



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
La République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de L'Enseignement Supérieur & la Recherche Scientifique
جامعة عبد الحميد بن باديس – مستغانم
Université Abdel Hamid Ben Badis – Mostaganem
كلية العلوم والتكنولوجيا
Faculté des Sciences et de la Technologie
قسم الهندسة الميكانيكية
Département Génie Mécanique



N° d'ordre : M...../GM/2019

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES MASTER ACADEMIQUE

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Energétique

Thème

ETUDE DE L'ECOULEMENT DANS UNE CONDUITE
A PAROI ONDULEE

Présenté par :

- ❖ SELAB Djamel Eddine
- ❖ BOUTAIBA Benklaouz Amine

Soutenu le 06/07 / 2019 devant le jury composé de :

Président Prof. N. RETIEL Université de Mostaganem UMAB
Encadreur Prof. S. HOUAT Université de Mostaganem UMAB

Examineur	Mme. A.BELHACHEMI	Université de Mostaganem UMAB
-----------	-------------------	-------------------------------

Année Universitaire : 2018 / 2019

Remerciements

On dit souvent que le trajet est aussi important que la destination. Les deux années de Master nous ont permis de bien comprendre la signification de cette phrase toute simple.

Ce parcours, en effet, ne s'est pas réalisé sans défis et sans soulever de nombreuses questions pour lesquelles les réponses nécessitent de longues heures de travail.

Nous tenons à remercier sincèrement le Professeur Houat Samir, qui en tant que directeur de mémoire, s'est toujours montré à l'écoute et très disponible tout au long de la réalisation de ce mémoire, ainsi pour l'inspiration, l'aide et le temps qu'il a bien voulu nous consacrer et sans qui ce mémoire n'aurait jamais vu le jour. Nous voudrions également lui témoigner notre gratitude pour sa patience et son soutien qui nous a été précieux afin de mener notre travail à bon port. Merci infiniment !

Nous remercions tous les professeurs de département Génie Mécanique qui doivent voir dans ce travail la fierté d'un savoir bien acquis.

Dédicaces

Je dédie ce travail

A ma très chère mère qui m'a soutenu durant toute ma vie.

A mon père qui m'a bien construit.

A mes frères et ma sœur.

A toute ma famille.

A tous mes amis sans exception.

Selab Djamel Eddine

Résumé

Dans ce travail on présente une étude numérique des caractéristiques dynamiques d'un écoulement laminaire et turbulent à travers une conduite rectangulaire à paroi ondulée. L'analyse de l'écoulement est effectuée en fonction du nombre de Reynold, de l'effet de l'amplitude et le nombre d'ondulation.

Dans ces simulations, le code ANSYS FLUENT a été utilisé pour résoudre les équations de continuité et de quantité de mouvement. Dans le cas du régime turbulent, les équations du modèle de turbulence k- ϵ réalisable ont été utilisées dans notre étude.

L'analyse des résultats de la structure d'écoulement sont illustrés sous forme des lignes de courant, des contours de vorticité, des profils de vitesse sur plusieurs positions de la conduite ainsi que la variation de coefficient de frottement.

Mots clefs : Conduite ondulée, écoulement laminaire, écoulement turbulent, modèle k- ϵ réalisable

SOMMAIRE

Introduction générale :	1
Chapitre I : Problématique et Formulation Mathématique	3
I-1 Introduction :	4
I-2 Etude Bibliographique :	4
I-3 Description du problème :	4
I-3-1 Equations général :	5
I-3-1-1 Équation de continuité	5
I-3-1-2 Équation de quantité de mouvement	5
I-3-2 Les hypothèses :	5
I-3-3 Formulation du problème étudié :	6
I-4 A dimensionnalité des équations :	6
I-5 Les conditions aux limites :	7
I-6 Équation de la turbulence model (k- ε) :	7
Chapitre II : Méthode de résolution	8
II-1 Méthode des volumes finis :	9
II-2 Maillage Gambit :	9
II-3 Solution avec fluent	10
Chapitre III : Résultats et discussions	11
III-1 Etude de l'effet du Reynold sur la structure de l'écoulement :	12
III-2 Etude de l'effet de l'amplitude sur la structure de l'écoulement :	20
III-3 Etude de l'effet de la longueur d'onde sur la structure de l'écoulement :	28
CONCLUSION	37
Bibliographie :	38

Nomenclature

c_f	Coefficient de frottement	
D	diamètre de la conduite	m
g	accélération de la pesanteur	$m.s^{-2}$
K	Energie cinétique turbulent	
u,v	Composante du vecteur vitesse	$m.s^{-1}$
U ,V	composantes adimensionnelles du vecteur vitesse	
X,y	coordonnées cartésiennes	m
X ,y	coordonnées cartésiennes adimensionnelles	
p	champ de pression	Pa
t	Temps	s

Symboles

α	amplitude	m
ρ	masse volumique	$kg.m^{-3}$
λ	longueur d'onde	m
μ	viscosité dynamique	$N.s.m^{-2}$
μ_t	viscosité dynamique turbulent	$kg.m^{-1}.s^{-1}$
ν	viscosité cinématique	$m^2.s^{-1}$
ν_t	viscosité cinématique turbulent	$m^2.s^{-1}$
ε	taux dissipation de énergie cinétique turbulent	

Introduction générale :

Dans la vie quotidienne, on observe autour de nous plusieurs phénomènes, naturels ou autres, qui sont gouvernés par les lois de la physique. Ces phénomènes, stationnaires ou instationnaires, peuvent appartenir aux différents domaines de la recherche. Parmi ces domaines la mécanique des fluides et l'échange thermique : sciences qui servent à comprendre et à décrire le transfert de chaleur et l'écoulement de liquides et de gaz et leurs interactions avec les corps solides. Ces sciences reposent avant tout sur l'application de lois fondamentales de la mécanique et de la thermodynamique.

Dans la nature, les systèmes et phénomènes physiques les plus intéressants sont aussi les plus complexes à étudier. Ils sont souvent régis par un grand nombre de paramètres non linéaires interagissant entre eux (la météorologie, la turbulence des fluides...).

L'une des solutions est de réaliser une série d'expériences pour analyser les paramètres et grandeurs du système. Mais les essais peuvent s'avérer très coûteux (essais en vol, essais avec matériaux rares...) et ils peuvent être très dangereux (essais nucléaires, environnement spatial...). Enfin il peut être difficile de mesurer tous les paramètres : échelles du problème trop petites (chimie du vivant, couche limite en fluide...) ou trop grandes (astrophysique, météorologie, géophysique...).

On peut aussi construire un modèle mathématique permettant la représentation du phénomène physique. Ces modèles utilisent très souvent des systèmes d'équations aux dérivées partielles (EDP) non linéaires dont on ne connaît pas de solutions analytiques en général. Il faut alors résoudre le problème numériquement en transformant les équations continues de la physique en un problème discret sur un certain domaine de calcul (le maillage).

Durant les dernières décennies, c'est grâce à la capacité grandissante des outils informatiques et au développement rapide des méthodes numériques, qu'il est devenu possible pour les communautés scientifiques et industrielles de prédire et comprendre les caractéristiques d'écoulements de fluides. Ceci est en partie dû au fait que les simulations numériques d'écoulement de fluides nous permettent d'étudier une vaste gamme de paramètres dans une période de temps relativement courte et à un coût considérablement moindre, que de les étudier par les méthodes de recherche classiques (prototypes, études expérimentales, ...).

Dans ce travail nous étudions l'écoulement d'un fluide à paroi ondulée, d'un écoulement laminaire et turbulent bidimensionnel pour un fluide incompressible.

La conduite à paroi ondulé est entourée de crêtes et de sillons à sa surface. Ondulée, dans le cas d'un tuyau ondulé, est un terme qui fait référence des crêtes et des sillons parallèles qui entourent complètement un tuyau. ... Dans les applications sans tranchée, les tuyaux ondulés peuvent être en acier ferreux ou en plastique polyéthylène haute densité (PEHD).

Le but de ce travail est de déterminer la structure d'écoulement et les perturbations qui peuvent être créées visualisées à travers la fonction de courant, les profils des vitesses (u , v), le point de rattachement, le profil de pression et le coefficient de frottement, en changeant le rapport d'expansion (les différentes tailles de la section de passage) et le nombre de Reynolds.

Le premier chapitre de ce travail est destiné à présenter une revue bibliographique sur quelques études qui portent sur les écoulements dans les conduites à paroi ondulée, suivi par une description de la géométrie du problème traitée et le système d'équations concernant notre phénomène physique, ainsi que les conditions aux limites.

Le deuxième chapitre décrit la méthode numérique utilisée. Les aspects relatifs à la méthode des volumes finis sont exposés en détail, en particulier la génération du maillage de calcul, la discrétisation des équations du problème, les schémas de conduit ondulé et la méthode de résolution des équations algébriques finales.

Les résultats sont discutés au chapitre 3 et présentés sous forme graphique représentant les structures d'écoulement.

Enfin, nous terminons notre mémoire par une conclusion générale résumant l'essentiel de notre travail.

Chapitre I :
Problématique et Formulation
Mathématique

I-1 Introduction :

Nous allons commencer dans ce chapitre par présenter les écoulements dans les conduites à paroi ondulée qui sont très rencontrés dans le domaine industriel. Une revue bibliographique très simple pour montrer l'importance de ce type de conduite sera aussi exposée.

La formulation détaillée du problème étudié dans ce travail sera présentée avec toutes les hypothèses, et les équations utilisées pour la modélisation et la simulation.

I-2 Etude Bibliographique :

Plusieurs travaux sur les écoulements dans des conduites à section variables sont étudié dans la littérature notamment les conduites ondulées, vu leurs importances dans le domaine industriel. Nous présentons juste quelques travaux trouvés dans ce domaine qui montrent leurs intérêts dans la recherche appliquée.

Dorin STANCIU et Al(2008), Dans ce travail ils ont fait une analyse d'une façon numérique l'influence de l'ondulation d'une paroi sur les irréversibilités volumiques de la convection forcée turbulente intérieure [1].

M. Dar Ramdane et Al (2007) ils ont présenté une étude numérique des caractéristiques dynamiques et thermiques d'un écoulement turbulent de convection forcée le long d'un tube à paroi ondulée [2].

Amirouche Hakim, Hagani Fouad (2014) ils ont présenté une étude d'une simulation numérique de la convection mixte couplée au rayonnement de surface d'un capteur solaire plan à double passe avec absorbeur ondulé [3].

Dans notre étude, on va étudier l'influence du Reynold, de l'amplitude et de la longueur d'onde sur l'écoulement et discuter leurs influences sur la structure de l'écoulement.

I-3 Description du problème :

Dans ce travail on présente une étude numérique des caractéristiques dynamiques d'un écoulement laminaire et turbulent dans une conduite rectangulaire à paroi ondulée (voir figure 1 et 2, page10-11). L'analyse de l'écoulement est effectuée pour plusieurs amplitudes de l'ondulation et nombre d'ondulation, en utilisant le logiciel Ansys Fluent.

I-3-1 Equations général :

Tout le long de ce travail nous allons considérer que le domaine physique est représenté par le système de coordonnées cartésiennes ($x_{1,2,3}=x,y,z$)

Les équations générales de bilans de masse et de quantité de mouvement d'énergie pour un modèle physique s'écrivent :

I-3-1-1 Équation de continuité

L'équation de continuité exprime la conservation de la masse pour un volume de contrôle matériel.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{V}) = 0 \Leftrightarrow \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad 1.1$$

I-3-1-2 Équation de quantité de mouvement

La loi fondamentale de la dynamique appliquée à un domaine matériel que nous suivons dans son mouvement, exprime que la dérivée particulaire du tenseur de quantité de mouvement est égale au tenseur des forces extérieures appliquées à ce domaine.

Quantité de mouvement suivant OX :

$$\rho(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z}) = f_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}) \quad 1.2$$

Quantité de mouvement suivant OY :

$$\rho(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z}) = f_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2}) \quad 1.3$$

Quantité de mouvement suivant OZ :

$$\rho(u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z}) = f_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2}) \quad 1.4$$

Nous allons adopter ces équations à notre modèle physique choisi par l'application des hypothèses simplificatrices

I-3-2 Les hypothèses :

Pour qu'on puisse résoudre cette simulation numérique il faut imposer certaines hypothèses, ci-dessous :

- La masse volumique $\rho = \text{cst}$ donc le fluide est incompressible $\text{div} \vec{V} = 0$
- Fluide Newtonien $\mu(\text{viscosity}) = \text{cste}$
- Les Propriétés physiques de l'écoulement sont constantes
- Écoulement permanent $\frac{\partial}{\partial t} = 0$

- Ecoulement laminaire pour $Re \leq 800$ et turbulent pour $Re \geq 1000$ (conduite ondulée)
- Ecoulement deux dimension $\frac{\partial}{\partial z} = 0$ et $w=0$
- Ecoulement isotherme $T=cste$
- On néglige les forces de champ (la pesanteur $g=0$).

I-3-3 Formulation du problème étudié :

En tenant compte de ces hypothèses, les équations de transport du modèle choisi, dans un repère fixe sont les suivantes :

L'équation de continuité :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{V}) = 0 \Leftrightarrow \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad 2.1$$

L'équation de quantité de mouvement

Quantité de mouvement suivant ox :

$$\rho(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}) \quad 2.2$$

Quantité de mouvement suivant oy :

$$\rho(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2}) \quad 2.3$$

Dans ces équations u et v sont les composantes de la vitesse dans la direction x et y respectivement. Les équations (2-1) (2-2) (2-3) constituent un système d'équations différentielles partielles elliptiques couplées. Pour obtenir une solution unique il est nécessaire de définir des conditions aux limites, celles-ci sont données dans le paragraphe suivant.

I-4 A dimensionnalité des équations :

En supposant des constantes physiques pour notre cas d'étude, on aura :

$$X = \frac{x}{D}, \quad Y = \frac{y}{D}, \quad U = \frac{u}{U_0}, \quad V = \frac{v}{U_0}, \quad P = \frac{p}{\rho U_0^2},$$

L'équation de continuité :

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} = 0 \quad 2.4$$

L'équation de quantité de mouvement

Quantité de mouvement suivant OX :

$$U \frac{\partial U}{\partial V} + V \frac{\partial U}{\partial Y} = - \frac{\partial P}{\partial X} + \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} \right) \quad 2.5$$

Quantité de mouvement suivant OY :

$$U \frac{\partial V}{\partial V} + V \frac{\partial V}{\partial Y} = - \frac{\partial P}{\partial Y} + \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 V}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2} \right) \quad 2.6$$

Nombre de Reynold :

Le nombre de Reynolds permet de définir le régime d'un écoulement, c'est à dire s'il est laminaire ou turbulent. Il est défini comme le rapport entre les forces d'inerties (convection) et les forces visqueuses et s'écrit comme suit :

$$Re = \frac{V.D.\rho}{\mu} \quad 2.7$$

I-5 Les conditions aux limites :

Pour obtenir une solution unique il est nécessaire de définir les conditions aux limites :

- 1 Entrée : Une vitesse constante est imposée suivant l'axe horizontal $U=U_0$ et $V=0$
- 2 Sortie : Les conditions de sortie sont imposées $P=0$
- 3 Parois : La condition de non glissement est imposée pour toutes les parois. $U=V=0$

I-6 Équation de la turbulence model (k- ε) :

Ce modèle de transport des contraintes de Reynolds a été implémenté dans le code de calcul FLUENT. Les contraintes qu'impose ce code dans la prise en compte des rugosités.

On a plusieurs modes de turbulence (modèle à une équation, modèle à deux équation exemple k-ε et k-ω, modèle à cinq équations). Dans notre travail, nous avons utilisé le model k- ε Realizable à deux équations. Ce modèle s'écrit comme suite

- Équation pour l'énergie cinématique de turbulence k:

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho v \frac{\partial k}{\partial y} = \tau_{x,y} \frac{\partial u}{\partial y} - \rho \cdot \varepsilon + \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial y} \right] \quad 2.8$$

- Équation pour la dissipation d'énergie cinématique de turbulence ε:

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho v \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} = c_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \tau_{x,y} \frac{\partial u}{\partial y} - c_{\varepsilon 2} \cdot \frac{\varepsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right] \quad 2.9$$

- La viscosité dynamique turbulente :

$$\mu_t = \rho \cdot c_\mu \cdot k^2 / \varepsilon \quad 2.10$$

Les constantes pour le model

$$c_{\varepsilon 1} = 1.44 \quad c_{\varepsilon 2} = 1.9 \quad c_\mu = 0.09 \quad \sigma_k = 1 \quad \sigma_\varepsilon = 1.3$$

Chapitre II :

Méthode de résolution

II-1 Méthode des volumes finis :

La méthode des volumes finis consiste à partager le domaine de calcul en plusieurs volumes, où chaque volume entoure un nœud. Elle est caractérisée par son avantage à satisfaire la conservation de masse, de quantité de mouvement et d'énergie dans tous les volumes finis ainsi que dans tout le domaine de calcul. Elle facilite la linéarisation des termes non linéaires dans les équations de conservation telle que le terme source par exemple.

II-2 Maillage Gambit :

Gambit est un logiciel qui permet de créer des maillages pouvant être utilisés en particulier sous le logiciel FLUENT. Le maillage est un prétraitement au logiciel de simulation. Il permet de générer un maillage structuré ou non structuré en coordonnées cartésiennes, polaires, cylindriques ou axisymétriques. Il peut réaliser des maillages complexes en deux ou trois dimensions avec des mailles de type rectangle ou triangle.

La conduite rectangulaire à paroi ondulée présentée dans les figures, a un diamètre $D=0,5\text{m}$ et se compose de nombre d'ondulations différents, la longueur d'onde λ est varié de $\lambda=2D$, $4D$ et $6D$. Les ondulations sont précédées et suivies d'une section plate à l'entrée et à la sortie de longueur de $4d$ et $8d$ pour l'ajustement et le rétablissement de l'écoulement. L'amplitude de l'ondulation est variée de $0,2D$ jusqu'à la valeur de $0,4D$.

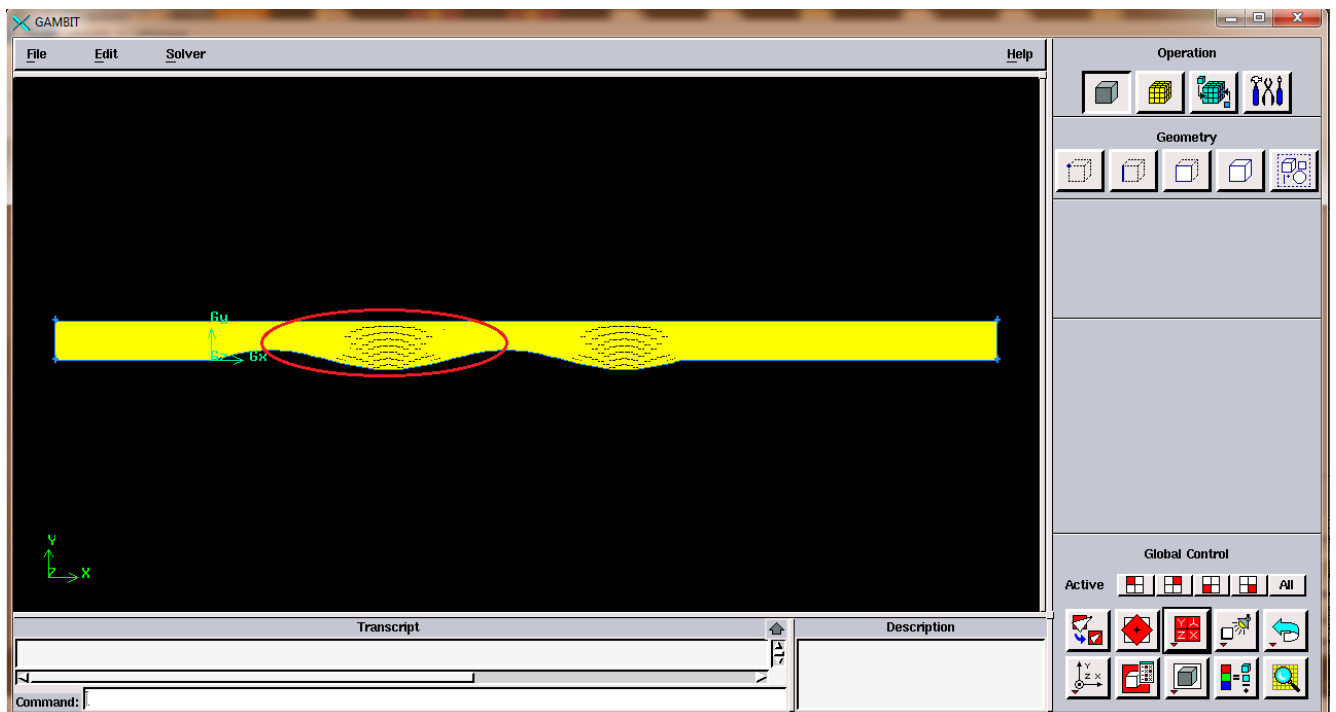


Figure 1 Maillage de la géométrie

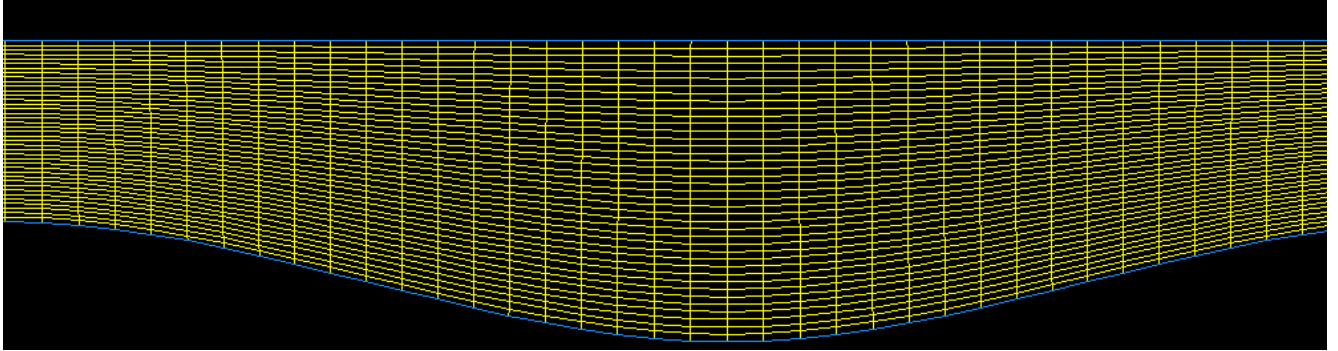


Figure 2 zoom de la partie entourée en rouge de la conduite

II-3 Solution avec fluent

Fluent est un code CFD commercial très utilisé dans l'industrie. Il permet de résoudre les écoulements fluides (champs de vitesses, de température...), c'est la raison pour laquelle on l'a choisi pour réaliser notre simulation. Ensuite l'utilisation de Fluent est simple, il suffit de suivre l'ordre des menus en partant de la gauche pour aller vers la droite.

Pour commencer la résolution il faut suivre quelque étape on commençant par importer le fichier (.mesh) généré sous Gambit. Puisque notre géométrie est construite en 2D le choix 2DDP semble le plus approprié à notre simulation.

Après avoir importé la géométrie on doit saisir les paramètres et les conditions de notre simulation en choisissant tout d'abord le Solver et le model de la turbulence. Pour cette deuxième on va choisir deux types selon les différentes modélisations que Fluent propose (écoulements non visqueux, laminaires, turbulents...etc). Quand $Re \leq 800$ on choisit le model laminaire, et le model $k-\xi$ réalisable pour $Re \geq 1000$.

Ensuite, on définit les caractéristiques du fluide utilisé puis fixer les valeurs des conditions aux limites.

Finalement on doit choisir le nombre d'itération pour lancer les calculs et on montre les résultats qu'ils sont représentés dans le chapitre III.

Chapitre III :

Résultats et discussions

III-1 Etude de l'effet du Reynold sur la structure de l'écoulement :

Dans ce cas on met en œuvre l'étude de l'écoulement à travers la paroi en fixant l'amplitude et λ et on varie le Reynold

Diamètre = 0.5

Amplitude = 0.25D

$\lambda = 6D$

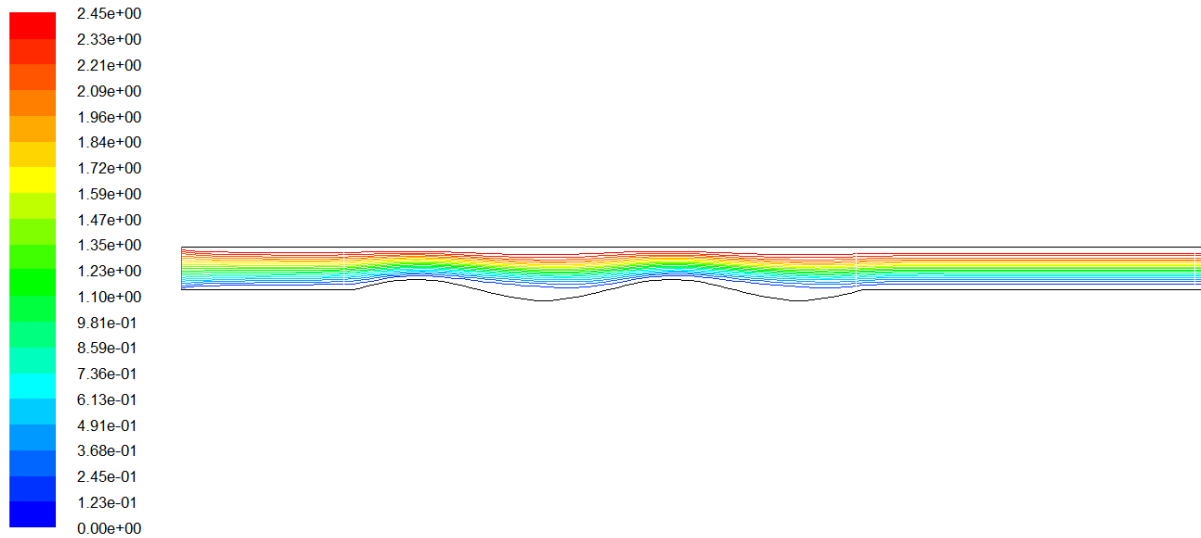


Figure 3 Les lignes de courant (Reynold 200)

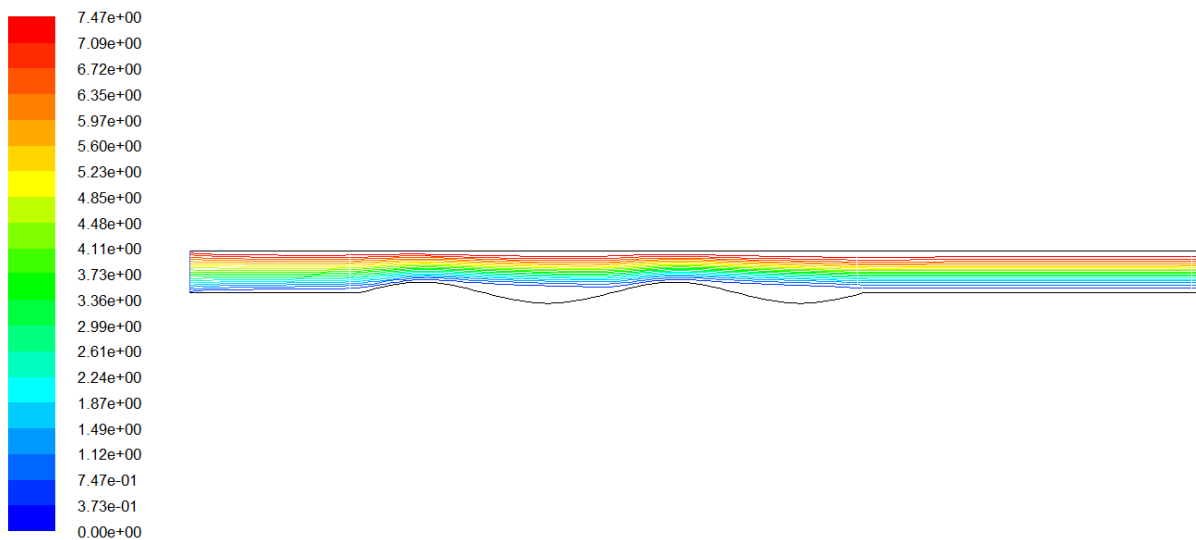


Figure 4 Les lignes de courant (Reynold 600)

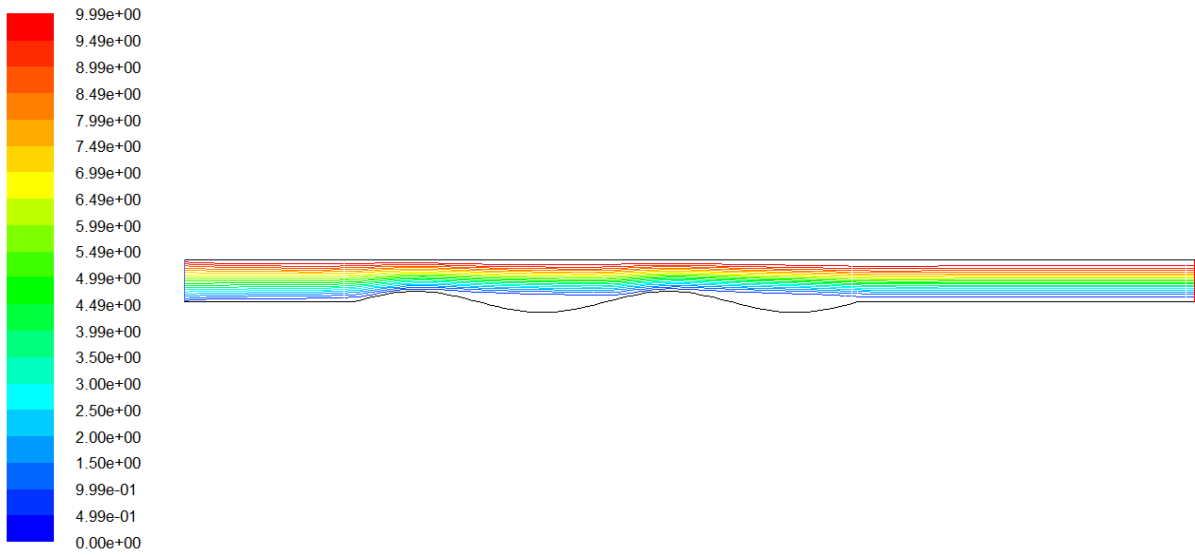


Figure 5 Les lignes de courant (Reynold 800)

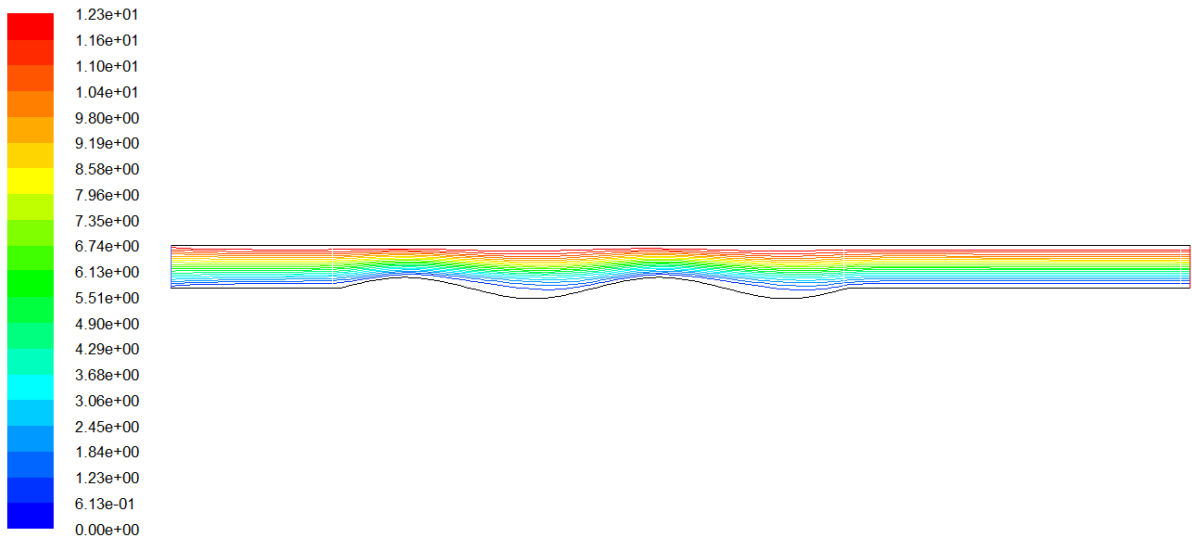


Figure 6 Les lignes de courant (Reynold 1000)

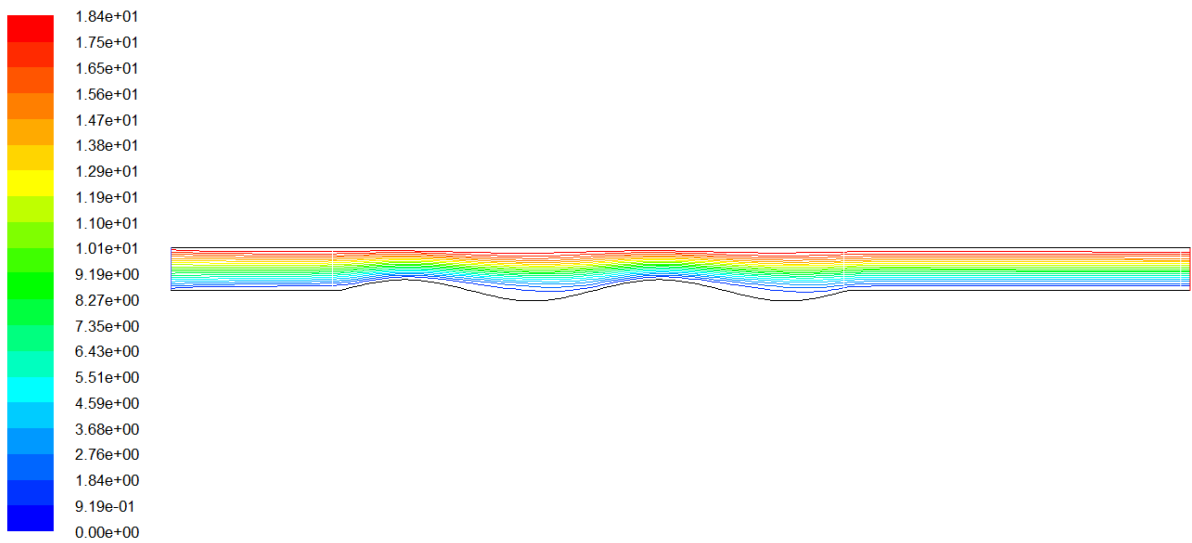


Figure 7 Les lignes de courant (Reynold 1500)

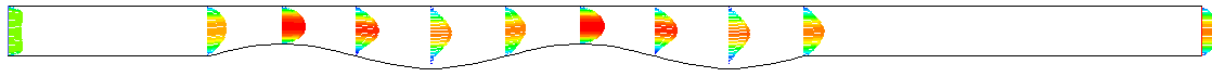


Figure 8 Vecteurs de vitesse (Reynold 200)

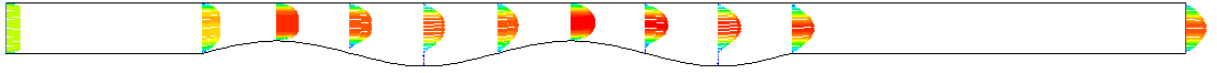


Figure 9 Vecteurs de vitesse (Reynold 600)

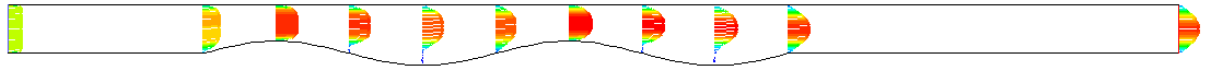


Figure 10 Vecteurs de vitesse (Reynold 800)

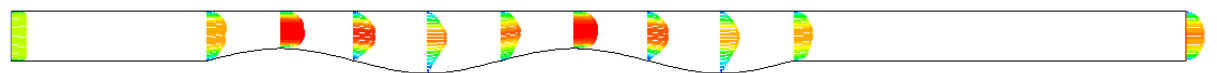


Figure 11 Vecteurs de vitesse (Reynold 1000)

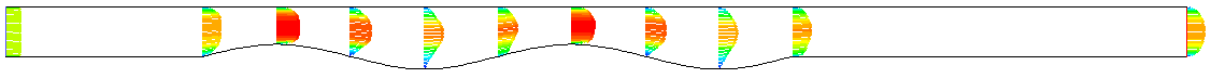


Figure 12 Vecteurs de vitesse (Reynold 1500)

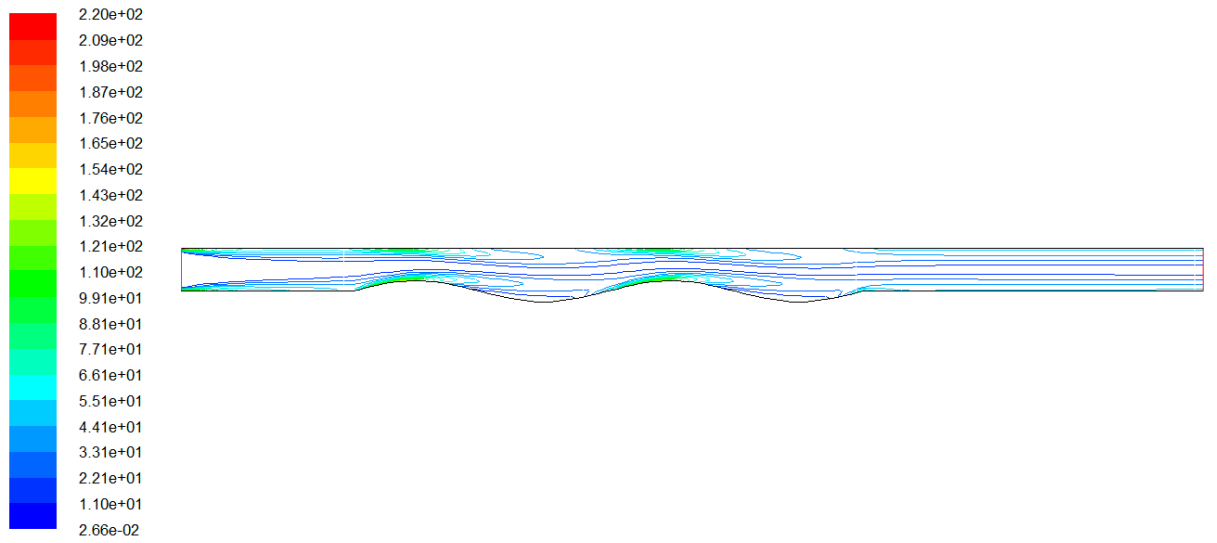


Figure 13 Contour de vorticité (Reynold 200)

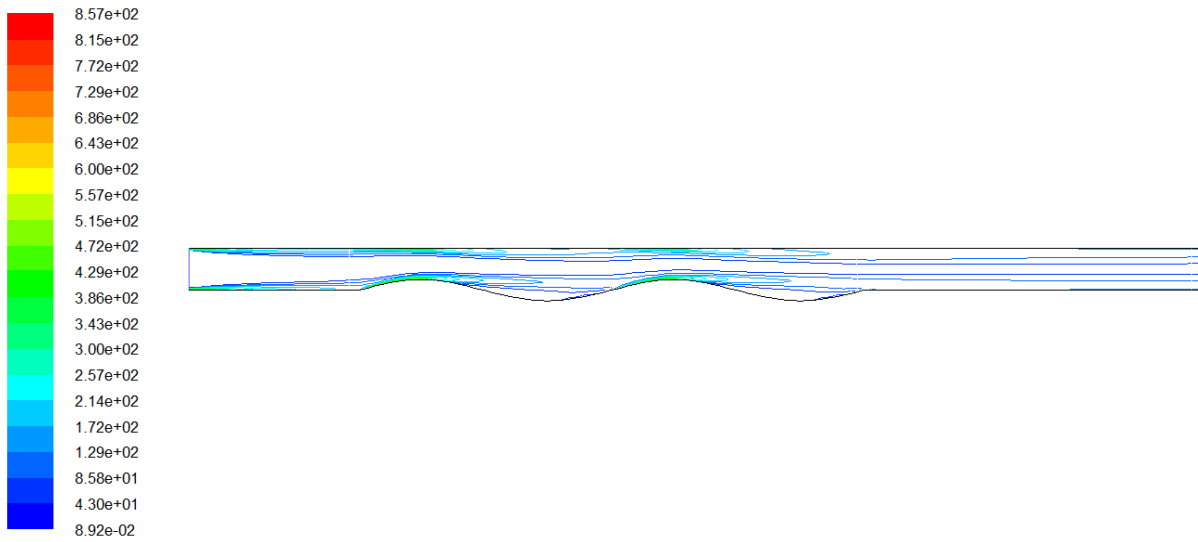


Figure 14 Contour de vorticité (Reynold 600)

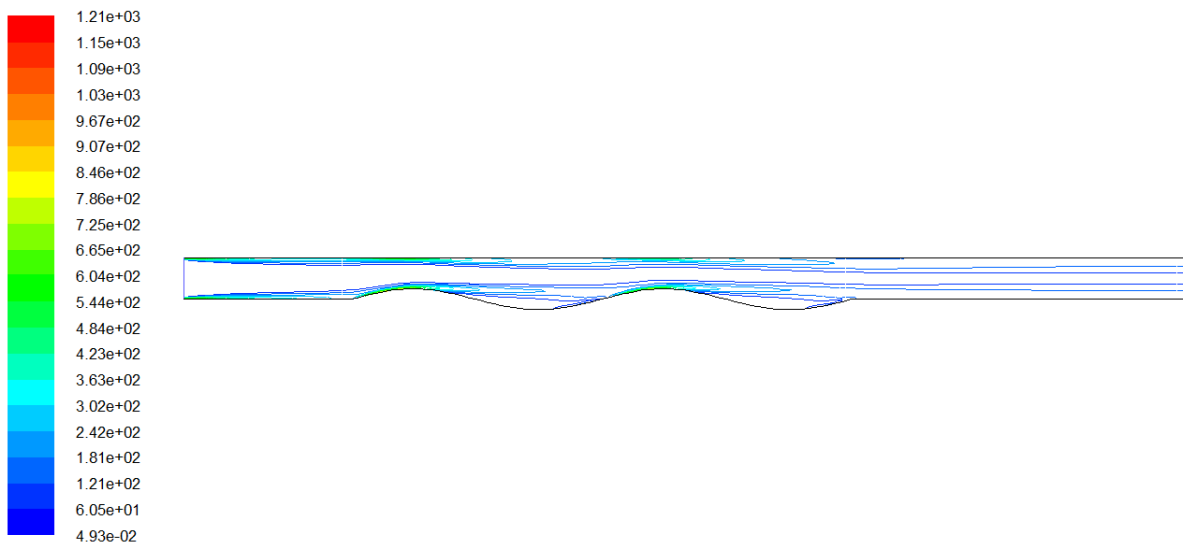


Figure 15 Contour de vorticité (Reynold 800)

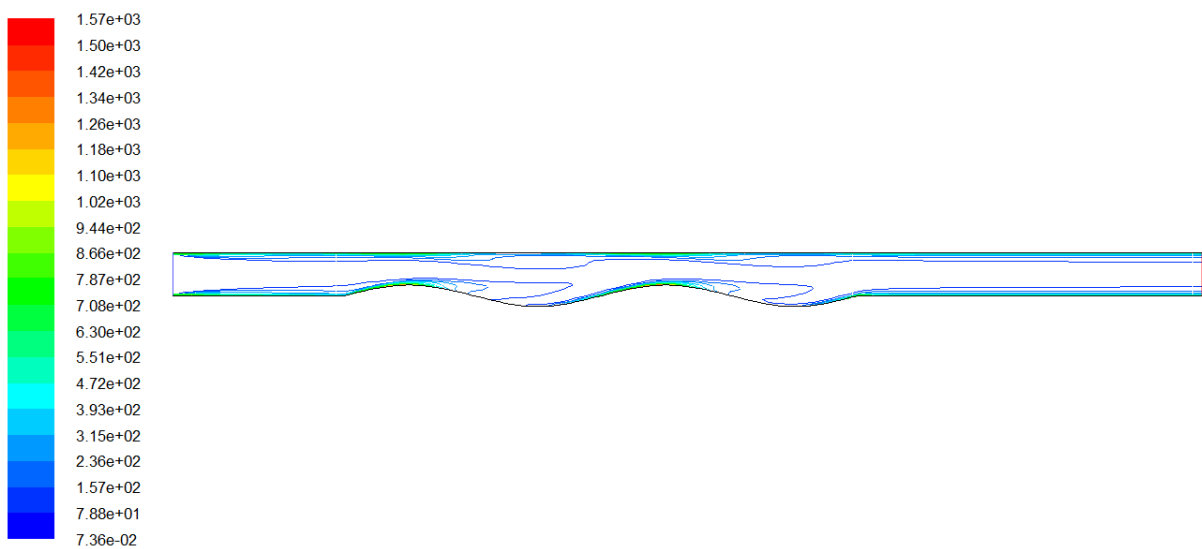


Figure 16 Contour de vorticité (Reynold 1000)

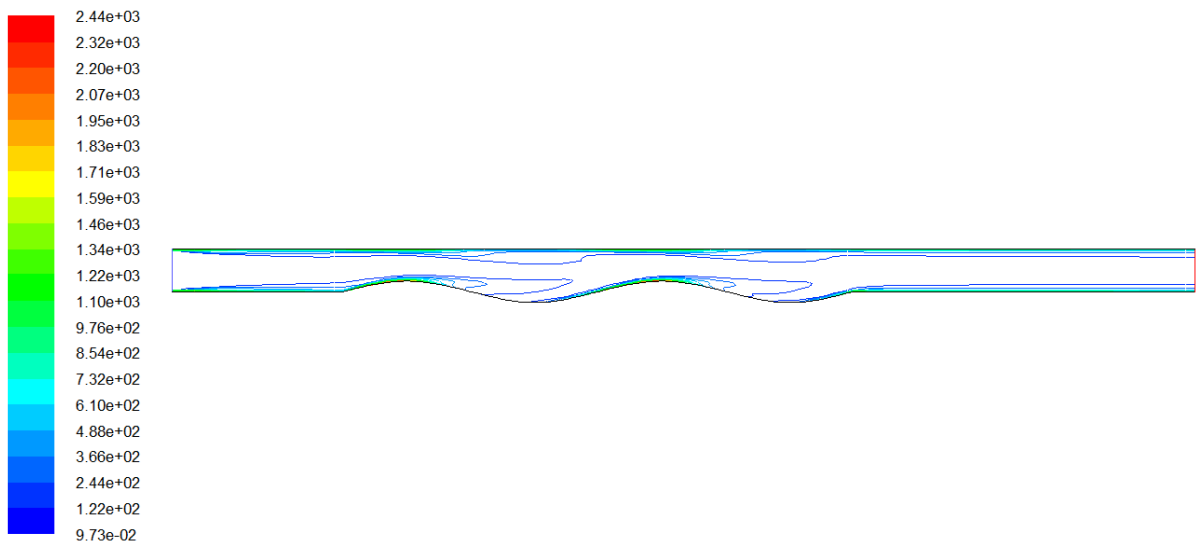


Figure 17 Contour de vorticité (Reynold 1500)

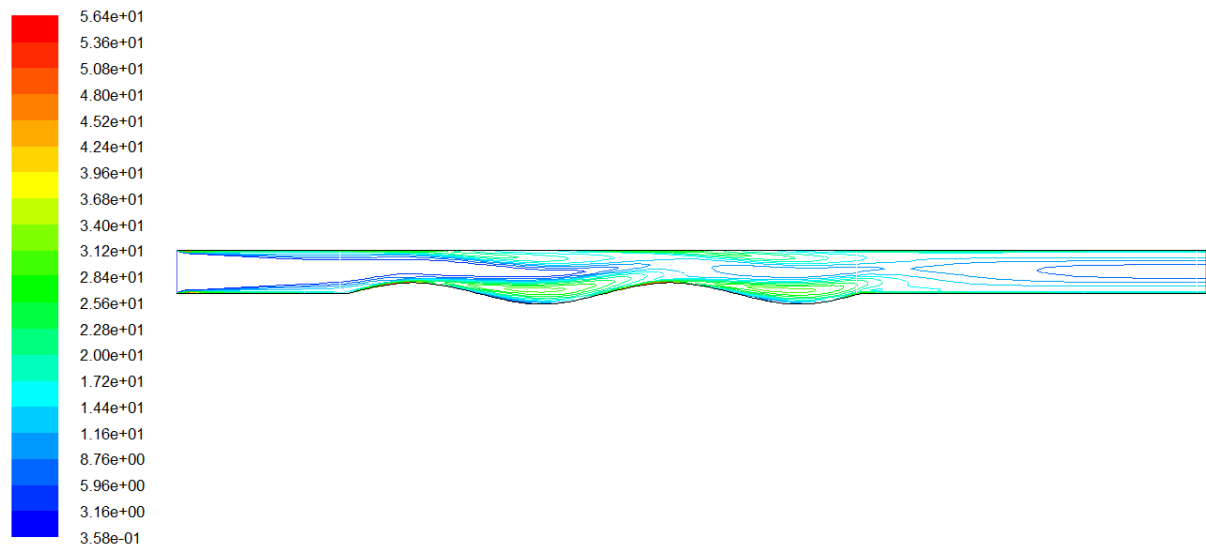


Figure 18 Energie cinétique turbulente (Reynold 1000)

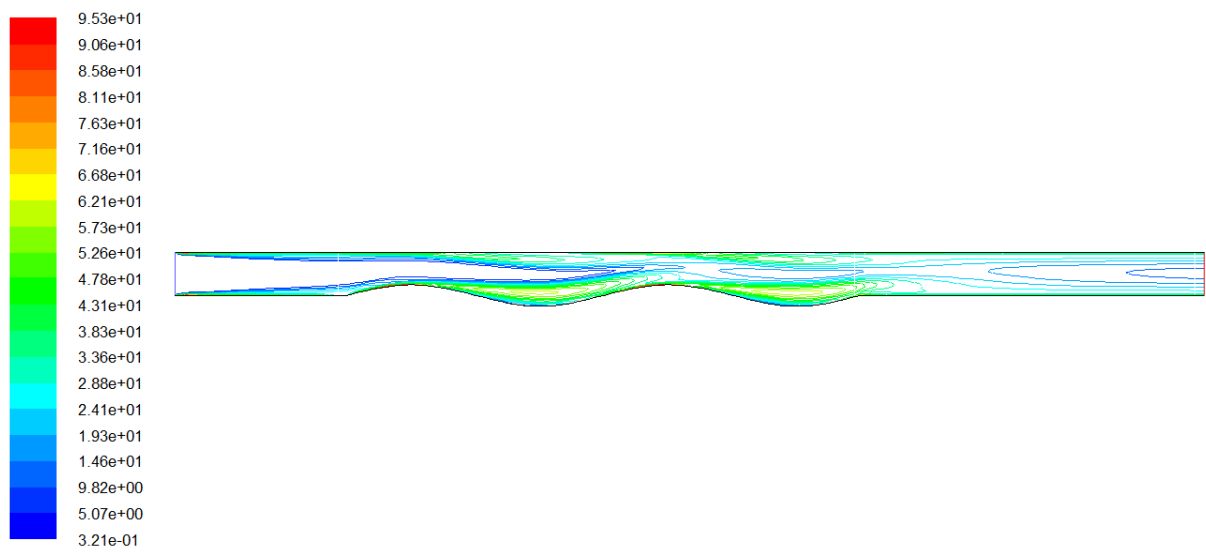


Figure 19 Energie cinétique turbulente (Reynold 1500)

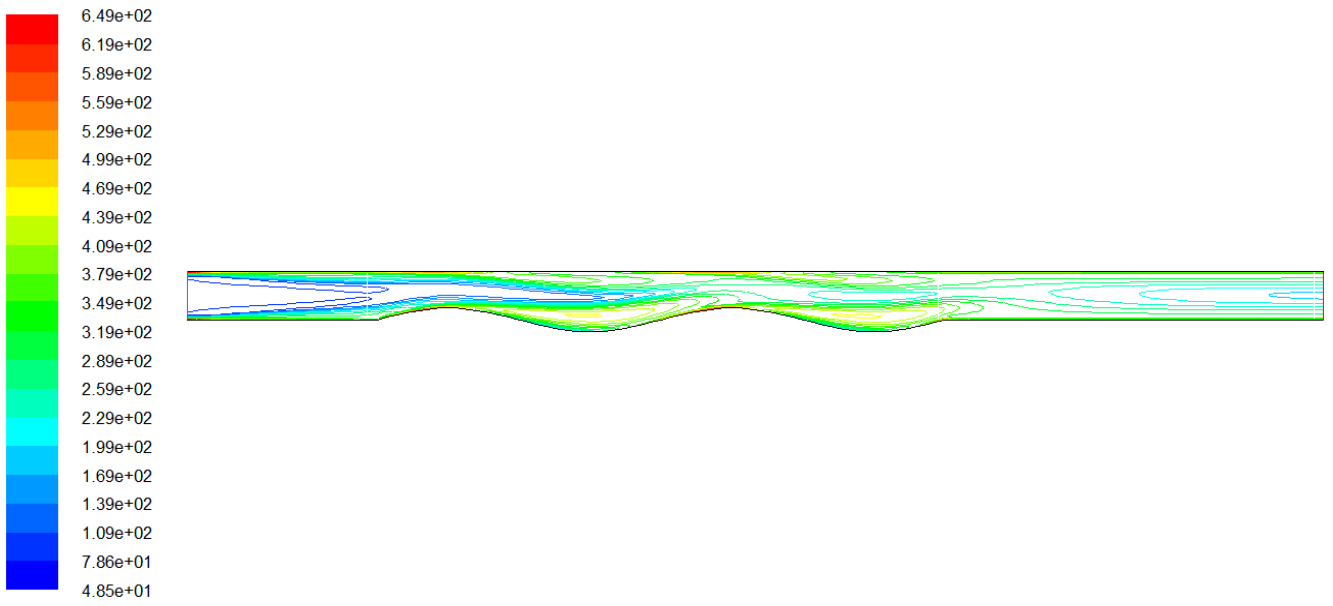


Figure 20 Intensité de Turbulence (Reynold 1000)

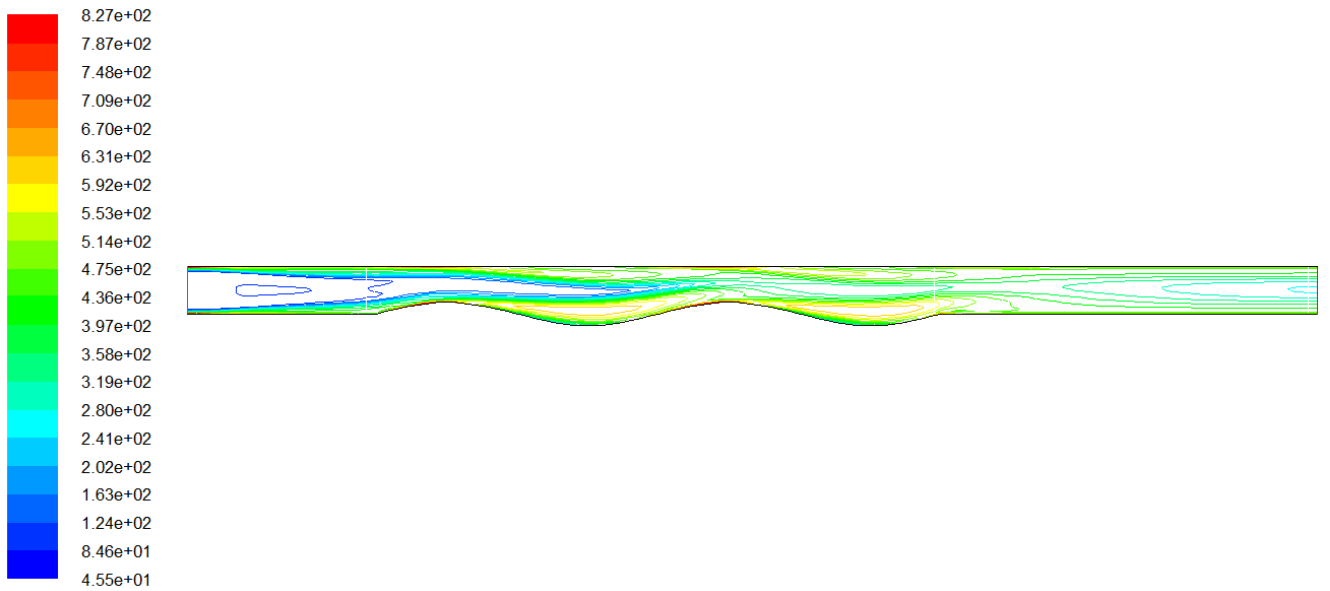


Figure 21 Intensité de Turbulence (Reynold 1500)

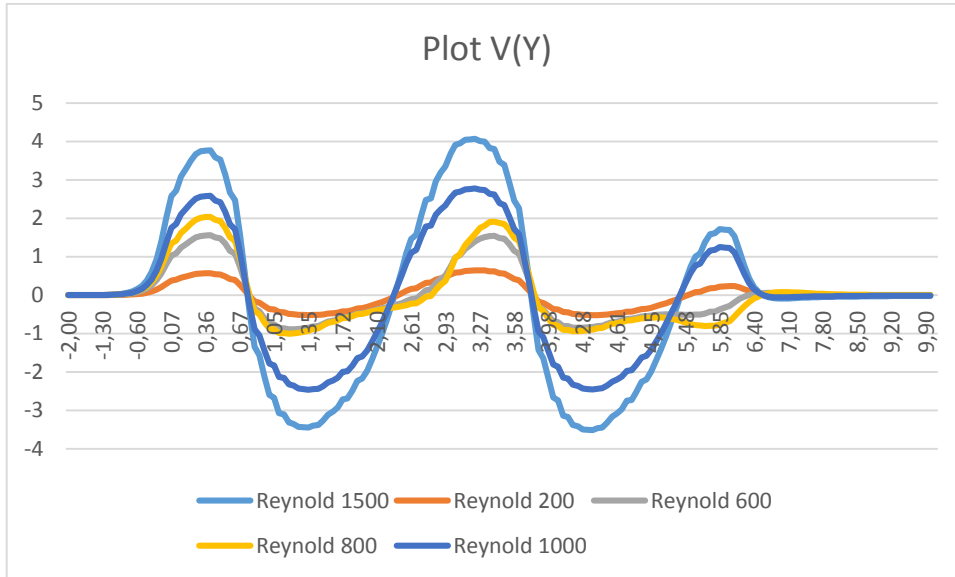


Figure 22 Plot V(y) Amplitude = 0.125

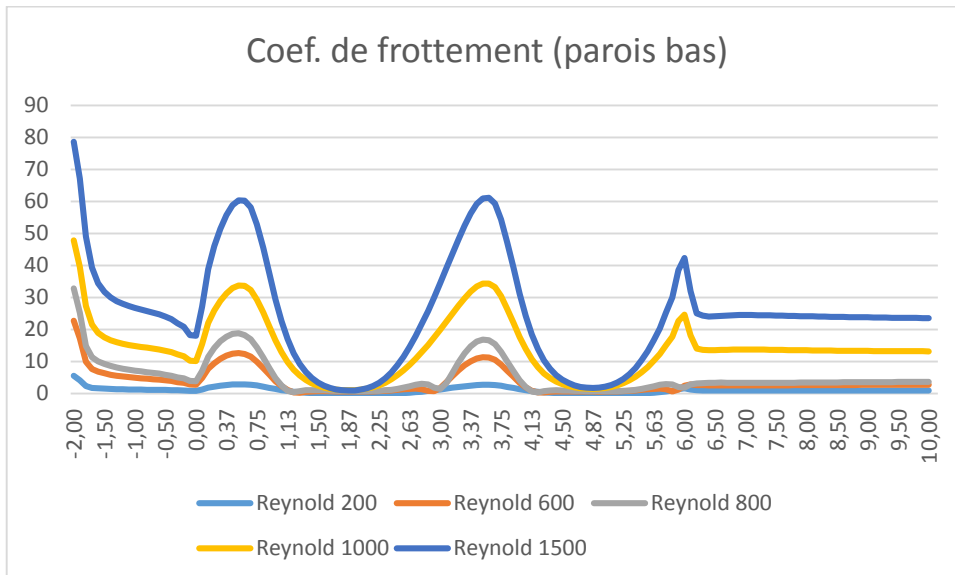


Figure 23 Coef. de frottement Amplitude=0.125

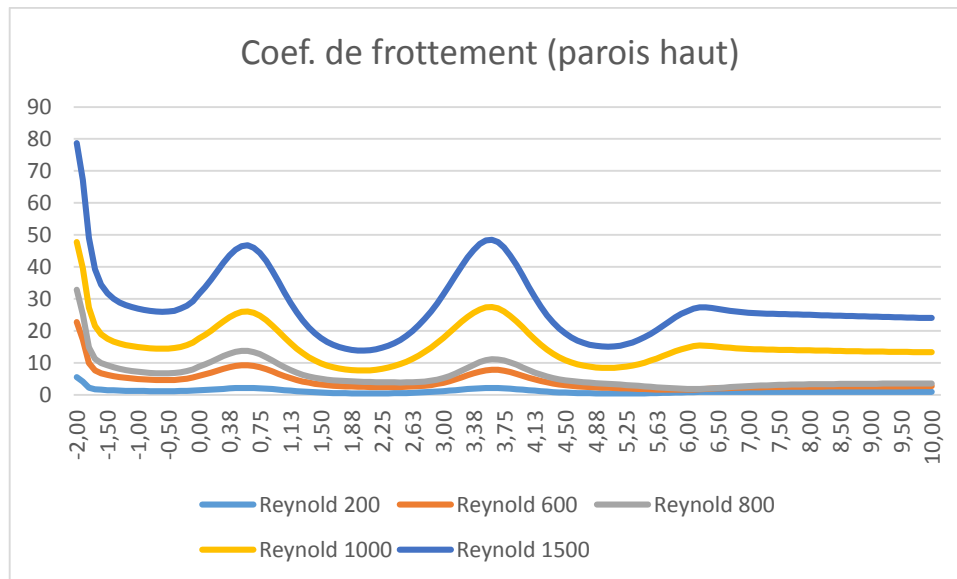


Figure 24 Coef. de frottement Amplitude=0.125

D'après ces résultats numériques ci-dessus, on remarque :

Les figures 3 à 7 représentent les lignes de courant de l'écoulement, pour les différents nombres Reynolds. On constate que la structure d'écoulement se déforme et s'active en fonction de l'augmentation du nombre de Reynold. Les déformations sont très proches des couches limites de la paroi ondulée.

Les figures 8 à 12 identifient les profils des vecteurs de vitesse de l'écoulement, pour les nombres de Reynolds (200 600 800 1000 et 1500). On constate que le profil de la vitesse s'établi dans la zone d'entrée en empruntant un profil parabolique avant de rentrer dans la zone ondulée. Dans la zone de sortie non ondulée, le profil de vitesse reprend sa forme établie jusqu'à la sortie de la conduite. La déformation du profil de vitesse le long de la conduite ondulée s'accroît avec l'augmentation du nombre de Reynold.

On distingue de ce fait, les vecteurs des vitesses qui sont aux sommets des ondules, sont plus accélérés que celles près de la couche limite bas.

Les figures 13 à 17, représentent les contours de vortécité de l'écoulement en fonction du nombre de Reynolds. Ceci a permis d'observer le déclenchement des vortex au niveau des parois ondulées et que la vortécité apparaît au niveau des parois et s'accroît avec l'augmentation du nombre de Reynold.

La figure 22, représente les vitesses $V(y)$ de l'écoulement, pour les nombres de Reynolds (200 600 800 1000 et 1500), on observe que les vitesses $V(y)$ augmentent quand le nombre de

Reynold augment dans la section ondulée, elles sont stables et nulles à l'entrée et à la sortie de la conduite.

Les figures 23 et 24, montrent la variation du coefficient de frottement de l'écoulement pour les différents nombres de Reynolds. On aperçoit que le coefficient de frottement augment puisque le nombre de Reynold augmente.

On note que les valeurs de coefficient de frottement augmentent plus aux sommets des ondules des parois basse et faible pour la paroi haute, une diminution pour l'entrer et entre les ondules de la conduite et se stabilise à la sortie de la conduite.

Les figures (20,21), représentent l'énergie et l'intensité de la turbulence de l'écoulement, pour les différents nombres de Reynolds, on remarque que la turbulence augmente avec l'augmentation du nombre de Reynold.

On note aussi que la turbulence apparait dans la partie ondulée pour les nombres de Reynolds supérieur à 1000 et l'écoulement devient moins turbulent à la sortie de la conduite.

III-2 Etude de l'effet de l'amplitude sur la structure de l'écoulement :

Dans ce cas on simule l'écoulement à travers la paroi en fixant la longueur d'onde de l'ondulation $\lambda = 6D$ le Reynold à 1000 et on varie l'amplitude de 0.2D à 0.4D.

1- Amplitude = 0.2D

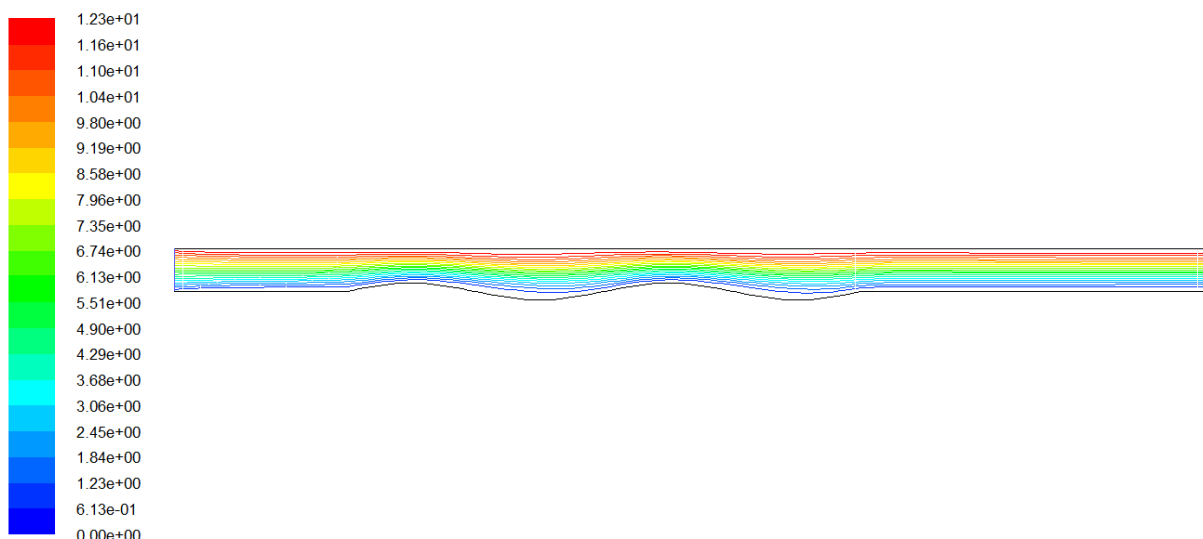


Figure 25 Les lignes de courant (Reynold 1000)

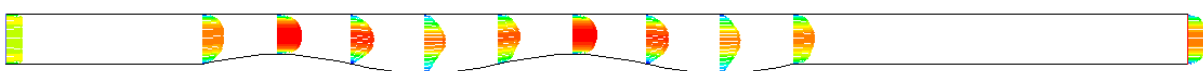


Figure 26 vecteurs de vitesse (Reynold 1000)

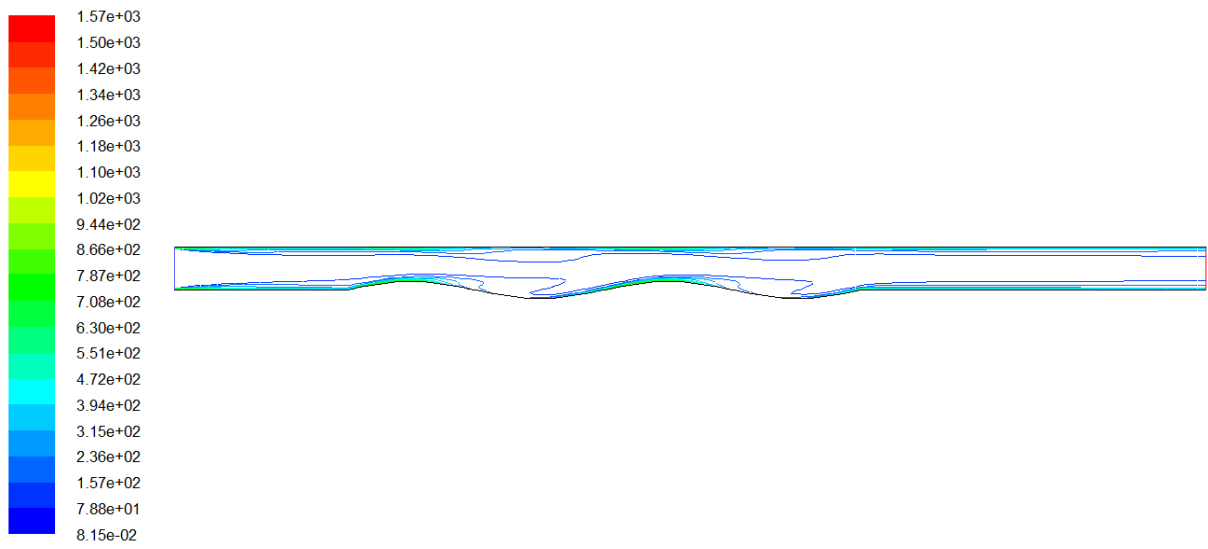


Figure 27 Contour de vorticité (Reynold 1000)

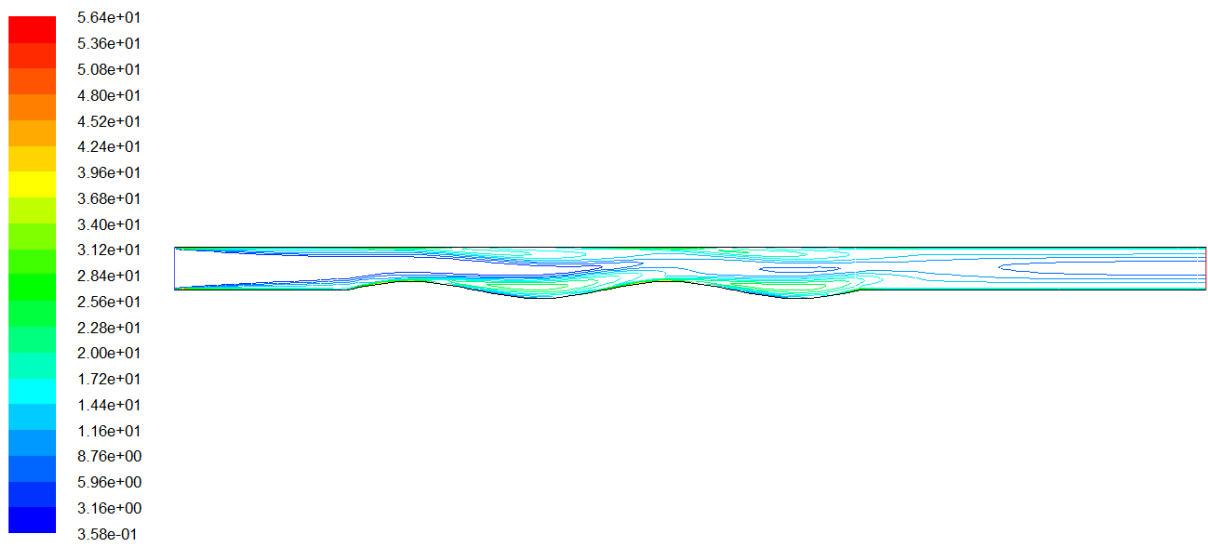


Figure 28 Energie cinétique Turbulente (Reynold 1000)

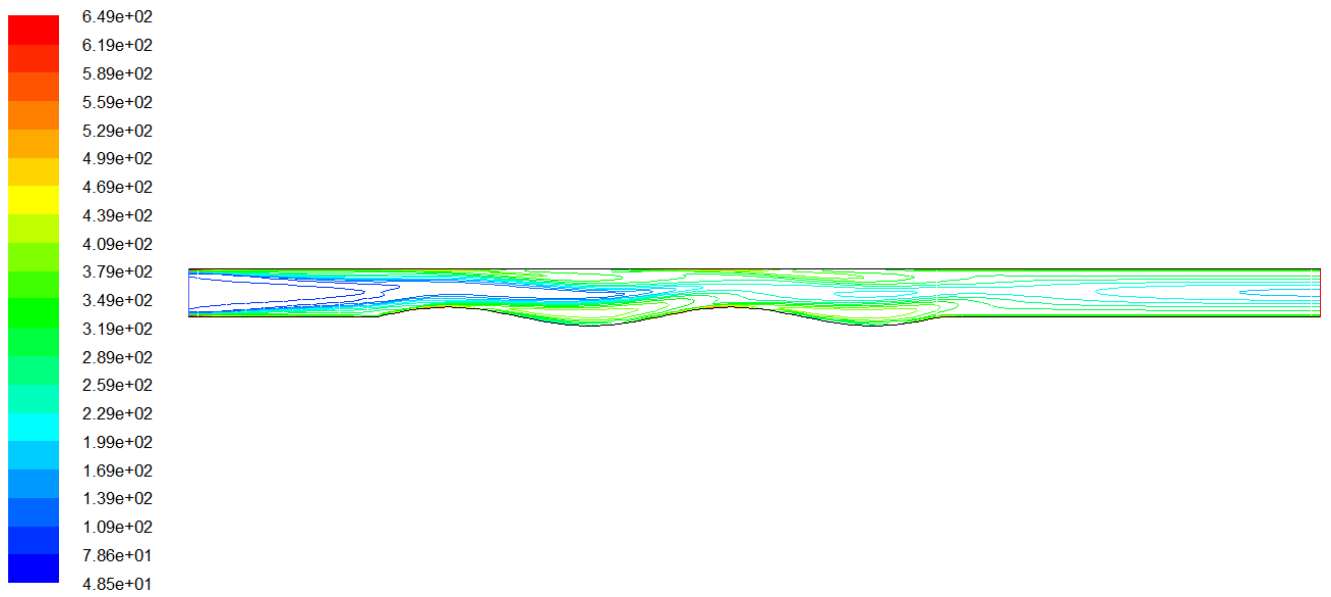


Figure 29 Intensité de Turbulence (Reynold 1000)

2- Amplitude = 0.3D

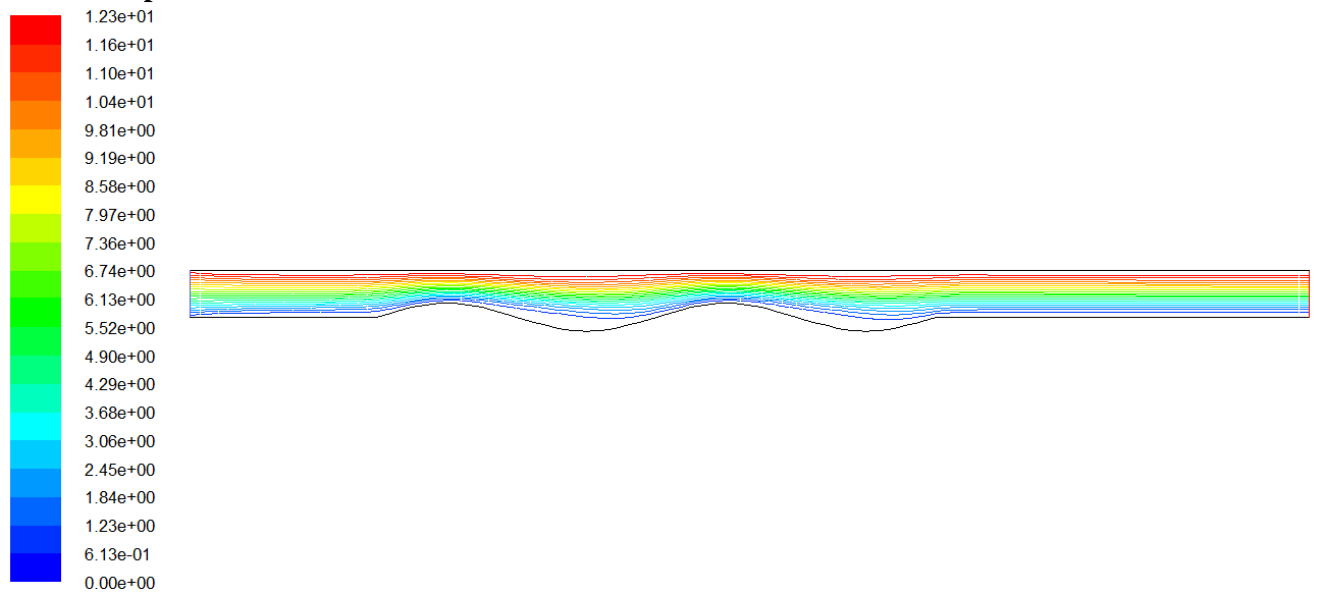


Figure 30 Les lignes de courant (Reynold 1000)

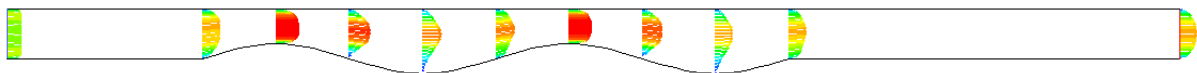


Figure 31 profils des Vecteurs de vitesse (Reynold 1000)

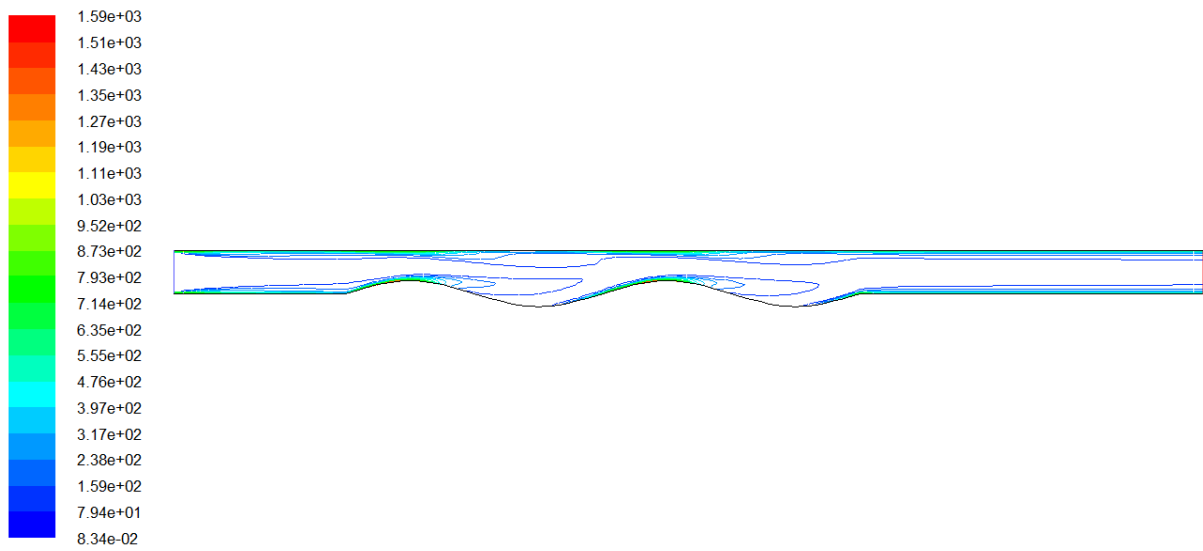


Figure 32 contour de vorticité (Reynold 1000)

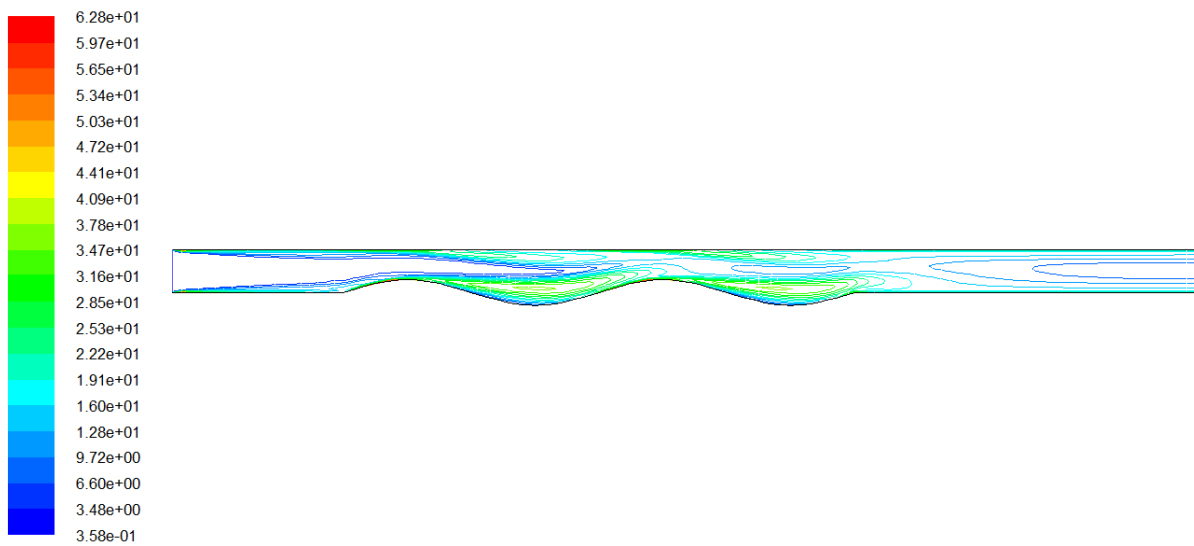


Figure 33 Energie cinétique Turbulente

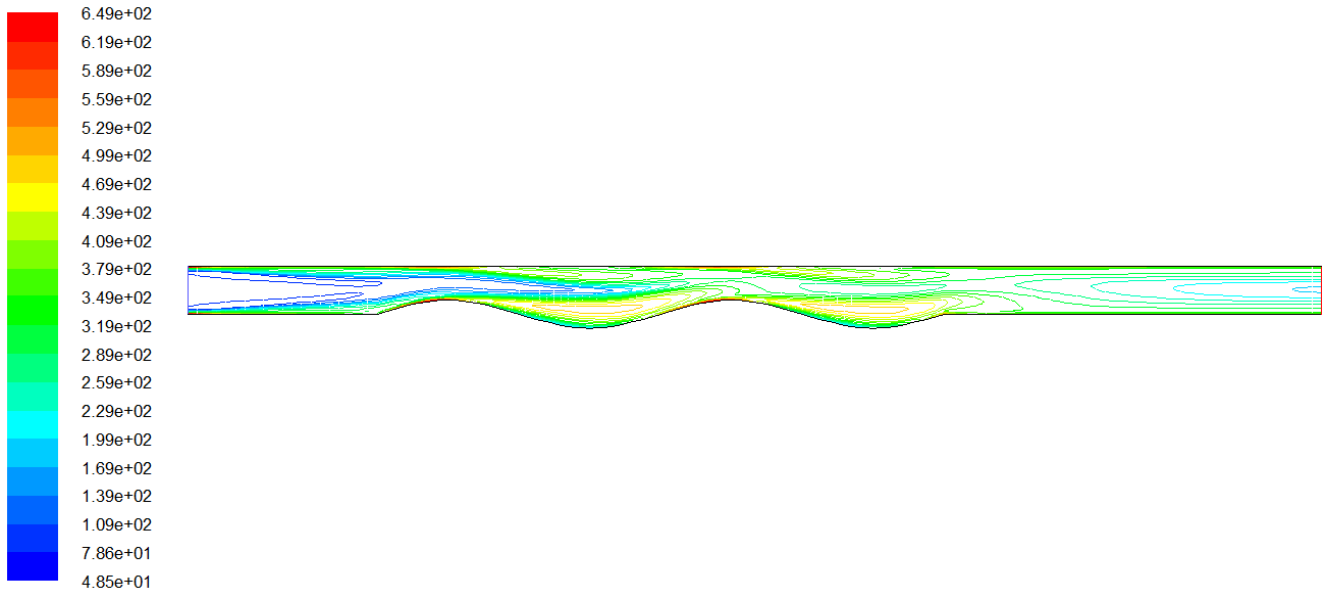


Figure 34 Intensité de Turbulence

3- Amplitude = 0.4D

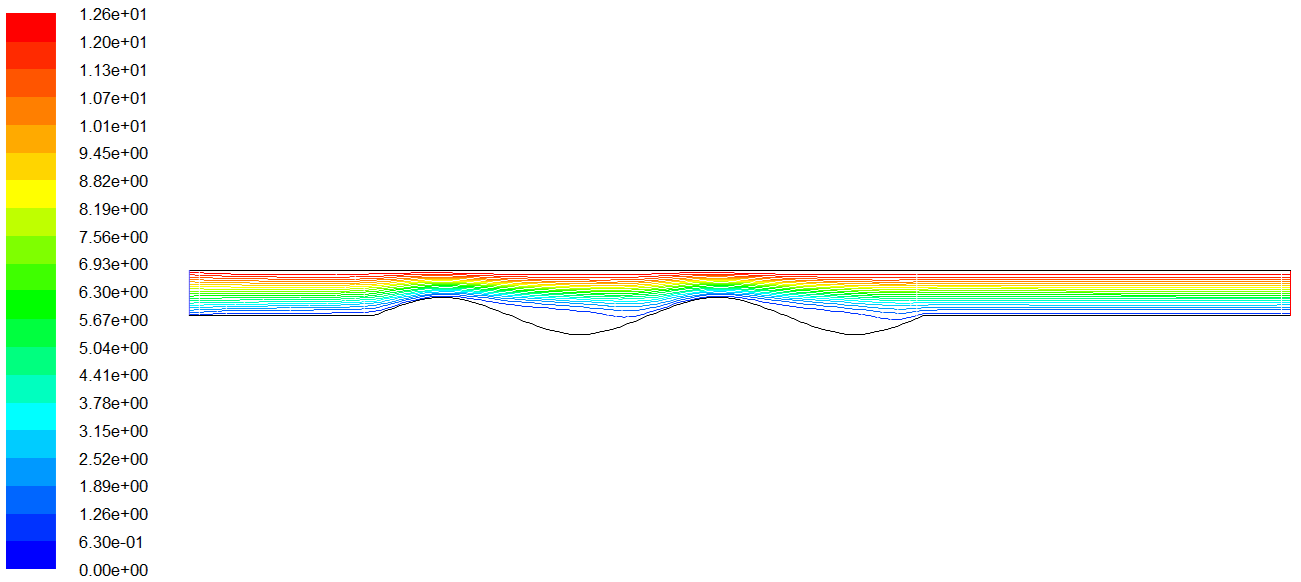


Figure 35 Les lignes de courant (Reynold 1000)

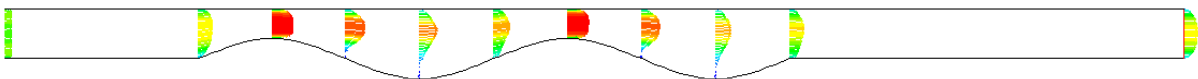


Figure 36 Vecteurs de vitesse (Reynold 1000)

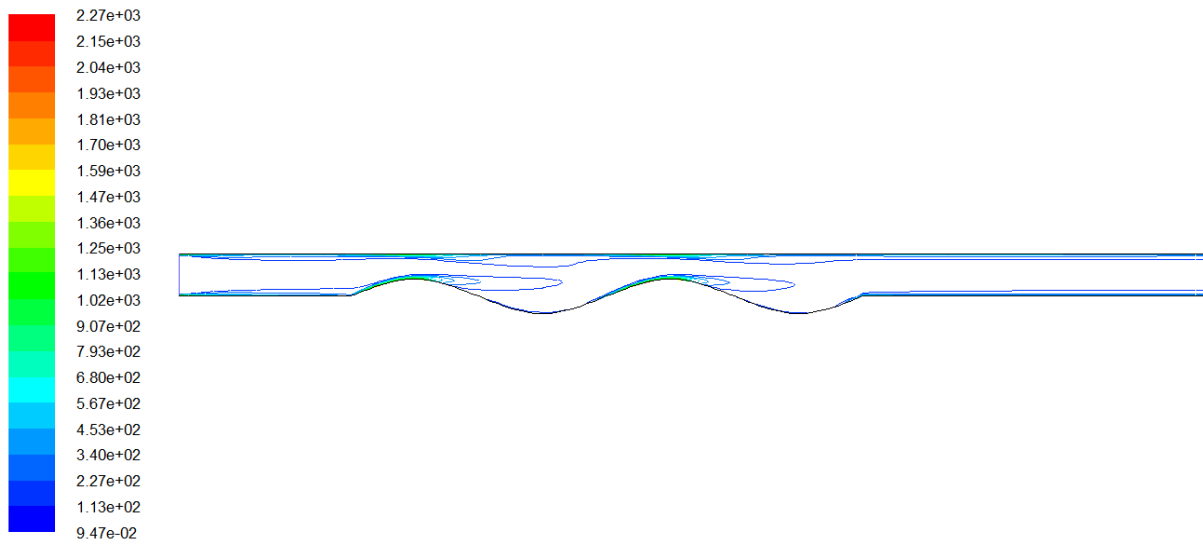


Figure 37 contourde vorticité (Reynold 1000)

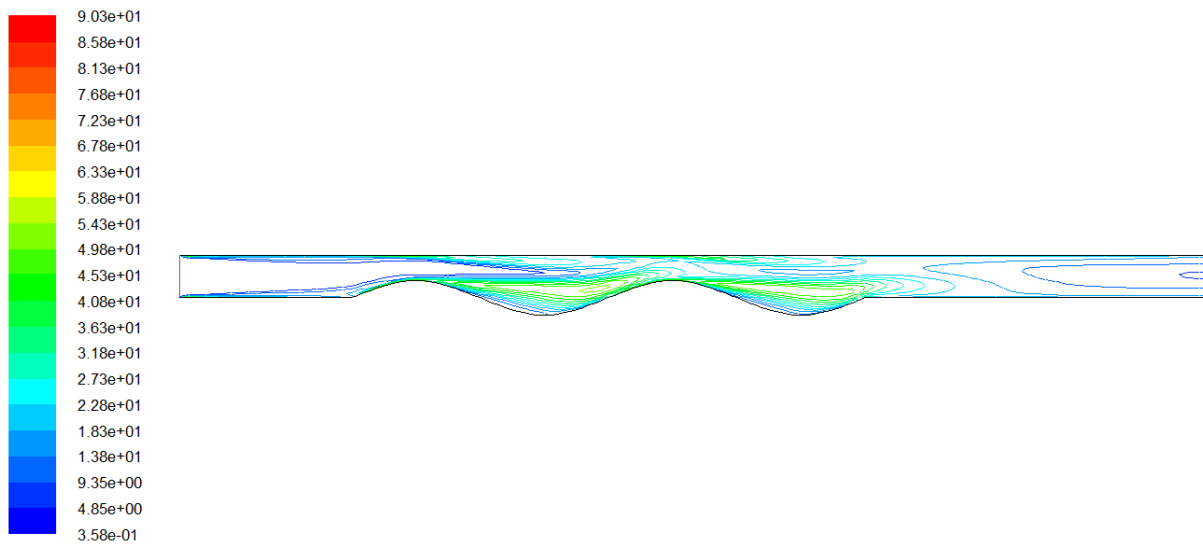


Figure 38 Energie cinétique Turbulente (Reynold 1000)

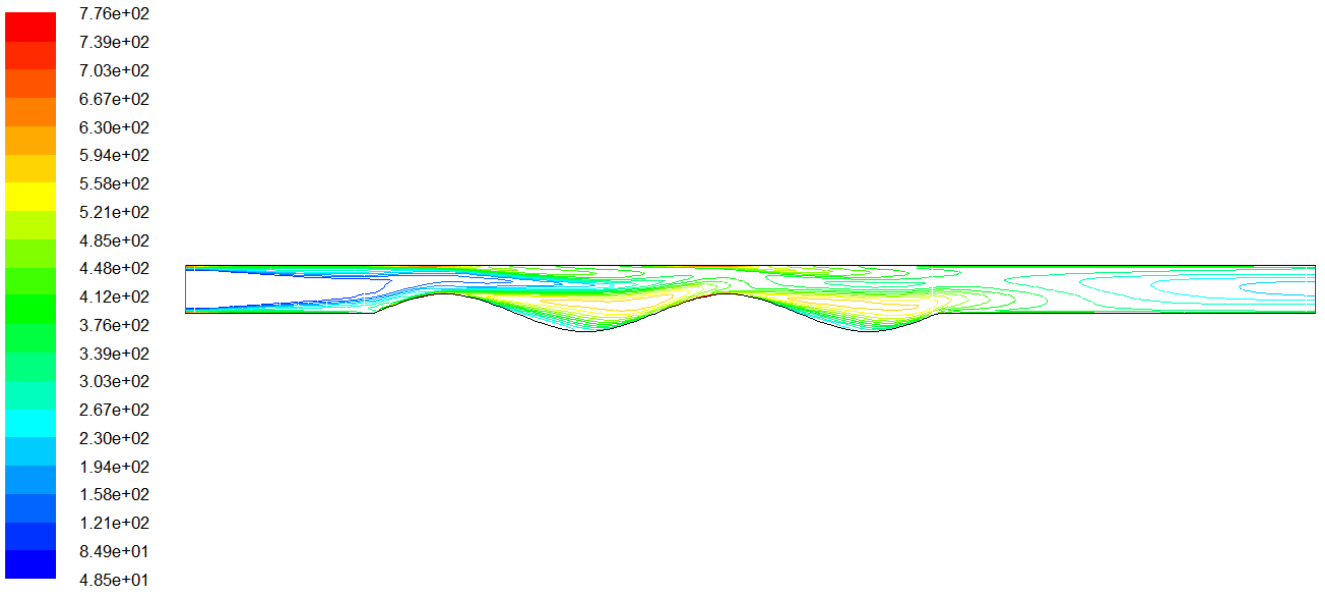


Figure 39 Intensité de turbulence

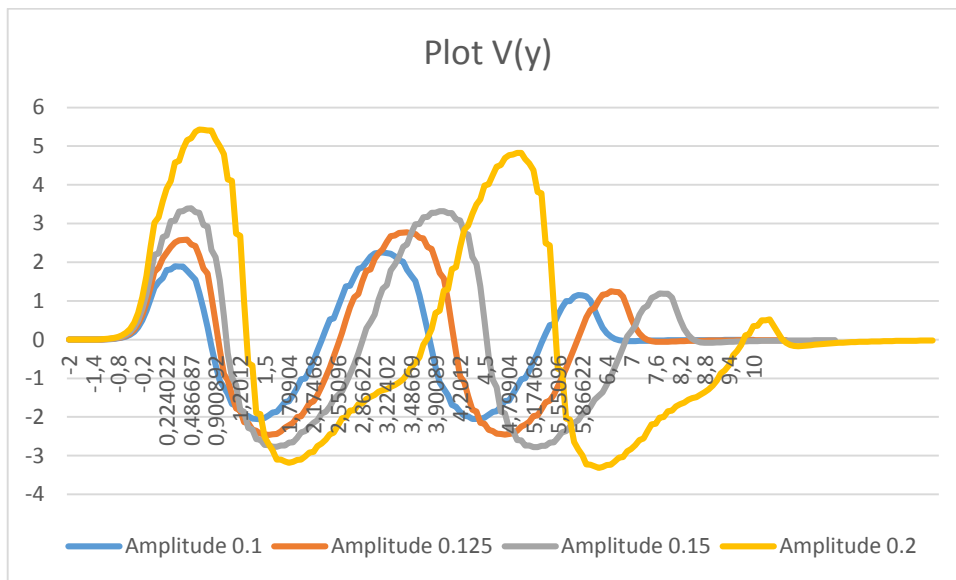


Figure 40 Plot V(y) Reynold=1000

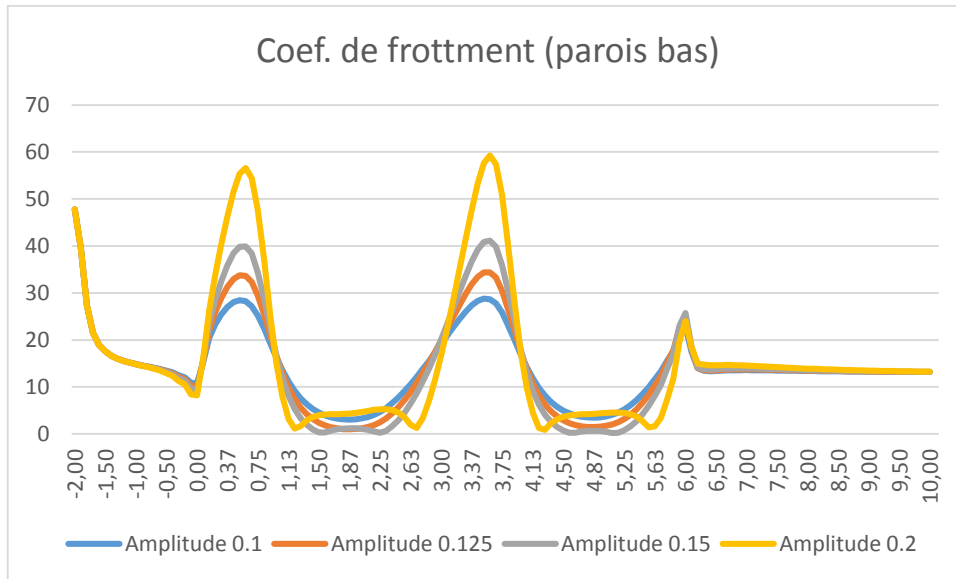


Figure 41 Coef. de frottement parois bas (Reynold=1000)

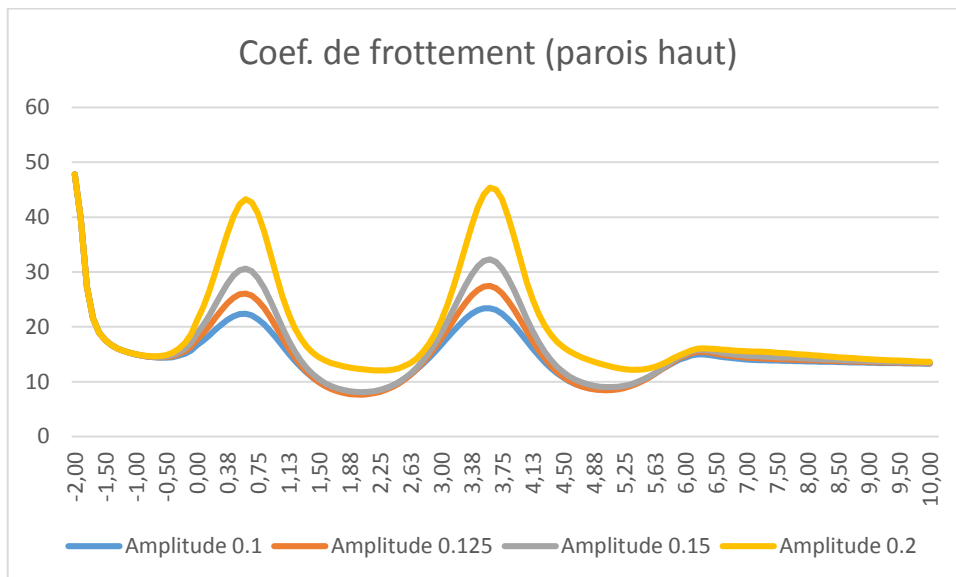


Figure 42 Coef. de frottement parois haut (Reynold=1000)

Les figures du 2eme cas évoquent les paramètres de l'écoulement par rapport aux différentes amplitudes pour les parois ondulées.

Les résultats numériques ci-dessus, soulignent et démontrent que :

Les lignes de courant (figures 25, 30, 35) et les lignes du vorticité (figures 27, 32, 37) sont plus denses dans la zone ondulée et se rapprochent beaucoup plus avec l'augmentation de l'amplitude.

Les vecteurs de vitesse (figures 26, 31, 36), augmentent avec l'augmente de l'amplitude. On remarque aussi qu'ils sont plus accélérés aux sommets des ondulations.

Les figures 28, 29, 33, 34, 38 et 39, montrent l'énergie et l'intensité de la turbulence. On remarque une augmentation de la turbulence avec l'augmentation de l'amplitude. On voit aussi que la turbulence est plus forte dans la zone de la paroi ondulée et faibles à l'entrée et à la sortie de la conduite.

Les résultats numériques (figure 40), représentent le profil de la vitesse $V(y)$. Cette dernière reste la même pour l'entrée et la sortie de conduite. Le profil suit la géométrie de la paroi ondulée ; plus l'amplitude est grande plus la vitesse $V(y)$ est grande.

Les figures (41 et 42), montrent la variation du coefficient de frottement sur les parois basses et hautes. On remarque une augmentation du coefficient de frottement sur les parois basses en fonction de l'augmentation de l'amplitude.

III-3 Etude de l'effet de la longueur d'onde sur la structure de l'écoulement :

Dans ce cas on examine l'écoulement à travers la paroi en fixant l'amplitude à $0.3D$, le Reynold à 1000 et on varie la longueur d'onde de l'ondulation λ

$$\lambda = 2D$$

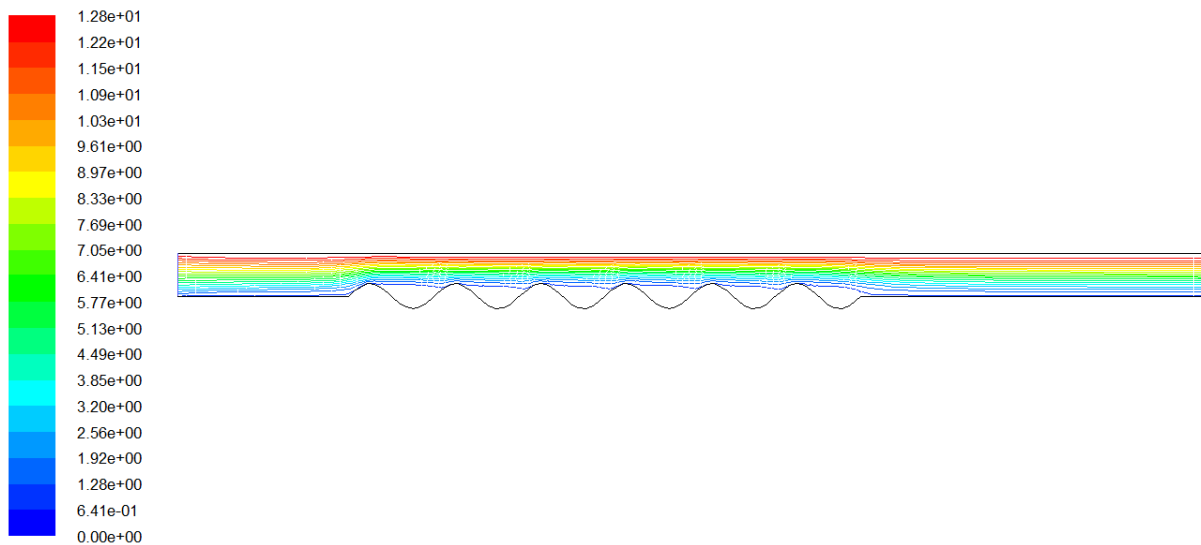


Figure 43 Les lignes de courant (Reynold=1000)

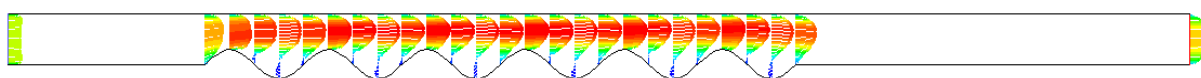


Figure 44 Vecteurs de vitesse (Reynold=1000)

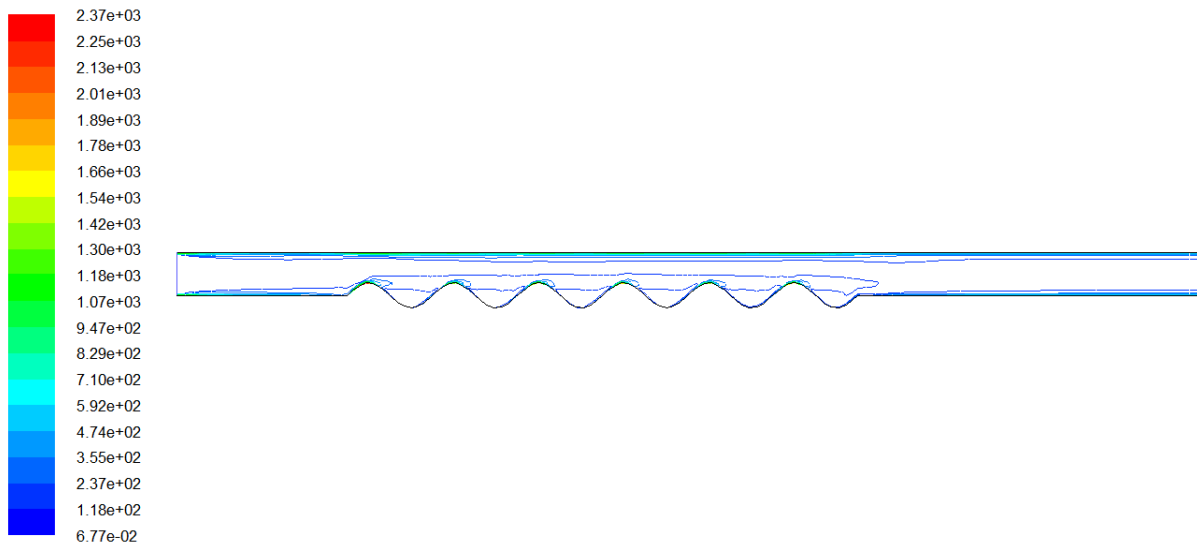


Figure 45 Contour de vorticité (Reynold=1000)

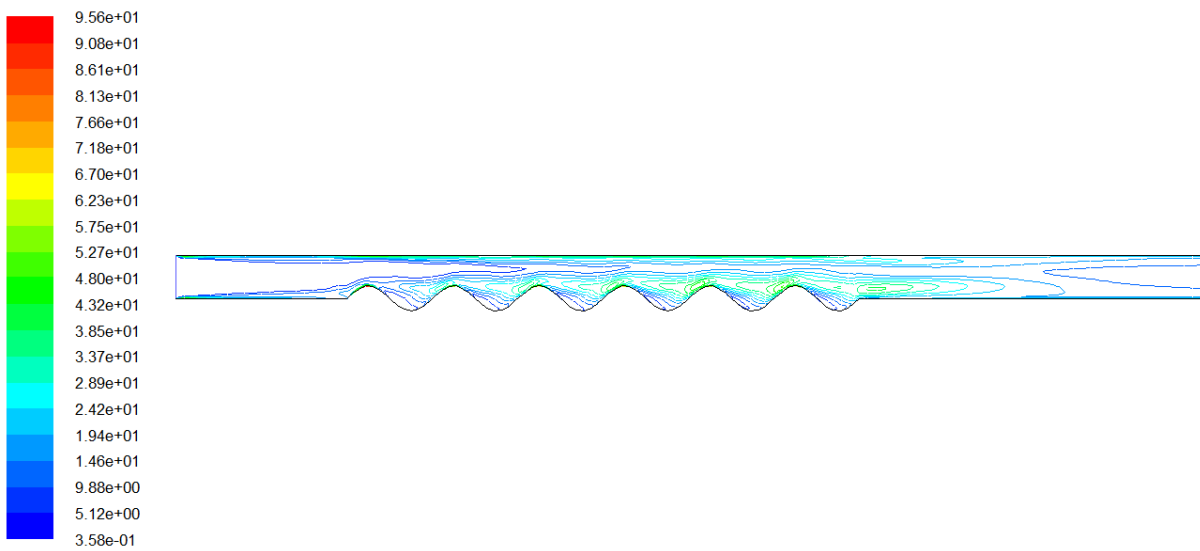


Figure 46 Energie cinétique Turbulente (Reynold=1000)

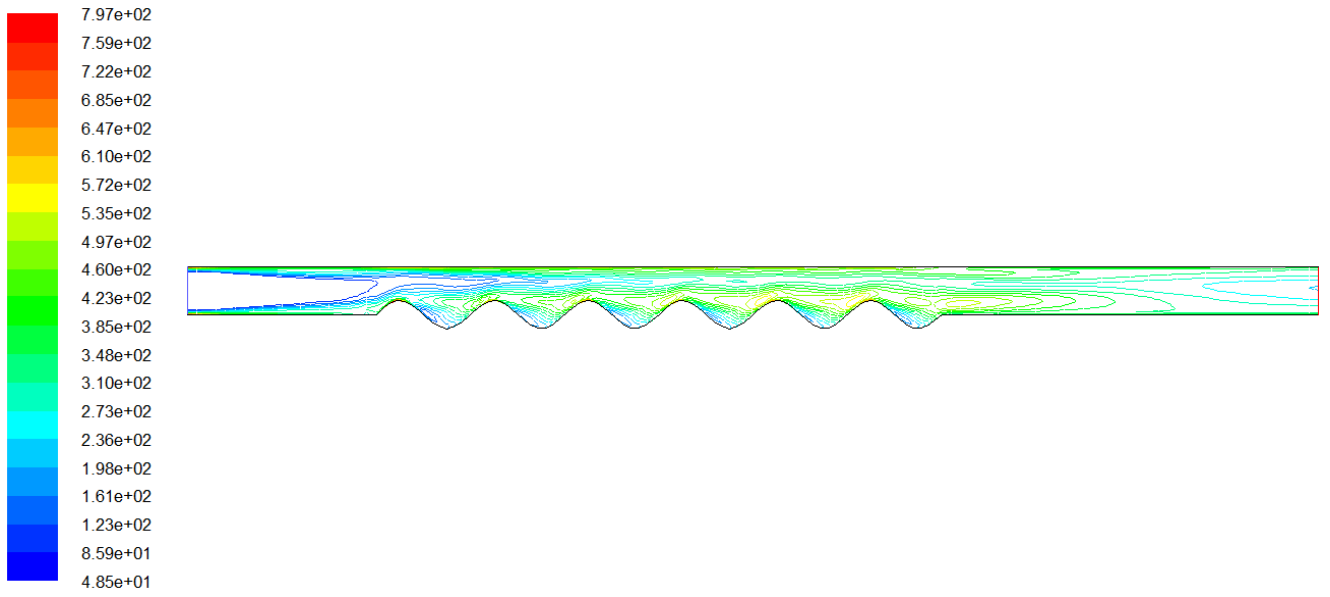


Figure 47 Intensité de Turbulence

$\lambda = 4D$

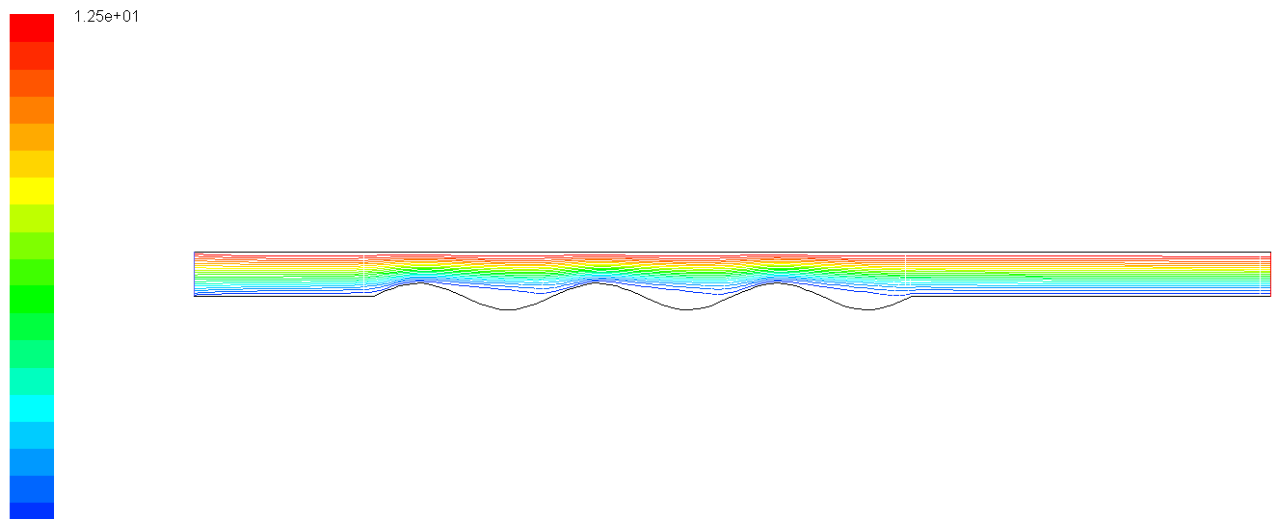


Figure 48 Les lignes de courant (Reynold=1000)

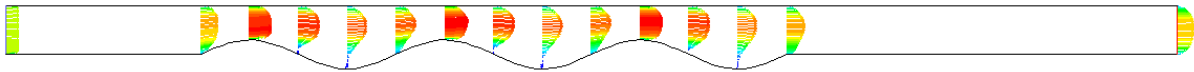


Figure 49 Vecteurs de vitesse (Reynold=1000)

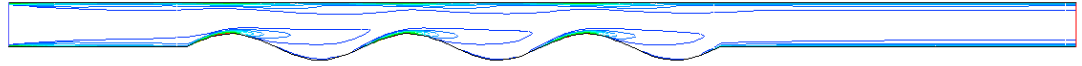


Figure 50 Contour de vorticité (Reynold=1000)

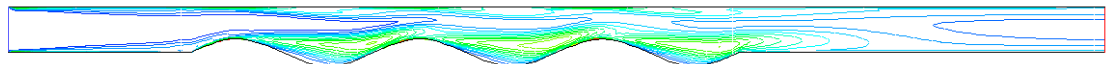
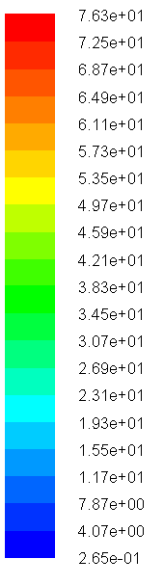


Figure 51 Energie cinétique turbulente (Reynold=1000)

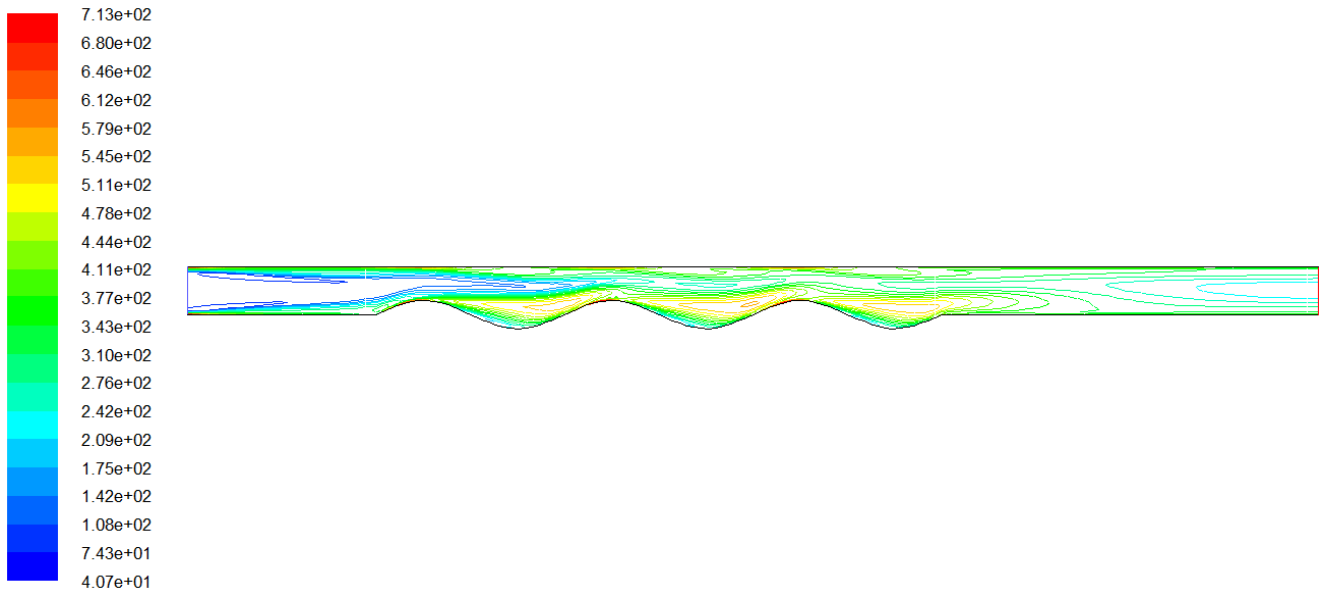


Figure 52 Intensité de Turbulence

$\lambda = 6D$

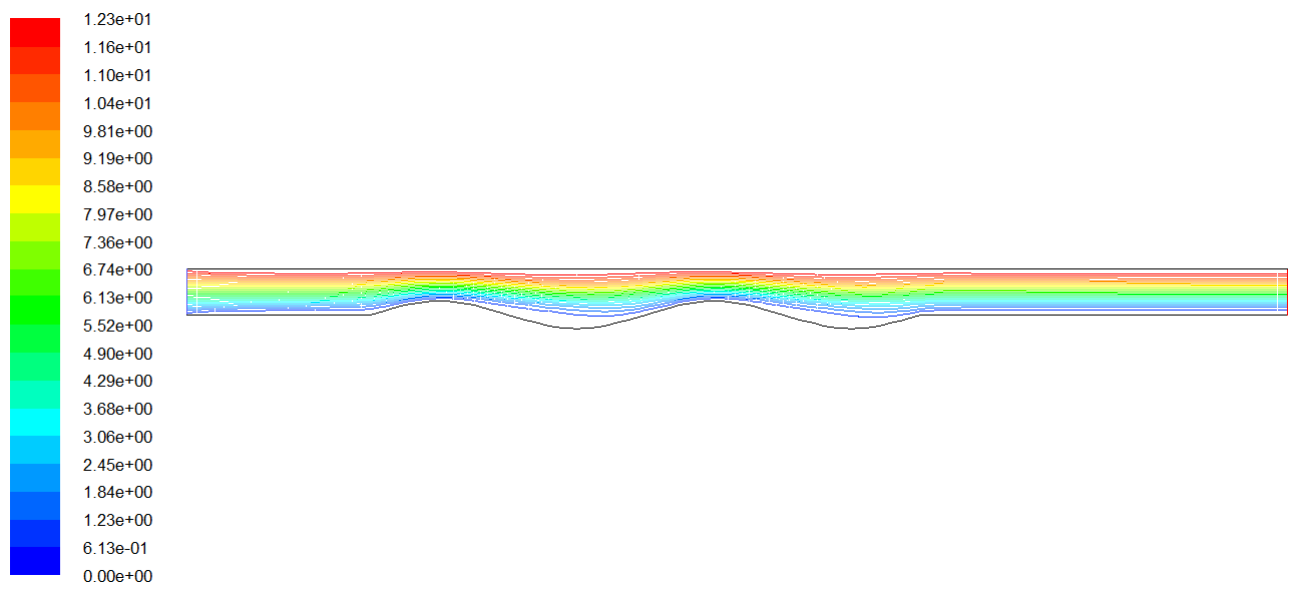


Figure 53 Les lignes de courant (Reynold 1000)

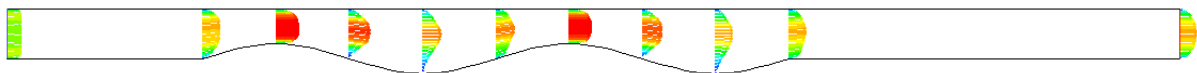


Figure 54 Vecteurs de vitesse (Reynold 1000)

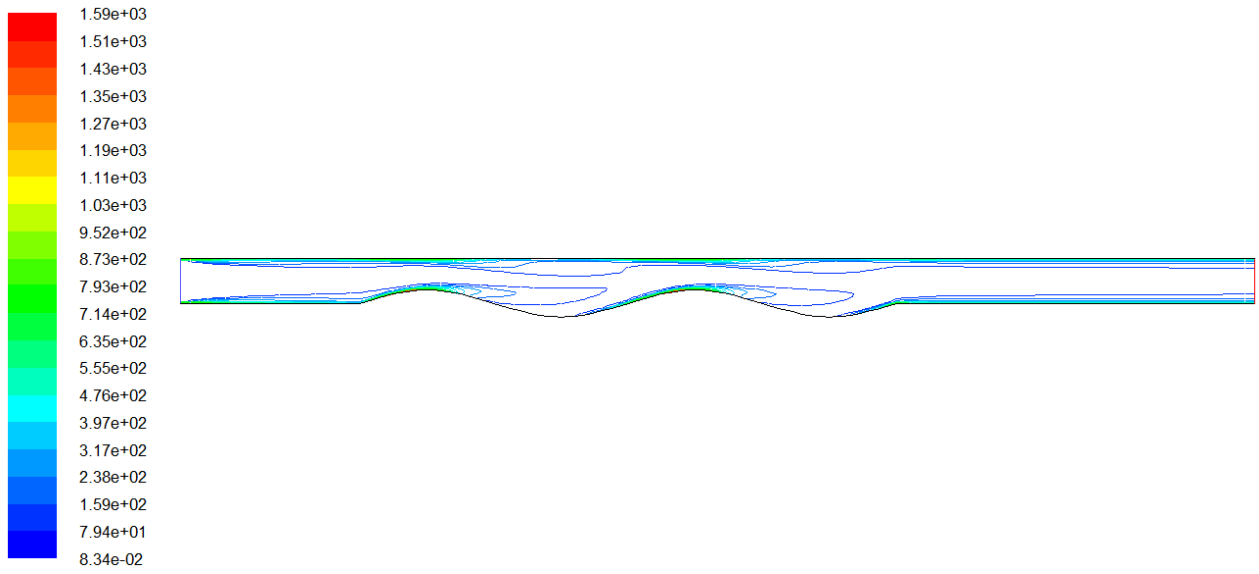


Figure 55 Contour de vorticité (Reynold 1000)

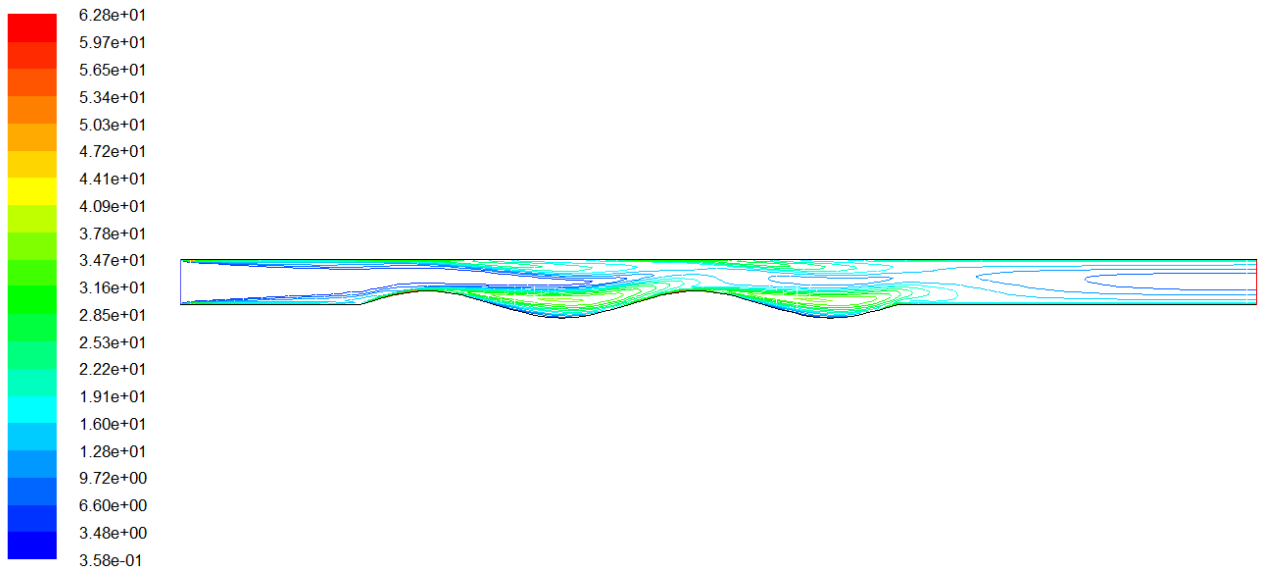


Figure 56 Energie cinétique Turbulente (Reynold=1000)

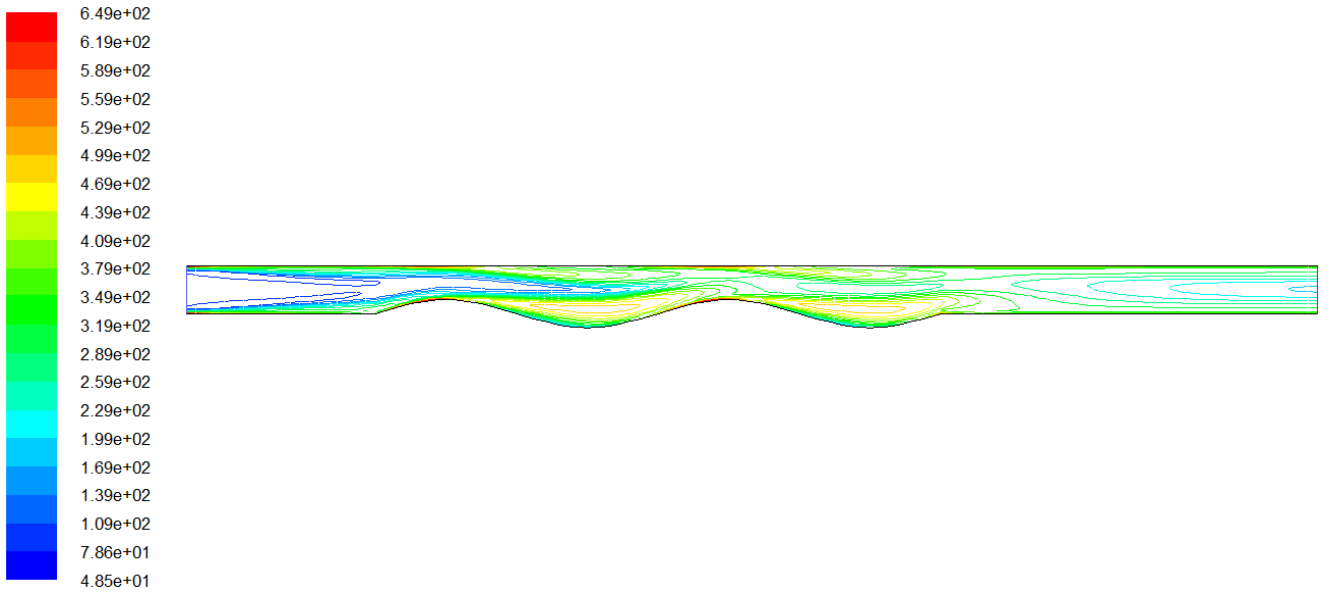


Figure 57 Intensité de Turbulence

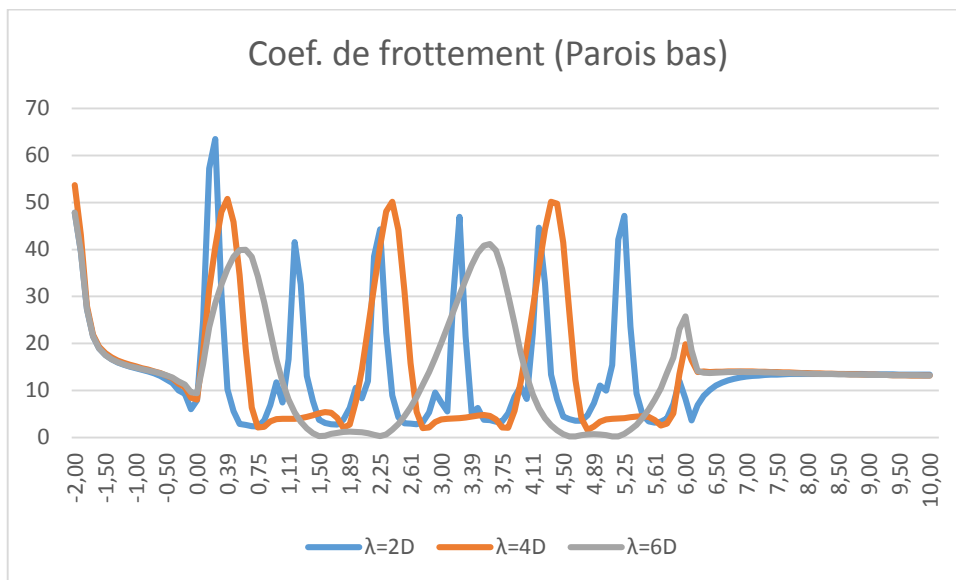


Figure 58 Coef. de frottement parois bas (Reynold=1000)

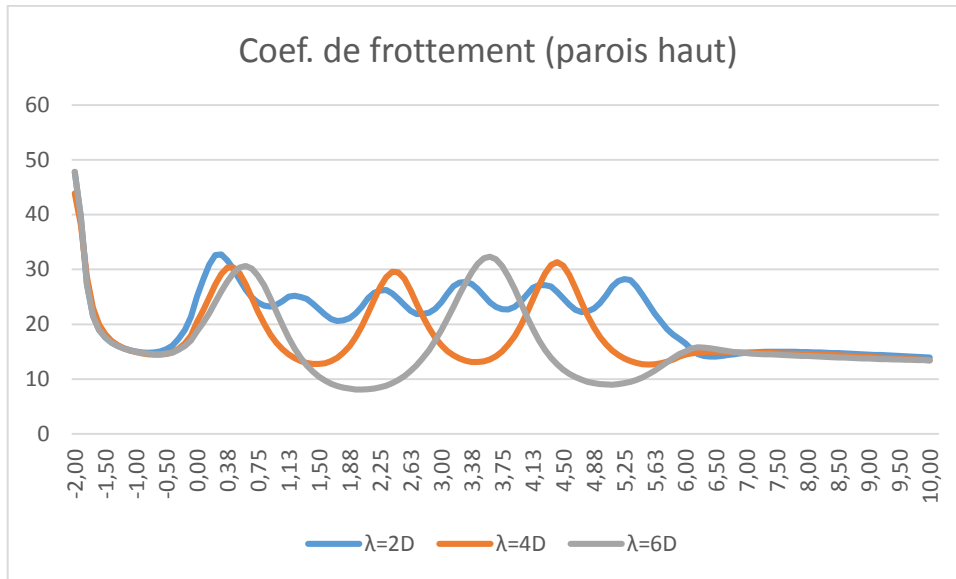


Figure 59 Coef. de frottement parois haut (Reynold=1000)

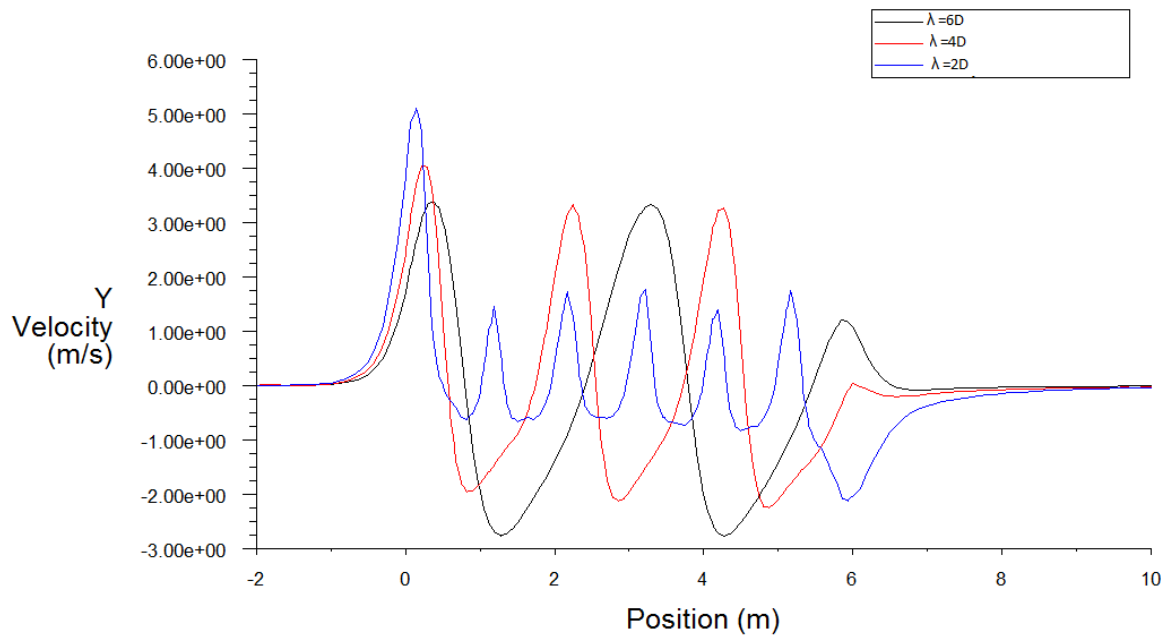


Figure 60 Plot $V(y)$ Reynold=1000

Les figures du 3eme cas désignent les paramètres de l'écoulement par rapport aux différentes longueurs d'onde (λ) pour les parois ondulées.

D'après ces résultats numériques ci-dessus, on discerne clairement que :

Les lignes du courant (figures 43, 48 et 53) et les lignes du vorticity (figures 45, 50 et 55), deviennent plus dense avec la diminution de la période λ . Les lignes sont plus rapprochées dans la partie ondulée quand la longueur d'onde (λ) diminue.

Les vecteurs de vitesse (figures 44, 49 et 54), augmentent puisque la longueur d'onde (λ) diminue. On remarque aussi une accélération des vecteurs de vitesse sur les parois ondulées.

La turbulence est représentée par l'énergie et l'intensité de turbulence dans l'écoulement (voir figures 46, 47, 51, 52, 56 et 57). On remarque l'intensité de la turbulence augmente avec la diminution de la longueur d'onde (λ). On aperçoit aussi que la turbulence est plus forte dans la zone ondule de la conduite ondulée.

Les résultats numériques (figure 60), représentés par le profil de la vitesse $V(y)$ restent les mêmes pour l'entrée et la sortie de la conduite, avec une accélération sur les parois ondulées et une diminution entre les parois ondulées. Les profils suivent la géométrie de la conduite.

Les figures (58 et 59), montre la variation du coefficient de frottement sur les parois basses et hautes. On constate une augmentation forte du coefficient de frottement sur la paroi basse. Le coefficient de frottement augmente quand la longueur d'onde (λ) diminue.

CONCLUSION

A travers cette étude numérique de l'écoulement on a pu présenter les différents résultats obtenus pour les configurations géométriques, à savoir tube ondulé avec différentes amplitude et longueur d'onde de l'ondulation et ce pour des régimes de Reynold variant de 200 à 1500.

La modélisation mathématique de ce problème physique est basée sur les équations de conservation de masse et de la quantité de mouvement. Les propriétés thermo physiques sont considérées constantes.

Des hypothèses simplificatrices ont été introduites et justifiées afin de simplifier le système des équations utilisées. La résolution numérique de cette dernière est effectuée par la méthode des volumes finis. Le couplage vitesse-pression est traité par l'algorithme SIMPLE, et la simulation numérique a été effectuée avec le code (FLUENT).

Les principaux résultats tirés de ce travail peuvent être résumés comme suit :

- Les lignes de courants sont représentées par des faibles tourbillons qui peuvent être observés dans le centre de la conduite où se trouve la zone ondulée.
- L'augmentation de nombre d'ondulations de la paroi provoque des faibles tourbillons près de la paroi.
- Le coefficient de frottement sur la paroi inférieure augmente et se stabilise à la sortie de la conduite
- L'augmentation du nombre de Reynold mène à une augmentation de coefficient de frottement.
- La taille de la zone de recirculation augmente avec l'augmentation du nombre de Reynolds

Perspectives

Dans ce travail, le processus itératif CFD nous a permis de comprendre et de mieux prendre en compte les paramètres adéquats pour ce type d'écoulement.

Dans un futur travail, on suggère d'étudier l'écoulement dans une conduite avec deux parois ondulées (haut et bas) associées au transfert de chaleur et introduisant régime turbulent. Cette dernière constituera une perspective intéressante afin de mieux prendre en compte le caractère tourbillonnaire et instationnaire du sillage près de la paroi ondulée.

Bibliographie :

[1] Dorin Stanciu, Mircea Marinescu, Alexandru Dobrovicescu **2008** - etude comparative des irréversibilités dans la convection forcée le long d'une surface plane et ondulée - (Université polytechnique de Bucarest, faculté de Génie Mécanique)

[2] M. Dar Ramdane, M. Hamel, Zine Dellil, Abbès Azzi **2007** - Synthèse bibliographique sur l'influence de l'amplitude d'onde sur le transfert thermique et les pertes de charge dans un tube ondulé -(Laboratoire de Mécanique Appliquée, Faculté de Génie Mécanique - Université des Sciences et de la Technologie Mohamed Boudiaf d'Oran, ALGÉRIE)

[3] Amirouche Hakim et Hagani **2014** - Modélisation et simulation numérique d'un capteur solaire plan a doublé passe avec un absorbeur ondulée, couplage convection-rayonnement - (université Abderahmane mira –Bejaia , faculté de technologie Département de Génie Mécanique)

[4] Tutoriel Fluent et Gambit, site : www.ansys.com