0= 14$ secondes.
- $] t_1, t^\infty [$ Retour au régime transitoire en eau c'est-à-dire on revient vers l'état initial ,mais cette fois-ci on voit bien le nuage de la pollution advectée vers l'aval et on suit son évolution.

5. Analyse des résultats de la simulation

Dans ce projet le but est de suivre l'évolution de la pollution jusqu'à l'aval pour cela on a mis des capteurs près de l'entrée et des autres près de la sortie pour pouvoir regarder le passage de nuage de la pollution le long du canal comme le montre les figures 3.2 et 3.3.



Figure3-7 : Les endroits ou les images ont été prises.

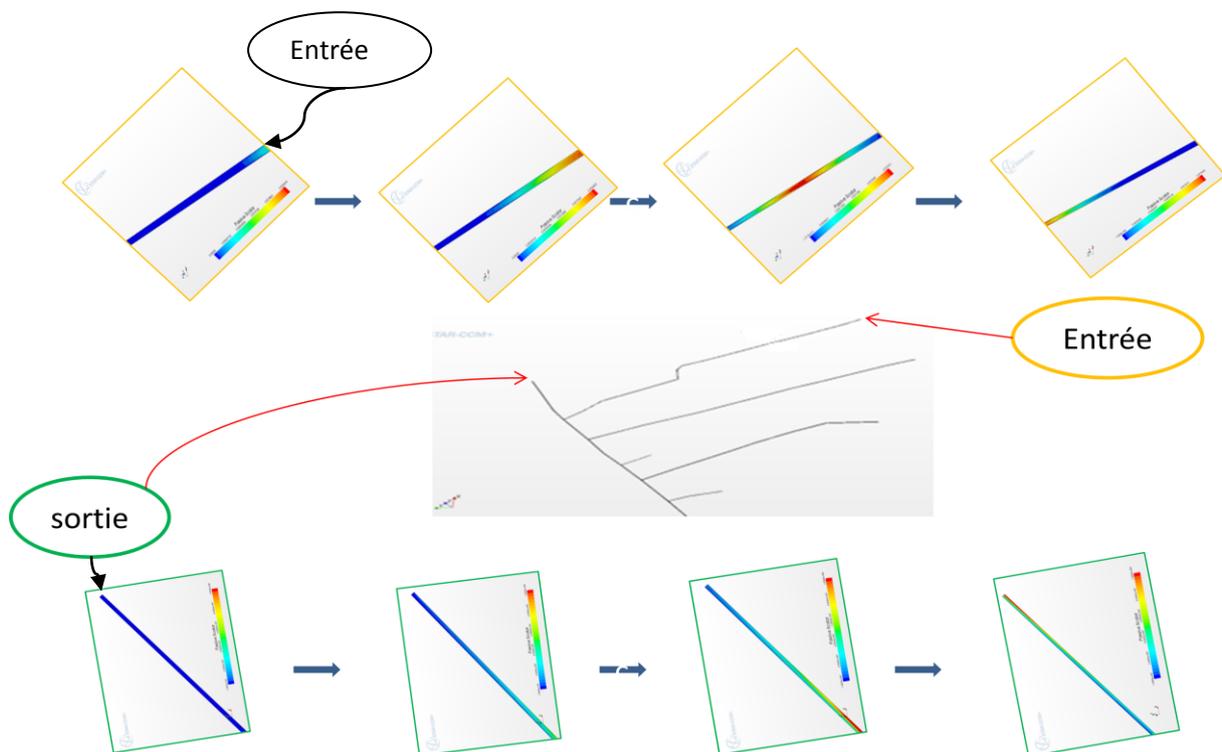


Figure 3-8 : Advection de la pollution

Dans la figure ci-dessus on voit bien que la pollution est bien advectée de l'entrée jusqu'à la sortie de telle façon que :

Au début on voit bien qu'on a seulement l'eau pure qui déplace ce qui est exprimé par la couleur bleu mais dès que la pollution soit injectée on voit bien un changement de couleur qui se déplace au fur et à mesure avec le temps telle que la couleur rouge représente la concentration maximale de la pollution jusqu'à atteindre la sortie et lorsque cette dernière

traverse complètement la sortie c'est-à-dire qu'elle est complètement advectée on remarque bien que la couleur devient bleu de nouveau.

5.1. Analyse de surface

Dans cette partie et après l'injection de la pollution dans une entrée donnée (5-3) , plusieurs capteurs ont été mis dans des endroits différents sur cette surface pour trois Schmidt turbulent $Sct=0.2$, $Sct=0.9$ et $Sct=2$. La figure 3-8 montre les positions des capteurs et la concentration de polluant affichée en fonction du temps dans chaque position.

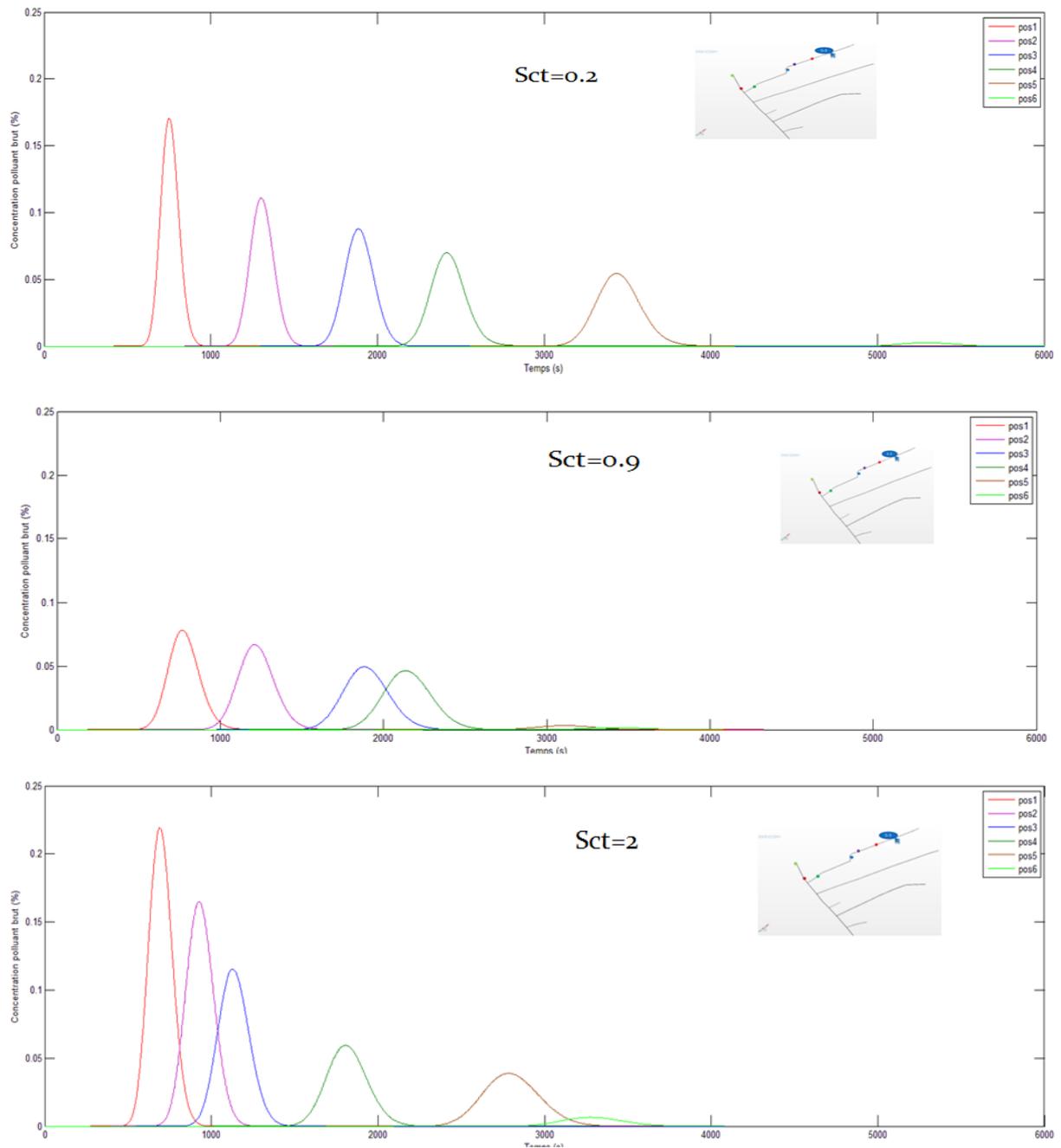


Figure 3-9 : Concentration du polluant en fonction du temps pour (Sct = 0,2/ Sct = 0,9/ Sct = 2.0).

D'après cette figure on voit bien que par exemple entre le Sct= 0.2 et Sct=0.9 les positions des 3 premières courbes sont identiques sur l'axe de temps mais avec une diminution des amplitudes pour Sct=0.9 mais à partir de la 4ème position on remarque bien que les courbes ont commencées à se resserrer vers la droite.

Pour le Sct=2 on voit que les amplitudes ou bien la concentration maximale dans chaque position a augmenté de nouveau et les courbes sont trop serrées par rapport à celles qu'on a obtenu dans les 2 premiers cas ce qui pose une problématique !!

A partir des remarques qu'on a tiré il a été constaté que faire une comparaison entre ces trois cas de figures est très compliqué pour trois (03) raisons :

Premièrement la diffusion n'est pas la même parce qu'on a trois Schmidt turbulent différents ($Sct = \frac{v_t}{D_t}$).

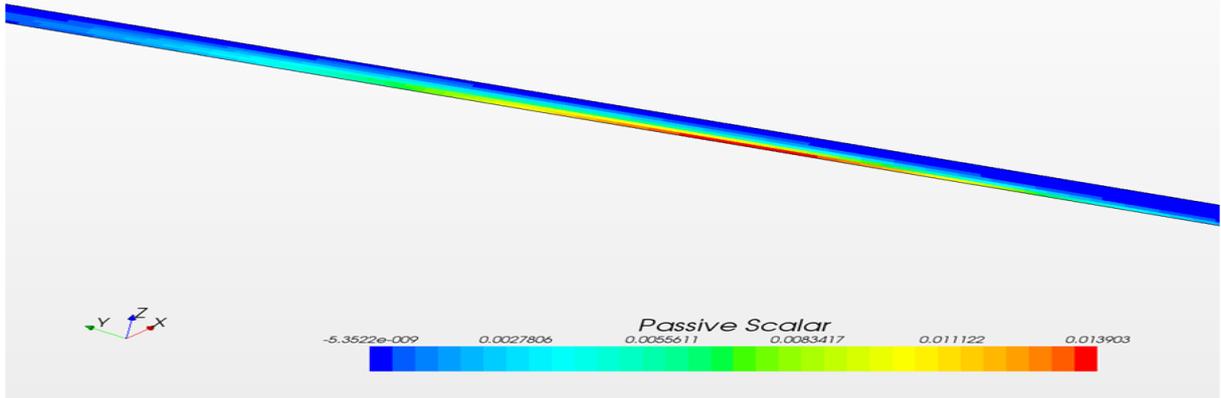
Deuxièmement vu que la diffusion n'est pas la même alors si on met les capteurs dans les mêmes endroits on aura des résultats différents parce qu'ils ne permettent pas de capter la vraie concentration de pollution qui passe.

Troisièmement la position de l'entrée aussi a un rôle principale parce que les résultats sont obtenus après une injection latérale sur le réseau mais si l'injection a été faite dans une entrée principale les résultats seront plus ou moins plus corrects.

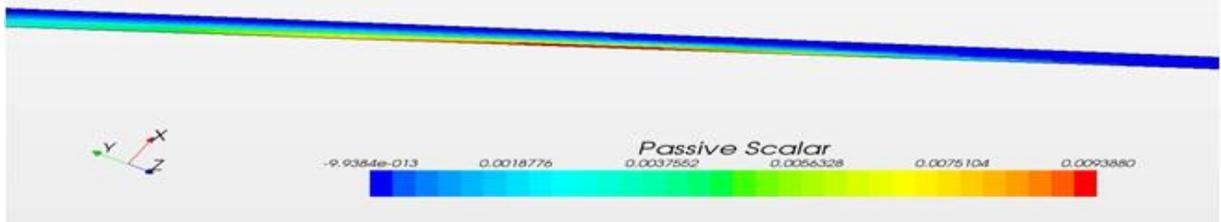
La figure 3-5 montre comment la diffusion varie en fonction de variation de Schmidt turbulent et on voit bien que :

Plus le Schmidt turbulent est grand plus la diffusion turbulente est petite.

Sct=0.2



Sct=0.9



Sct=2

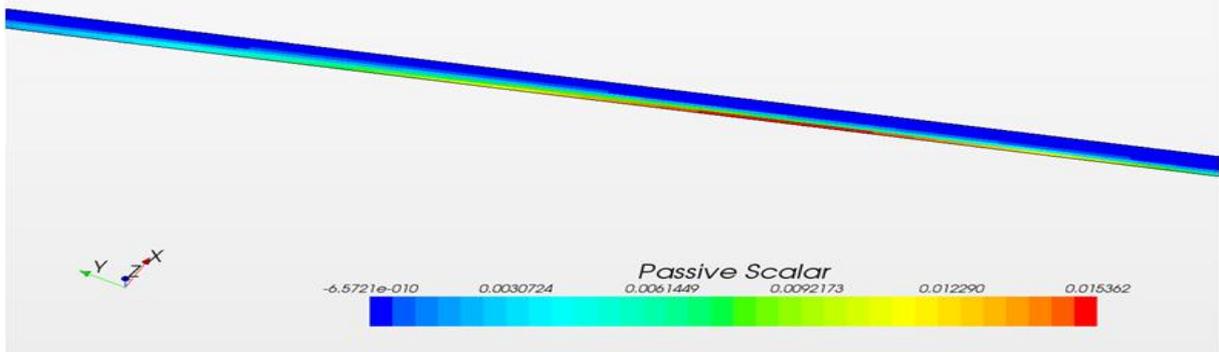


Figure 3-10 : Diffusion turbulente dans un tronçon pour les différents Sct

Afin de faire une analyse plus profonde on a fait une analyse à l'aval.

5.2. Analyse en aval :

Pour cette analyse la première chose qu'on a vérifié c'était l'influence de Schmidt turbulent en aval c'est pourquoi on a injecté une pollution dans une entrée donnée et pour des Schmidt différents mais cette fois-ci on a mis le capteur en aval.

Les résultats obtenus sont montrés dans la figure ci-dessous :

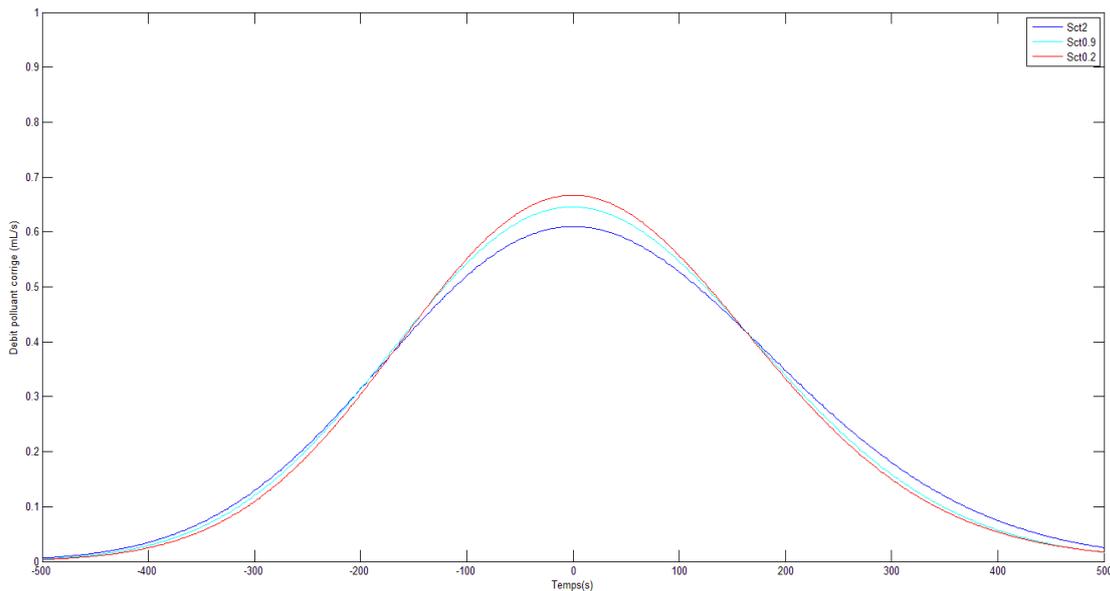


Figure 3.11 : Débit de pollution (mg/s) en fonction du temps pour des différents Sct

D'après cette figure il est clair que les résultats obtenus sont presque identiques et on peut négliger cette différence donc l'influence de Schmidt turbulent en aval est négligeable.

Pour cela on a choisi un seul Sct = 0.9 pour continuer l'analyse mais cette fois-ci on a fait une injection à chaque entrée et on a obtenu leurs influences en aval.

La figure 3.11 montre les différents résultats obtenus :

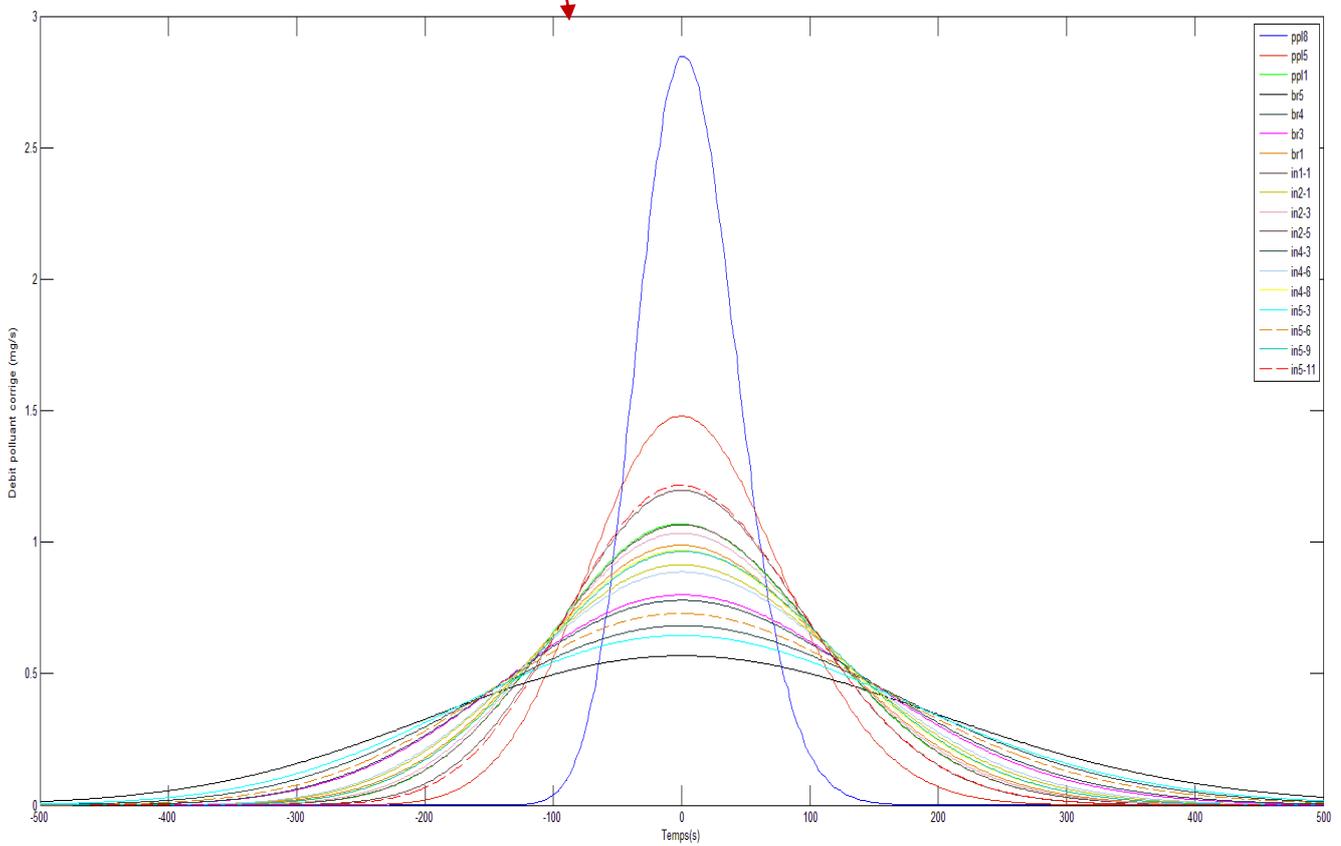
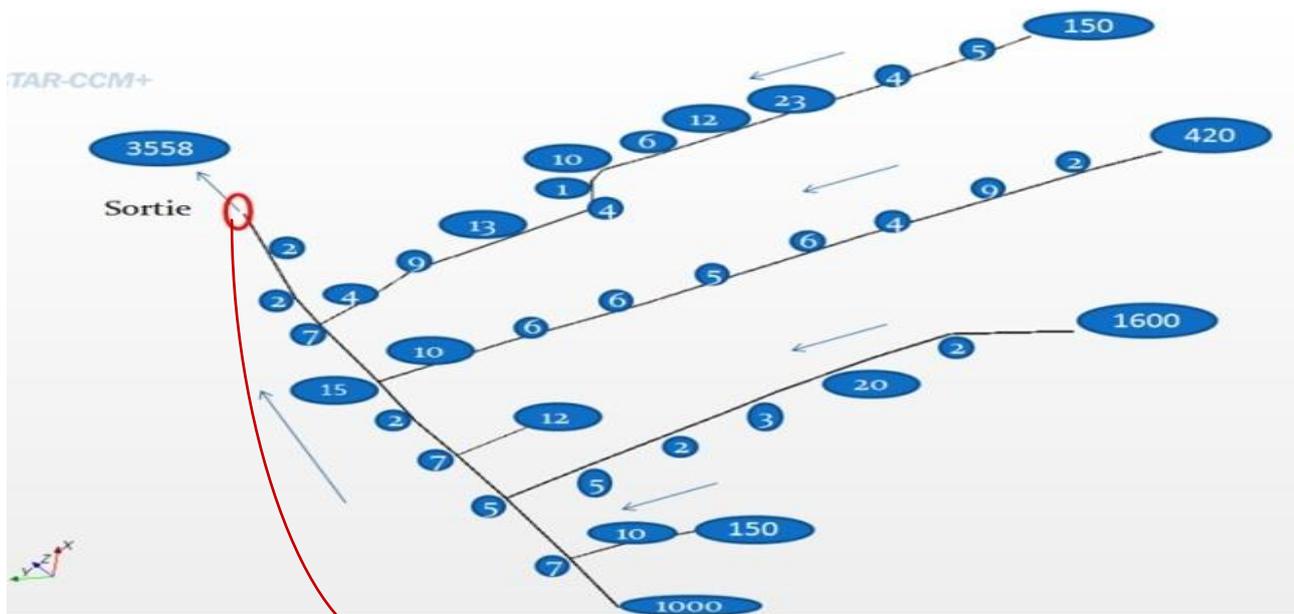


Figure 3.12 : Débit de polluant en fonction du temps pour les différentes entrées

D'après cette figure on voit bien que quelque soit l'entrée de la pollution la forme de la courbe reste gaussienne. On remarque aussi plus on est près de la sortie plus la concentration maximale augmente et plus l'entrée se situe loin de la sortie plus la courbe est étalée et le maximum de pollution diminue mais le volume reste constant tel que l'air sous chaque courbe représente le volume.

Une fois qu'on avait ces valeurs maximales de débit de pollution on cherchait à trouver la relation entre ces valeurs et la distance aval pour voir si elle a une influence.

La figure 3-12 montre bien cette relation.

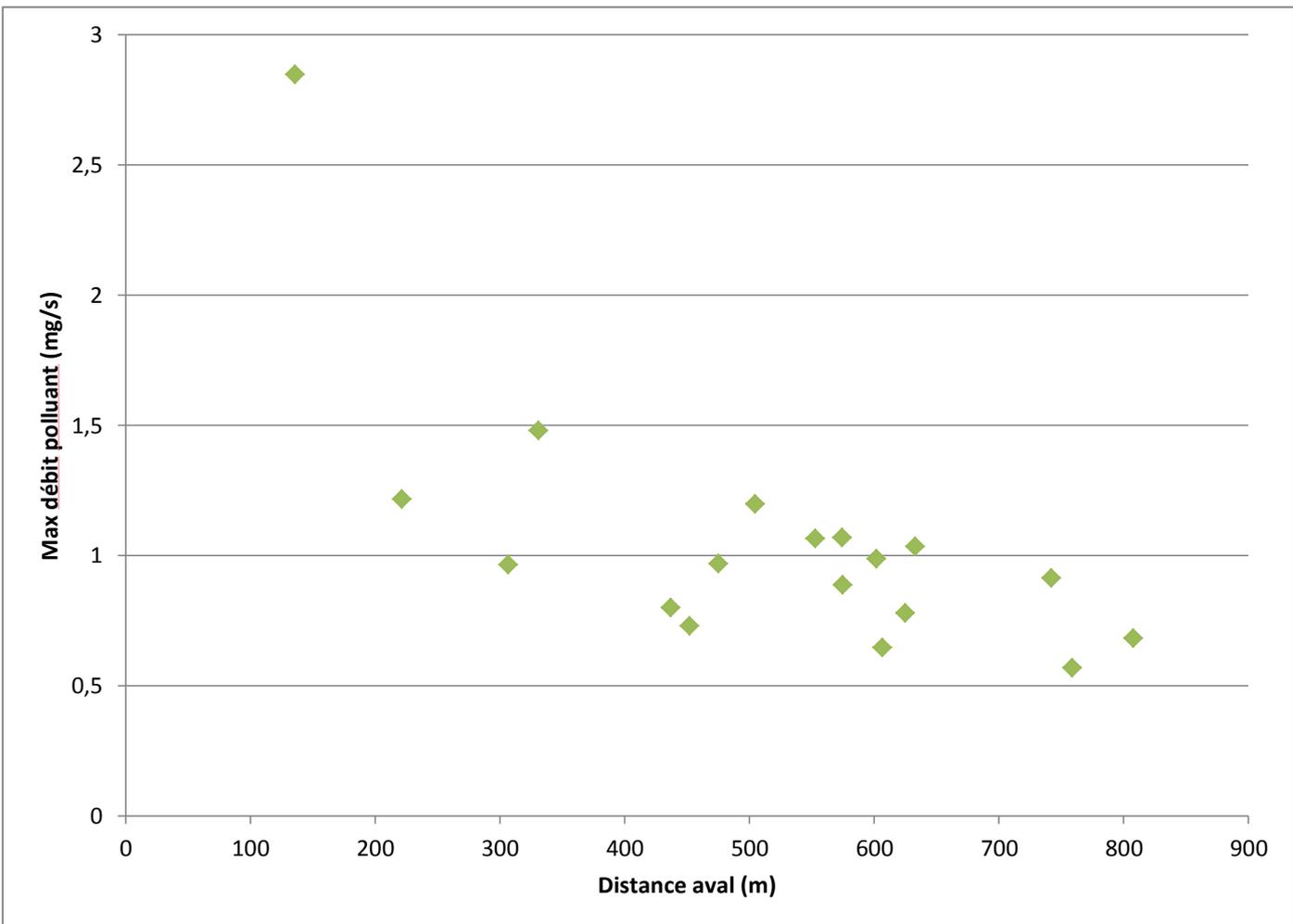


Figure 3-13 : Maximum de débit en fonction de distance aval

En regardant cette figure on distingue bien qu'il n'y a pas une relation entre la distance aval et le maximum de débit parce qu'on voit que les valeurs se situent dans un intervalle de [0.5 – 1.2] (mg/s) et pour une même distance il y'a plusieurs valeurs de débit ce que nous conduit à trouver un autre paramètre. Pour cela on a passé à un autre paramètre qui a une relation avec

la vitesse d'advection qui est le temps et la question qu'on a posé était « est ce que ce parametre a vraiment une influence ? Si oui comment ? »

La figure 3-8 montre la relation entre le temps d'advection et la pollution maximale.

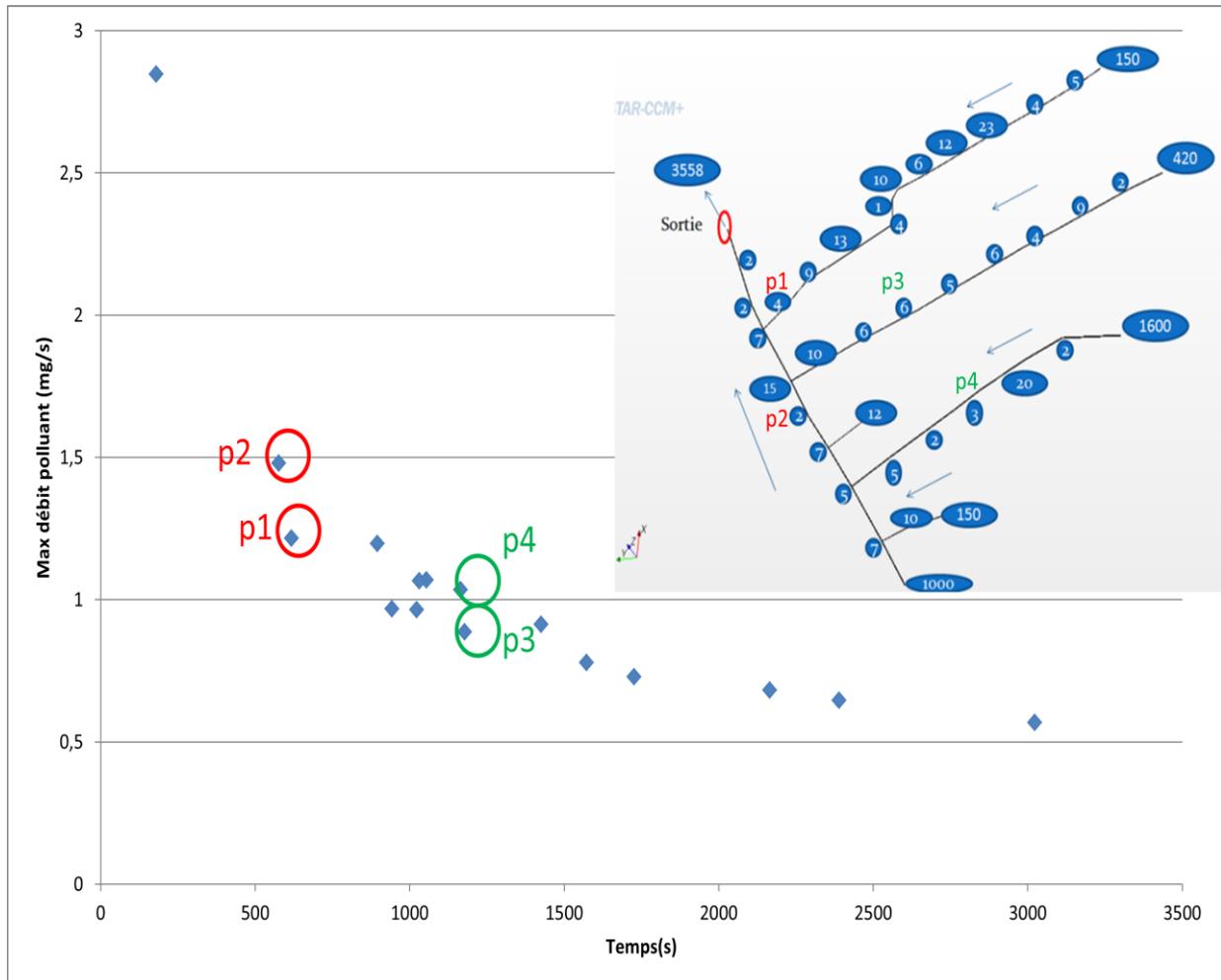


Figure 3-14 : Maximum de débit en fonction de temps d'advection

Dans la figure ci-dessus on remarque bien que la relation entre le maximum de pollution et le temps d'advection est inversement proportionnelle de telle façon que plus le temps d'advection est grand plus le débit max de la pollution est petit.

Pour quelques endroits on voit que pour le meme temps d'advection on a des valeurs différentes de débit de pollution ce qui est le cas pour les points (P3, P4) et (P1, P2).

Ceci est relatif au phénomène de mélange qui passe au niveau de la jonction tel que :

Le débit qui circule au niveau de réseau principale est très important par rapport au débit de ramification c'est pourquoi la pollution qui vient des endroits tels que les points P1 et P3 sont

bien mélangé par rapport au débits de pollution provenant des endroits tels que les points P2 et P4.

Conclusion

Le but de ce projet était d'essayer de localiser le pollueur dans un réseau à partir de la trace en aval, pour cela on a mis plusieurs capteurs soit sur la surface de dessus ou bien en aval mais comme il y'avait un problème d'homogénéisation sur la surface de dessus on a pris en considération que la surface aval.

Pour pouvoir faire, on a mis en place plusieurs capteurs :

Un capteur qui donne le débit total Q (l/s) qui traverse la section et un autre mesure la concentration maximale de la pollution C_{\max} (%) ce qui permet d'avoir le débit de pollution tel que :

$$Q_{\text{pollutionmax}} = Q * C_{\max}$$

Une fois on a cette valeur on revient vers la courbe des débits max de pollution en fonction de temps de parcours de réseau en question on place cette valeur et on tire le temps de parcours correspondant et ceci limitera un peu les possibilités en n possibilités.

Mais ceci est valable seulement pour :

- Un rejet Dirac c'est-à-dire que l'injection se fait rapidement en formant un pic.
- Les utilisateurs rejettent le même débit de pollution.

Au final on trouve que ce projet de mettre une place toute une méthodologie pour étudier les grandes géométries même s'il n'a pas permis de localiser à 100% le pollueur dans tout les cas possible mais il a permis de réduire un petit peu les possibilités.

Bibliographie

[1] Wei Cai, Mesure de diffusion dans un canal à surface libre par pH-métrie, Master Recherche, INSA de Lyon, 2012

[2] P.R Spalart, Strategies for turbulence modeling and simulations, Elsevier, 2000

[3] K.W. Chau ; Transverse mixing coefficient measurements in an open rectangular channel, Elsevier, 2000.

[4] E.Mignot et al., Pollution in a junction of a sewer network : laboratory experiments and numerical simulations, Novatech, 2013

[5] W.H Graf, Hydraulique fluviale, traité de Génie Civil de l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, 2000

[6] Mathieu Lepot, Mesurage en continu des flux polluants en MES et DCO en réseaux d'assainissement, Thèse de Doctorat, INSA de Lyon, 2012

[7] E. Mignot et al., Effects of computational meshes on hydrodynamics of an open channel junction flow using CFD technique, 9th International Conference on Urban Drainage Modeling, Belgrade, 2012

[8] E. Mignot et al., Experiments and 3D simulations of flow structures in junctions and their influence on location of flowmeters, 9th International Conference on Urban Drainage Modeling, Belgrade, 2012