

PROJET TER : Simulation CFD d'un écoulement

On remarque lors de fortes pluies, notamment sur le pare-brise d'une voiture par exemple, que l'eau s'écoule comme une feuille sur un plan incliné par rapport à l'horizontale. C'est un écoulement diphasique, constitué de deux phases que sont l'air et l'eau.

Plusieurs paramètres entrent en jeu dans ce type d'écoulement, à savoir la nature des deux fluides et les différentes conditions aux limites appliquées. En particulier, nous allons axer notre étude sur l'influence de la variation de viscosité, d'angle de contact, de la tension superficielle et du temps de calcul.

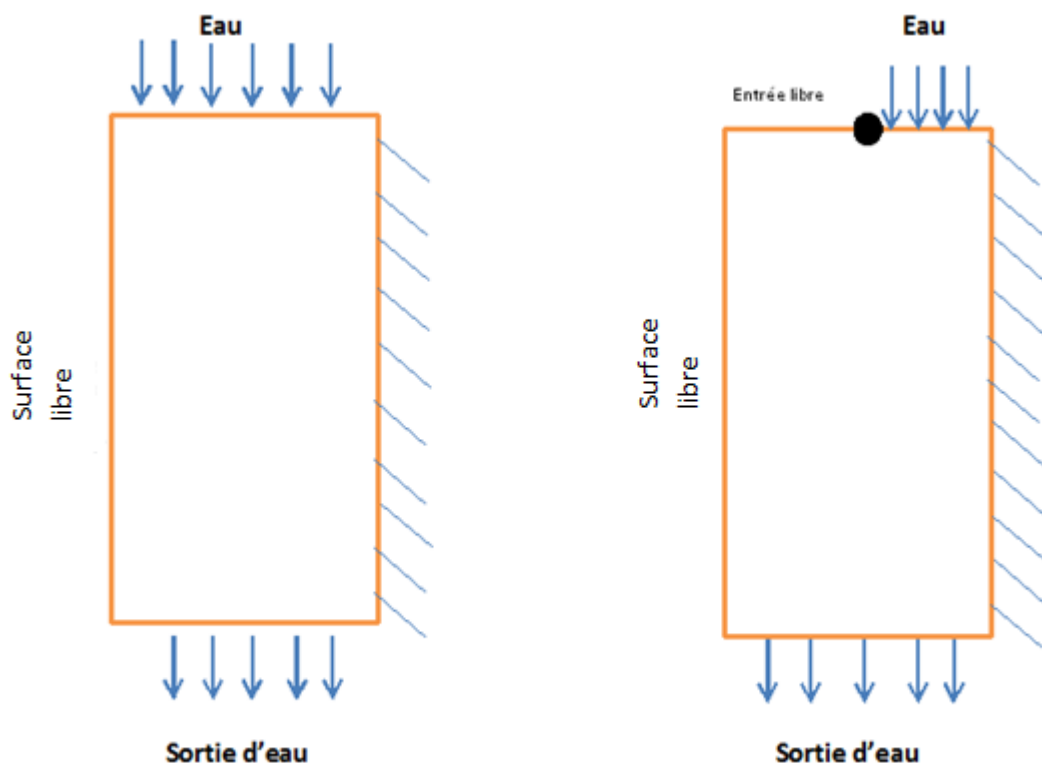
Le but de ce projet est de simuler ce type d'écoulement et s'intéresser à l'influence du changement de ces paramètres physiques sur l'écoulement. On va faire la simulation sous Fluent.

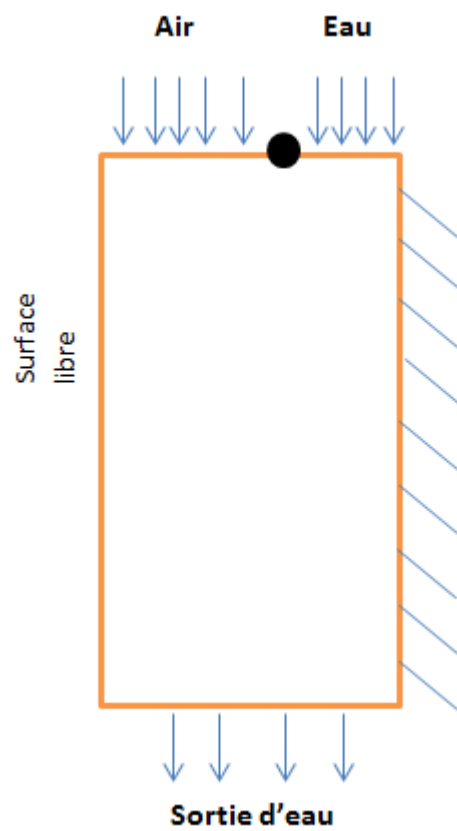
L'étude va être décomposée en trois grandes parties :

Une première partie : c'est un cas-test où on traitera l'écoulement monophasique de l'eau uniquement. Ce type d'écoulement est régi par l'équation classique de Navier-Stokes, et la solution obtenue pourra être comparée à la solution de Nusselt analytiquement obtenue. Ce cas-test permettra de valider les résultats du logiciel dans un premier temps.

Une seconde partie : où on réduira la section d'eau en entrée, afin d'en garder une zone d'entrée pour de l'air dont l'écoulement ne sera pas simulé dans cette partie. Cette réduction de la zone d'entrée sera décrite à l'aide d'un code en C.

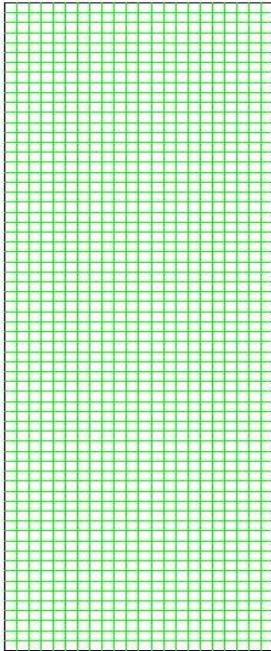
Une troisième partie : où là on va considérer une entrée pour l'eau et une deuxième pour l'air. C'est l'écoulement diphasique souhaité. Il est donc intéressant d'étudier la forme de l'interface liquide-gaz lors de l'écoulement.



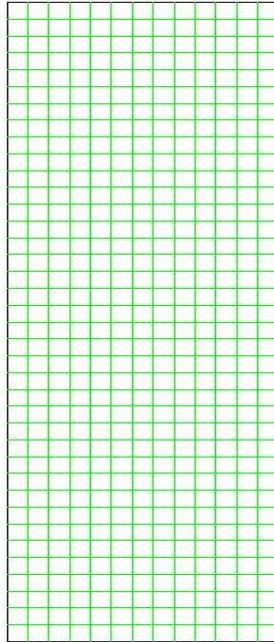


MAILLAGES UTILISES

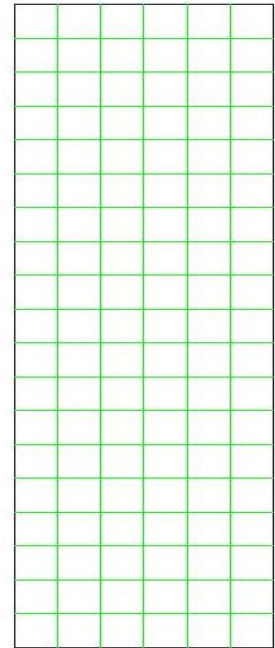
Durant ce travail, nous allons mener toutes les simulations avec un maillage simple, de forme carrée uniforme sur tout le domaine. Trois maillages seront utilisés : un maillage grossier, un maillage medium et un autre fin. Ils sont représentés ci-dessous :



Maillage fin



Maillage medium

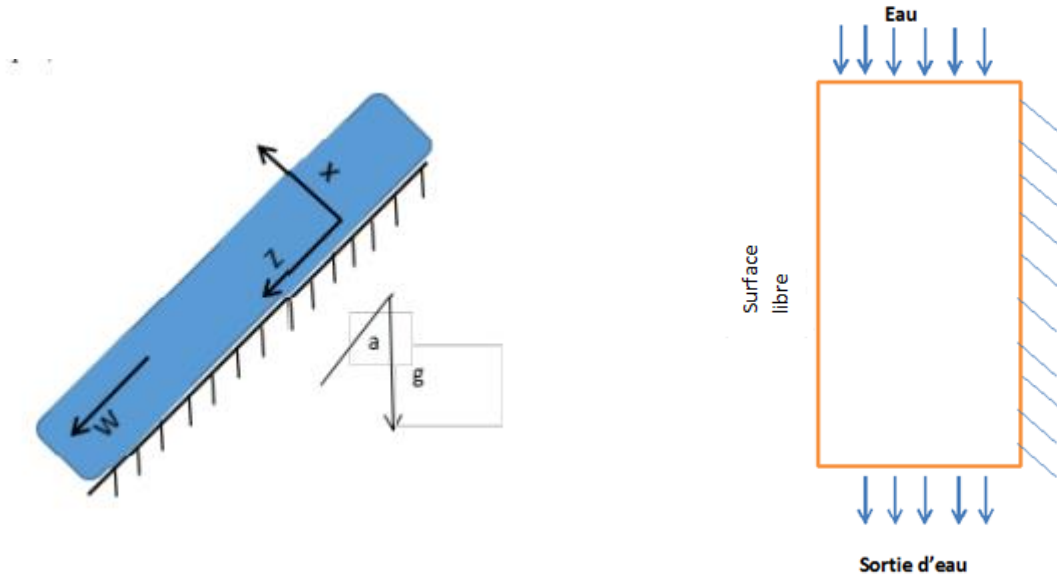


Maillage grossier

SIMULATION DU PREMIER CAS :

Ce cas-test, qui simule l'écoulement monophasique d'un fluide est régi par les équations de Navier-Stokes en unidirectionnel. On peut donc calculer la solution exacte de la vitesse et ainsi la comparer avec la solution numérique.

C'est donc un écoulement d'eau sur un plan faisant un angle α avec la verticale.



Calcul de la solution analytique :

Il est tout à fait possible de résoudre l'équation du cas 1 de l'écoulement d'eau sur une surface inclinée en résolvant l'équation de Navier-Stokes pour un écoulement stationnaire, unidirectionnel et indépendant de z :

On part de l'équation de quantité de mouvement projetée sur l'axe z :

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\left(\frac{1}{\rho}\right) \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + g_z$$

Pour déterminer la pression $P(x,z)$, l'équation de quantité de mouvement projetée sur x donne :

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\left(\frac{1}{\rho}\right) \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + g_x$$

Avec $u=0$:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = -\rho g \sin(\alpha)$$

En intégrant :

$$p(x, z) = -\rho g \sin(\alpha) x + f(z)$$

La condition à la limite fournit : $p(H, z) = P_0$

On a donc :

$$p(x, z) = \rho g \sin(\alpha) x (H - x) + P_0 = p(x)$$

Equation indépendante de z !

L'équation de départ se simplifie donc en :

$$\frac{d^2 w}{dx^2} = -\frac{g}{\nu} \cos(\alpha)$$

Avec les conditions aux limites :

$w(x = 0) = 0$: *condition d'adhérence à la paroi*

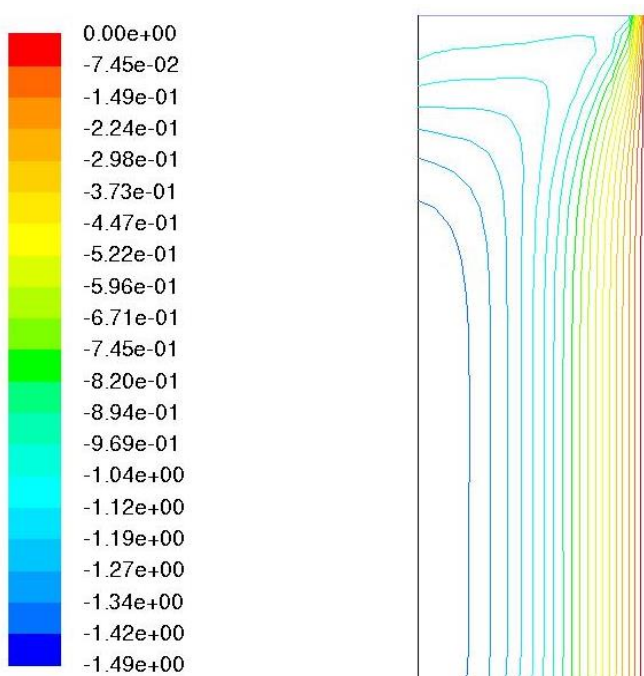
$\sigma_{xz}(x = H) = 0$: *contrainte nulle à l'interface*

On obtient ainsi :

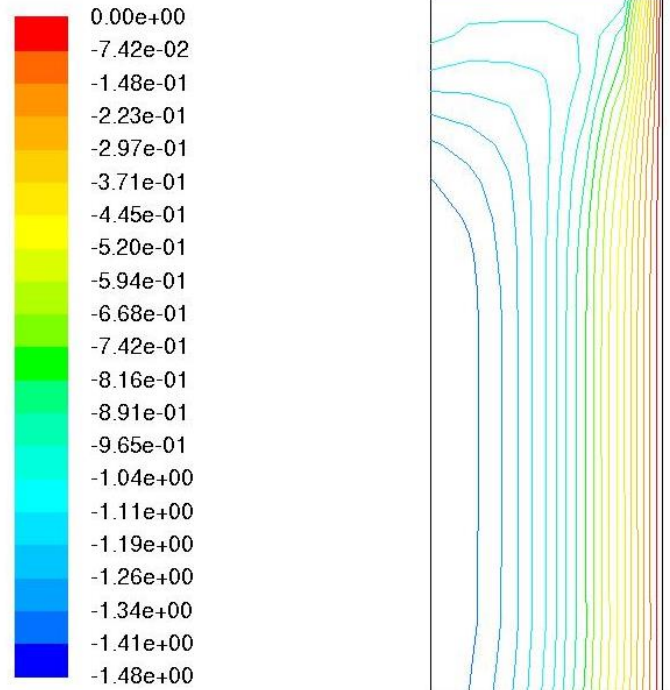
$$w(x) = \frac{g \cos(\alpha)}{\nu} \left(Hx - \frac{x^2}{2} \right)$$

Simulation numérique avec Fluent :

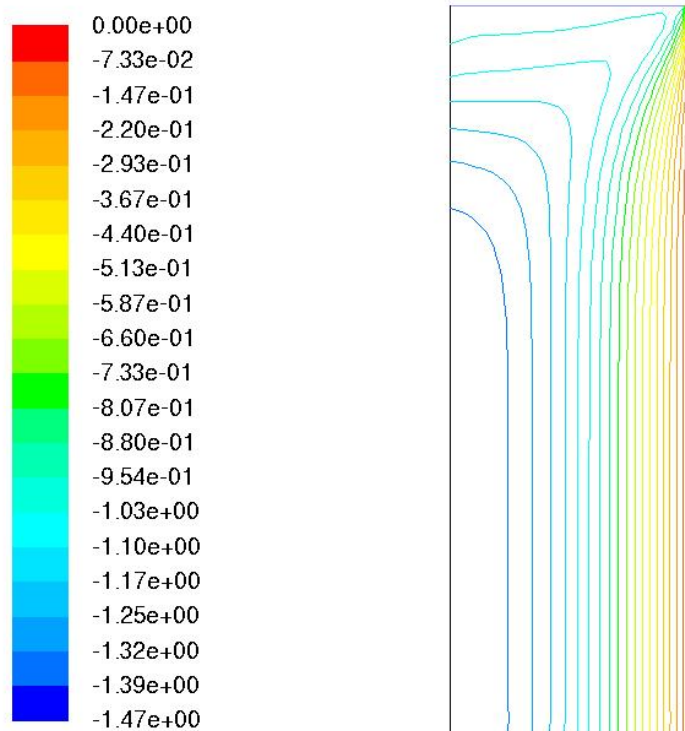
On utilise trois maillages pour faire cette première simulation : un maillage fin, un medium, et un grossier, le tout avec une densité, une masse volumique, et une vitesse d'entrée initialisées à 1.



Maillage medium –Y-velocity-70 itérations



Maillage grossier- Y-velocity-30 itérations



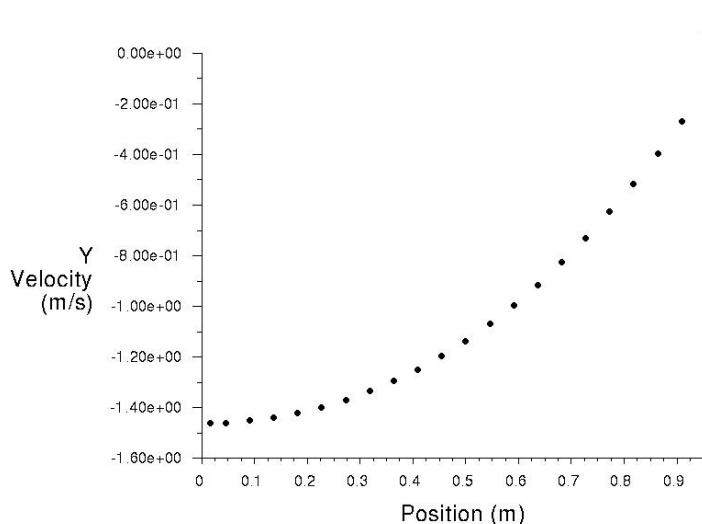
Maillage fin-Y-velocity-120 itérations

Ces résultats numériques, obtenus pour les trois types de maillages, présentent une cohérence avec les résultats attendus.

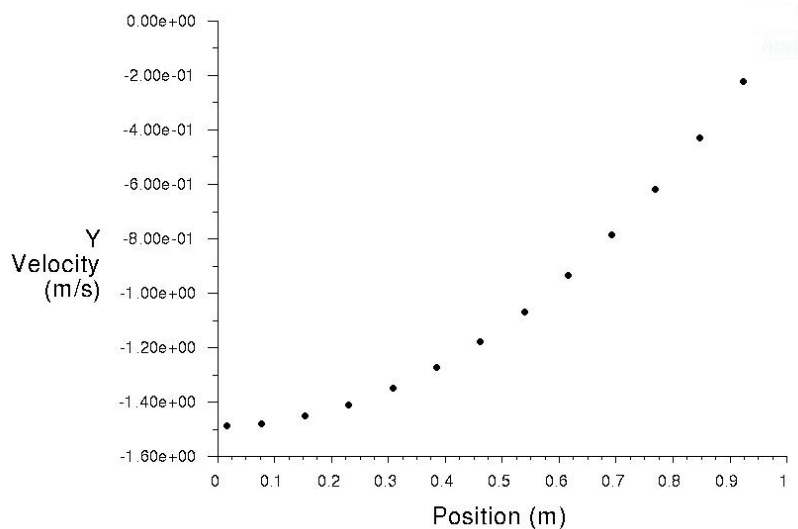
En effet, la vitesse le long de la paroi droite est nulle, ceci est due à la condition appliquée en décrivant cette surface de type "wall" (surface immobile). Loin de la paroi droite, la vitesse acquiert une valeur d'environ 1.47 m/s. Cette valeur de vitesse, plus grande en s'éloignant de la paroi, assure la conservation du débit. Ce dernier doit être conservé le long d'une section droite. La vitesse au milieu du domaine est bien évidemment constante égale à 1 m/s, valeur initialement imposée.

Maintenant, on va s'intéresser au profil de la vitesse le long d'une section donnée du domaine. Nous pourrions ainsi comparer les deux solutions numériques et analytiques obtenues. On choisit une section située au milieu du domaine, i.e à 1.5m de hauteur.

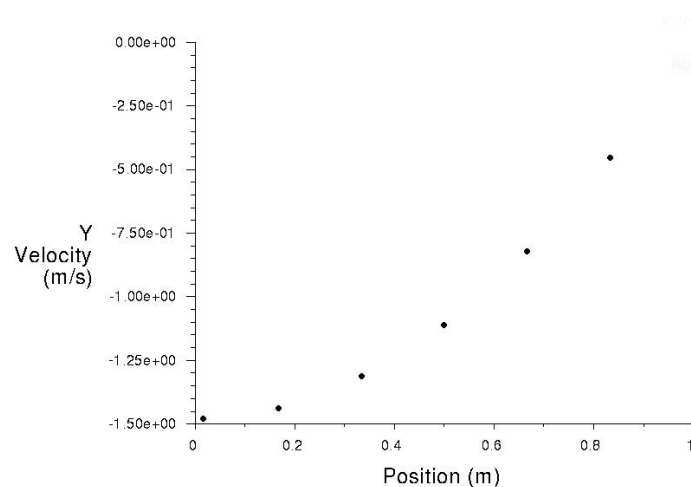
On obtient pour les trois maillages les courbes suivantes :



Maillage fin



Maillage medium



Maillage grossier

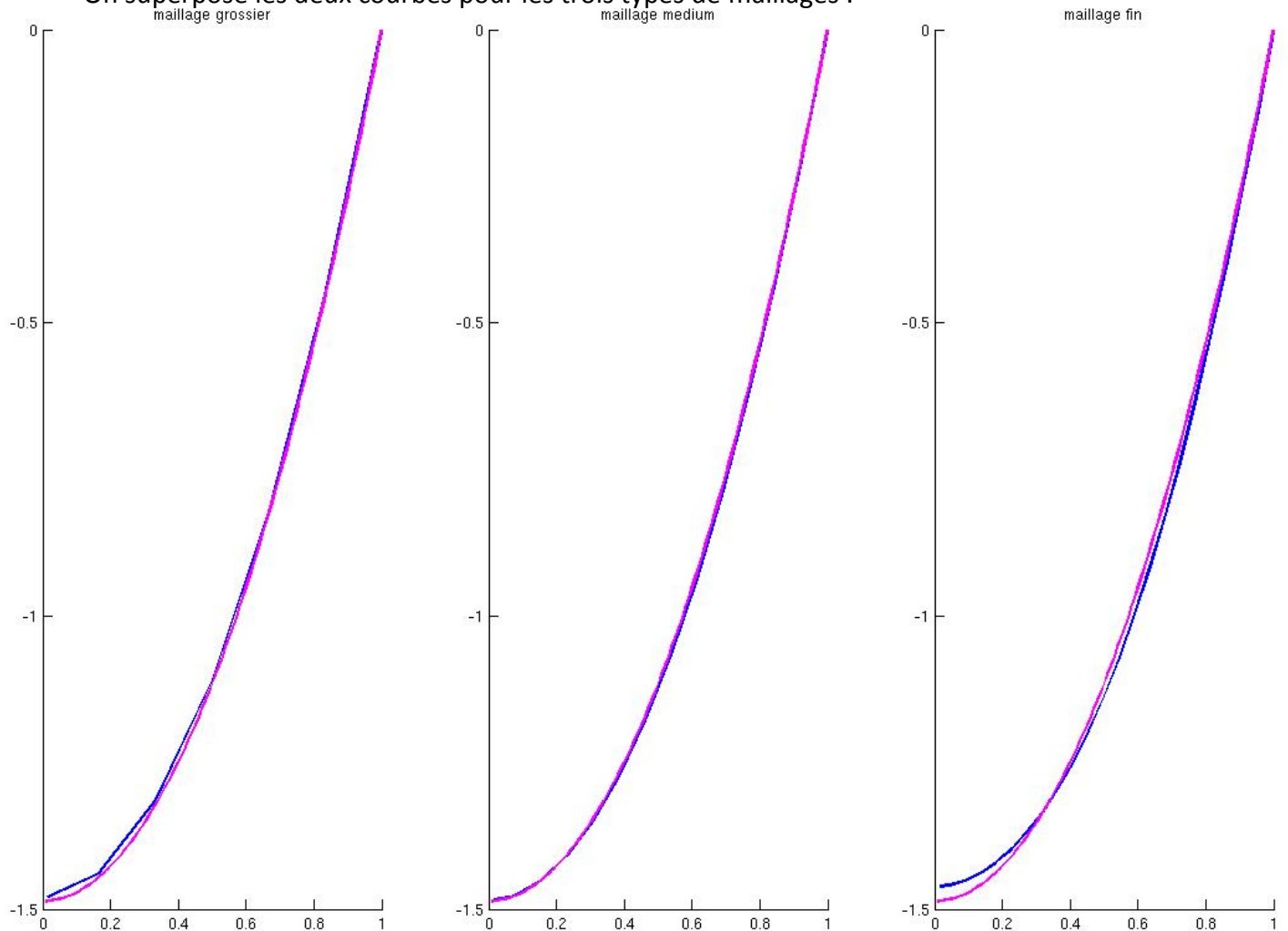
Bien évidemment, on dispose de plus de points lorsque le maillage est plus fin, et on obtient un profil de vitesse parabolique, qui correspond en effet à un écoulement classique dans une conduite, avec une vitesse qui tend vers 0 à la paroi (position=1), et une certaine vitesse d'environ 1.5m/s à gauche de l'écoulement. Donc, à priori, l'écoulement de Nusselt est dans son allure vérifié.

On s'intéresse à l'erreur. Pour cela, on récupère ces données Fluent sous la forme d'un fichier texte et on programme la solution analytique avec Matlab.

On prendra, pour le tracé, les paramètres suivants :

$$\begin{aligned} g &= -9.81 \\ \alpha &= 0 \\ v &= 3.3 \\ H &= 1 \end{aligned}$$

On superpose les deux courbes pour les trois types de maillages :



Comparaison de la solution numérique (en bleu) et analytique (en magenta)

On remarque une très bonne superposition des deux solutions pour le maillage medium.

En revanche, pour le maillage fin, on note de légères différences entre les deux courbes, notamment près de l'interface où la différence devient remarquable et non négligeable. C'est un résultat curieux de Fluent, car en général, les résultats d'une simulation d'un écoulement par le biais d'un maillage fin sont plus satisfaisants comparés aux autre type de maillage.

Quant au maillage grossier, il est correct à droite de l'écoulement, mais commence à diverger de la solution exacte quand la position tend vers 0.

On retiendra que pour ce type d'écoulement, le maillage medium est satisfaisant.

Simulation numérique du deuxième cas :

Dans cette deuxième phase d'étude, on va considérer une entrée d'eau réduite. La partie restante peut être vue comme étant une entrée libre soumise à aucune condition.

On utilise pour cette réduction d'entrée une fonction Fluent 'udf=user defined function' qui va nous permettre de décomposer l'entrée en deux parties. Cette fonctionnalité nécessite un code que l'on a modifié et adapté à notre cas.

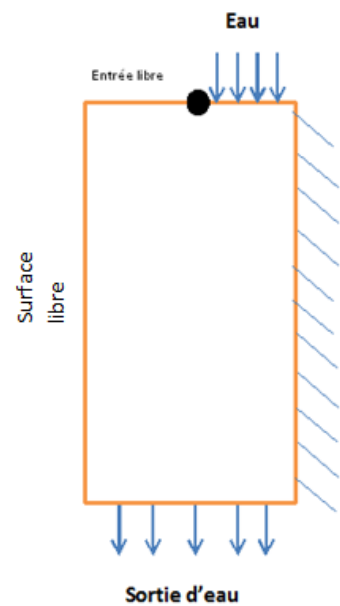
```
# include "udf.h"

# include "metric.h"
# include "sg_mphase.h"
# include "math.h"

DEFINE_PROFILE (udfexample, thread, index)
{
    face_t f;
    double h, nu, Re, U, x, y;
    double z[ND_ND];

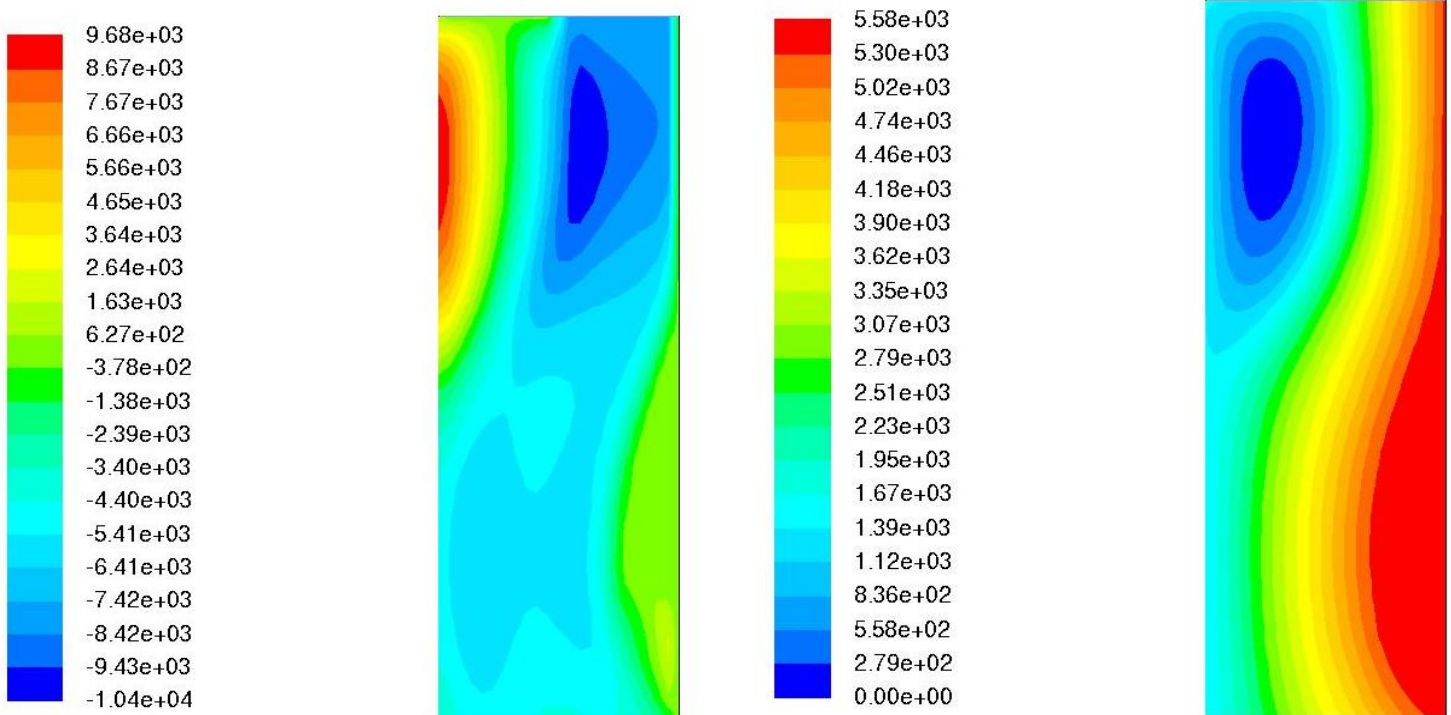
    h = 0.5; /*inlet depth*/
    nu = 1
    Re = 40;
    U = nu/h*Re;

    begin_f_loop(f, thread)
    {
        F_CENTROID(z, f, thread);
        x=z[0];
        y=z[1];
        if (x>=0.5) F_PROFILE(f, thread, index) = U;
        else F_PROFILE(f, thread, index) = 0.;
    }
    end_f_loop(f, thread) }
```

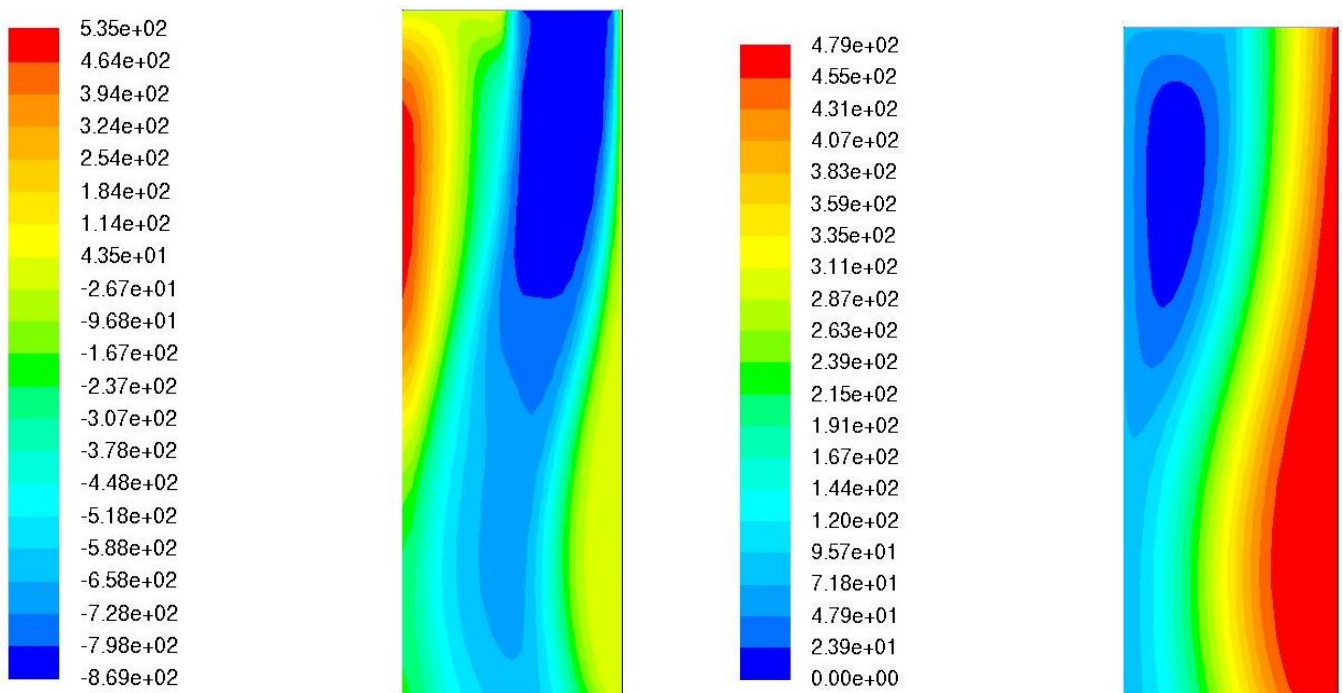


INFLUENCE DU NOMBRE DE REYNOLDS

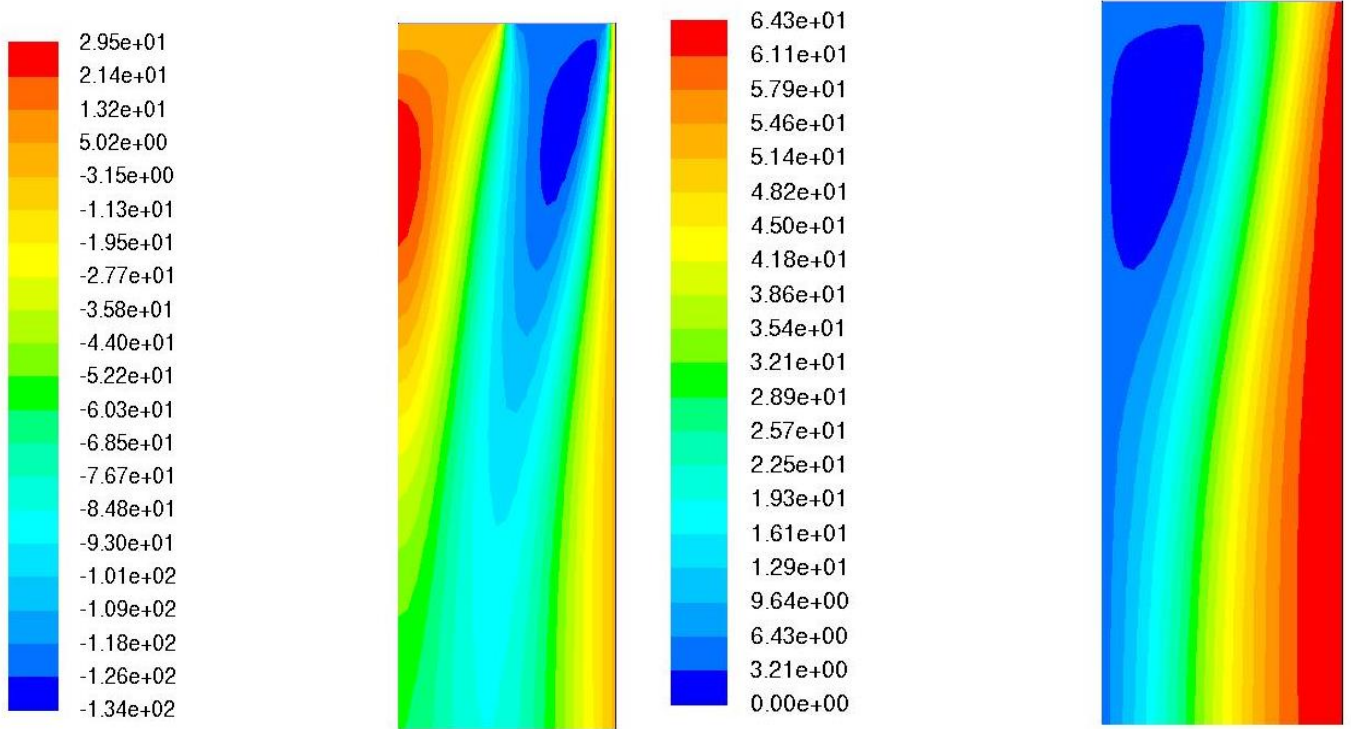
Pour cet écoulement, on souhaite rester dans le domaine laminaire. On souhaite aussi avoir un écoulement bien développé le long du domaine loin de l'entrée. Pour ce faire, on étudie à travers ce code l'influence du nombre de Reynolds sur l'allure des vitesses pour le maillage fin uniquement :



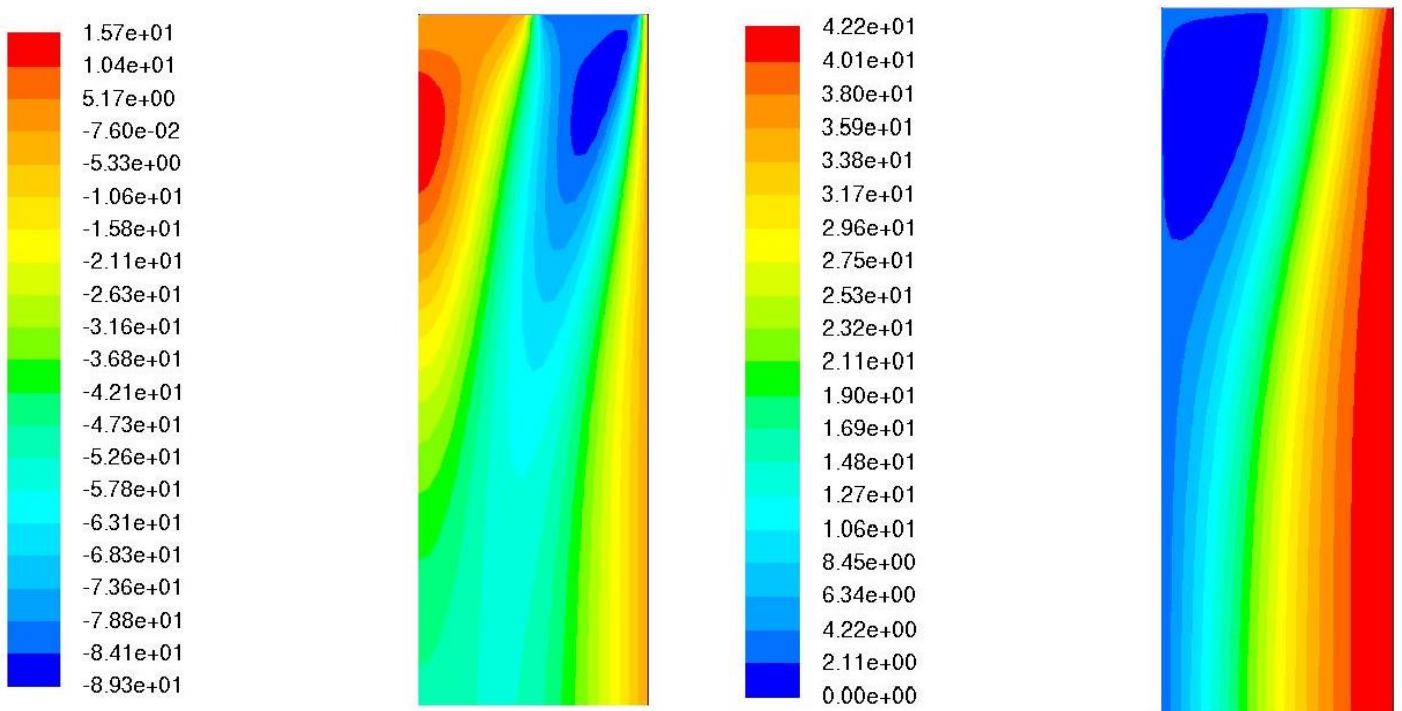
Pour $Re=4000$; à gauche y-velocity, à droite la fonction de courant



Pour $Re=400$; à gauche y-velocity, à droite la fonction de courant



Pour $Re=60$; à gauche y-velocity, à droite la fonction de courant



Pour $Re=40$; à gauche y-velocity, à droite la fonction de courant

Loin de l'entrée, l'écoulement semble être bien développé pour les faibles valeurs de Reynolds. Pour cette petite valeur, on remarque aussi que la couche limite est bien développée contrairement pour de grandes valeurs de Reynolds, qui présentent des lignes courbées et des couches limites mal-développées.

On note aussi l'apparition d'un vortex au voisinage de la zone d'entrée lorsque la vitesse passe subitement d'une valeur positive à une valeur négative. Notons bien le fait que l'écoulement n'est pas turbulent et que la présence de vortex n'est pas un signe de turbulence.

Pour toutes ces raisons, on évitera donc, dans notre étude, les grands nombres de Reynolds, et on se placera à un nombre de Reynolds de l'ordre de ~ 50 .

SIMULATION NUMERIQUE TROISIEME CAS

Lors de ce stade, nous allons donc simulé l'écoulement souhaité diphasique (eau et air).

Lors de la simulation de tels écoulements, Fluent propose un certain nombre de paramètres à choisir pour mener cette étude.

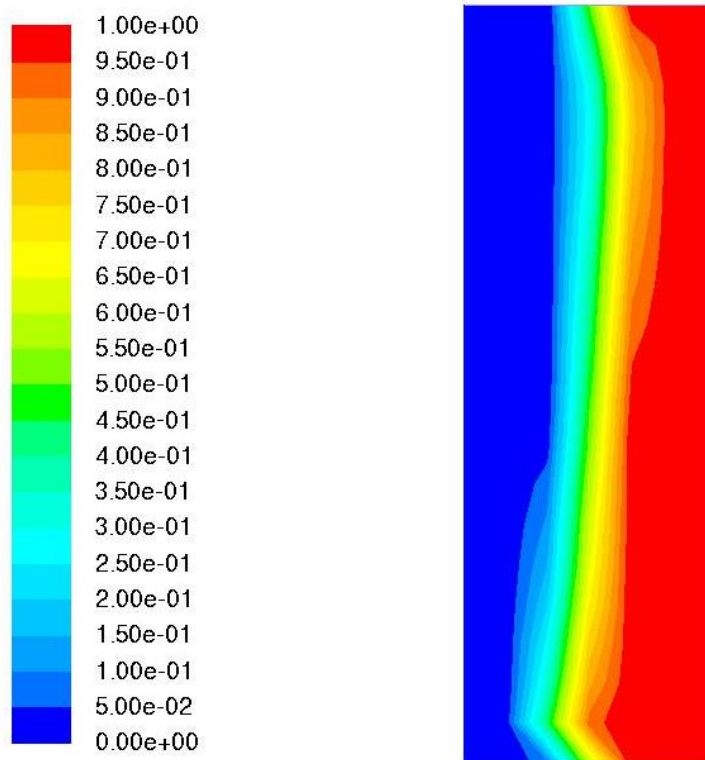
Un de ces paramètres fondamentaux est le choix de la simulation via une méthode intitulée « Volume Of Fluid VOF». Cette méthode a été introduite par Hirt & Coll. en 1981 qui s'utilise pour la simulation d'écoulements entre plusieurs phases non miscibles.

Il s'agit d'une méthode Eulérienne à 1 fluide, et elle permet de suivre la position de l'interface dans un maillage fixe. Elle est basée sur une fonction discrète qui représente la fraction volumique d'un des fluides dans chaque volume de contrôle. Cette fonction représente un taux de présence qui varie entre 0 et 1 pour la phase considérée.

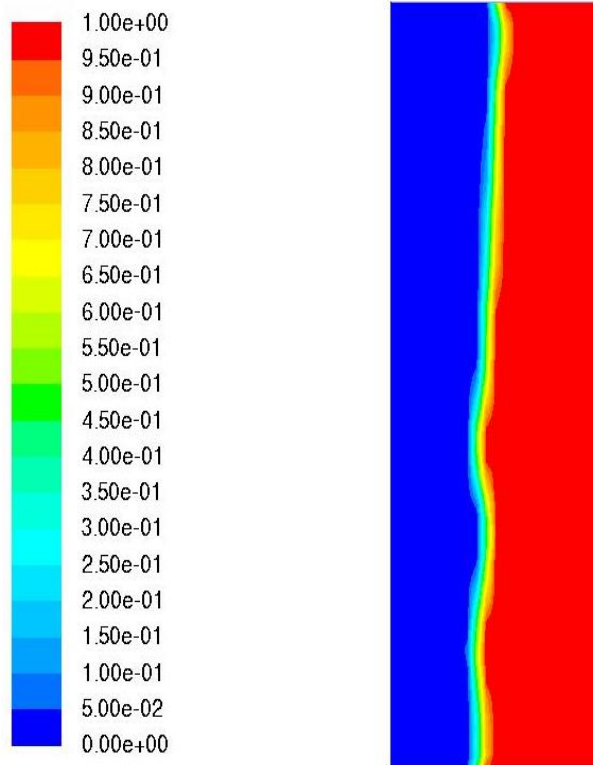
En effet, si elle vaut 0 ou 1, le volume ne contient qu'un seul des deux fluides. Si sa valeur est comprise entre ces deux bornes, le volume contient un mélange diphasique, et donc l'interface y est présente.

Cette méthode est donc totalement conservative, elle s'adapte bien à notre cas d'étude. A noter que lorsqu'on choisit cette méthode, Fluent bascule par défaut vers le régime instationnaire.

On a obtenu les résultats suivants représentant la phase eau dans le domaine :



Maillage grossier

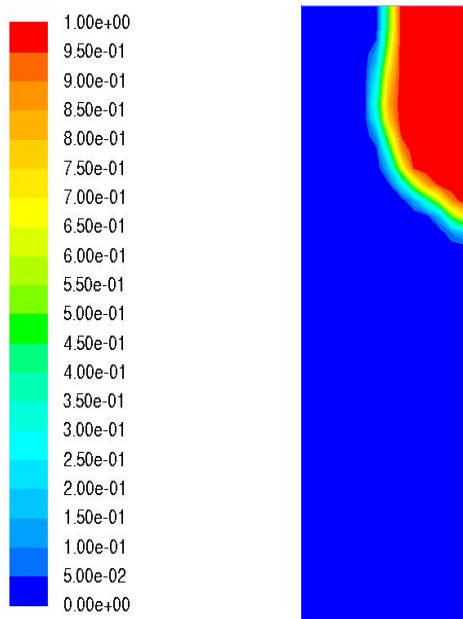


Maillage fin

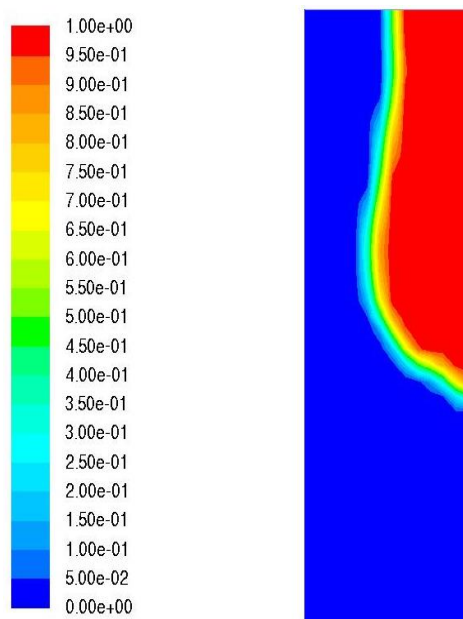
A première vue, l'allure du résultat numérique est bonne. On remarque une présence totale de l'eau à droite du domaine (en rouge) et une présence totale de l'air à gauche du domaine (en bleu), et ce pour les deux maillages considérés.

De plus, on voit clairement que le maillage grossier n'est pas adapté pour l'étude de ce troisième cas. Car il représente beaucoup d'erreurs numériques. En revanche, le maillage fin est plus adapté. On constate pour celui-ci la présence d'une zone de mélange au milieu du domaine. C'est une onde qui se constitue à l'interface.

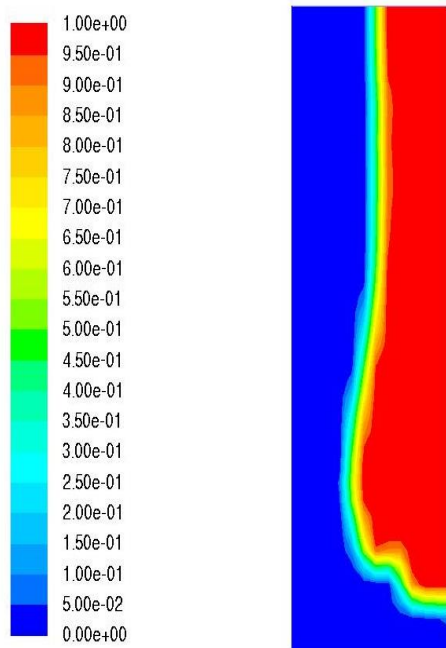
Ce basculement par défaut de Fluent en régime instationnaire permet de reconstituer le film du liquide tombant pour différentes valeurs de temps. On l'a fait pour la maillage medium ce qui a permis d'obtenir :



Pour t=1s



Pour t=2s

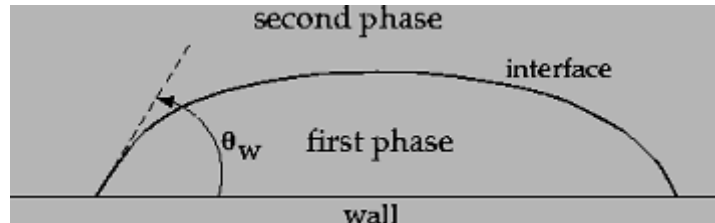


Pour t=3s

INFLUENCE DE L'ANGLE DE CONTACT

L'angle de contact est une mesure de la capacité d'un liquide à s'étaler sur une surface par mouillabilité. Cette adhésion du liquide à la paroi est due à des forces d'attraction entre les molécules du liquide et la paroi.

Cet angle est représenté sur la figure suivante :

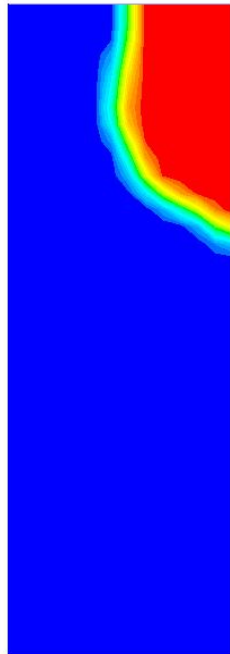
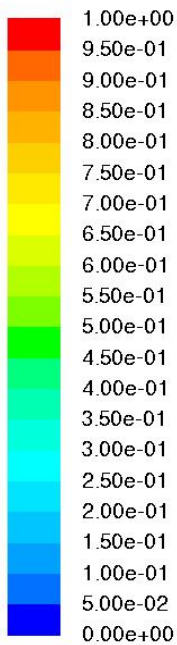


Angle de contact au niveau de la paroi

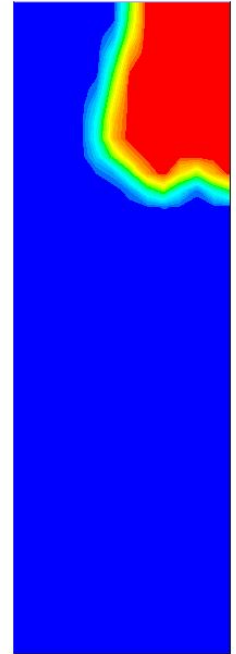
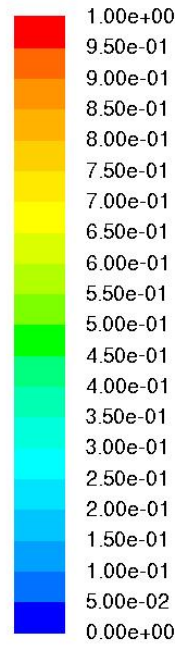
En cas d'adhérence à la paroi, cette notion d'angle de contact intervient en tant que condition à la limite de la paroi. Il est utilisé pour ajuster la normale à la surface dans les cellules proches de la paroi. Cette normale à la surface à la cellule adjacente à la paroi est calculée par :

$$\hat{n} = \hat{n}_w \cos(\theta_w) + \hat{t}_w \sin(\theta_w)$$

Donc en changeant la valeur de cet angle de contact, on peut observer les différences :



T=1s, angle de contact=45°



T=1s, angle de contact=90°

INFLUENCE DE LA TENSION INTERFACIALE

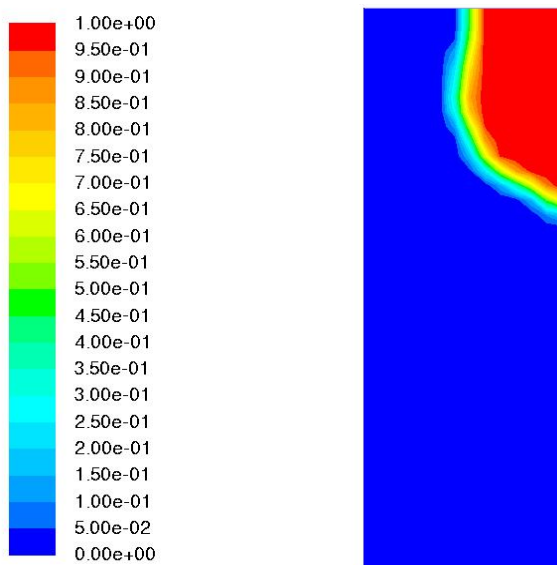
Ce paramètre physique que Fluent propose caractérise la tension interfaciale due aux forces cohésives qui existent entre les molécules voisines d'une phase condensée, et tend à minimiser l'aire de l'interface entre ces molécules et celles d'une autre phase. Ainsi, elle s'oppose à la déformation de l'interface. Cette force est à l'origine des phénomènes capillaires. De cette façon, à travers une interface, la différence de pression qui règne, appelée pression capillaire, peut s'exprimer à l'aide de cette tension interfaciale σ par :

$$p_2 - p_1 = \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$

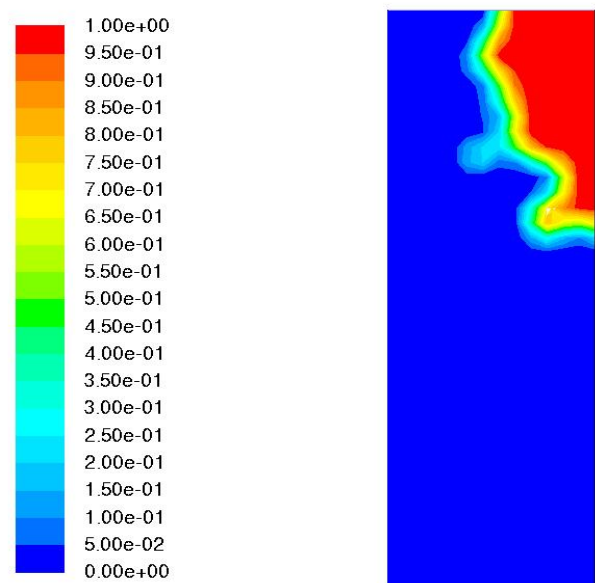
Où R_1 et R_2 sont les rayons de courbure des deux surfaces de part et d'autre de l'interface.

La tension interfaciale est une grandeur physique qui quantifie le défaut énergétique provoqué par la création d'une interface entre deux phases. Au sein d'une phase dense pure, chaque molécule interagit avec toutes les molécules qui l'entourent. Ces interactions imposent la cohésion de la phase condensée. A l'interface avec une autre phase, les molécules ont un voisinage différent. Cela induit donc des interactions différentes, et par conséquent une diminution de l'énergie de cohésion. C'est pour minimiser ce défaut d'énergie de cohésion qu'un système tendra à minimiser ses interfaces avec les autres milieux. La tension interfaciale est la grandeur qui quantifie ce défaut énergétique à l'interface. Elle est alors mesurée en J/m². Il est également possible de la définir comme étant la force par unité de longueur (appliquée le long d'un axe perpendiculaire à l'interface) qu'il faudrait fournir pour étendre l'interface. Elle est alors exprimée en N/m.

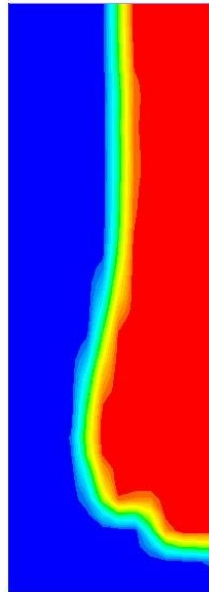
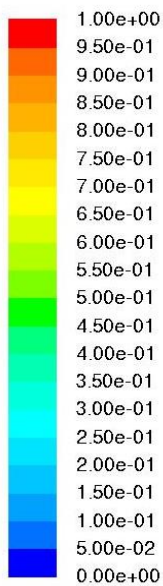
On simule donc l'écoulement avec deux tensions superficielles différentes afin de s'intéresser à l'influence de cette dernière. On obtient les résultats suivants :



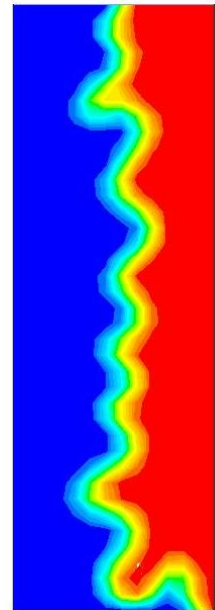
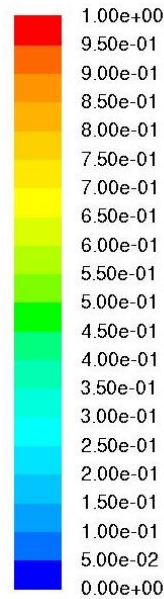
T=1s, angle de contact=45, tension=1



T=1s, angle de contact=45, tension=2



T=3s, angle de contact=45, tension=1



T=1s, angle de contact=45, tension=2

On remarque bien que plus la tension superficielle augmente, plus l'interface entre les deux fluides a du mal à se former. L'augmentation de cette grandeur physique fait augmenter les défauts d'énergie entre les molécules, et par conséquent l'augmentation de la différence de pression qui existe.

Il est donc pertinent de chercher à minimiser au maximum ce paramètre lors de la simulation de tels écoulements.