

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique



Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou
Faculté de génie de construction,
Département de génie mécanique



Mémoire de fin d'études

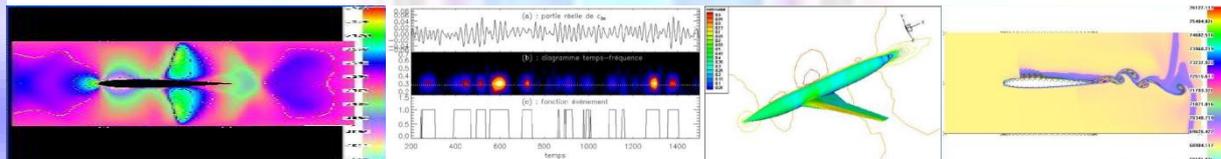
En vue d'obtention du diplôme Master Académique en Génie
Mécanique

Thème

Simulation numérique de
l'écoulement d'un fluide
réel incompressible
autour d'un profil d'aile

Proposé par : Boussafeur Kaci

Réalisé par : Didane Lies



Année: 2011/2012

*JE REMERCIE TOUS CEUX QUI M'ONT
AIDE A REALISER CE TRAVAIL*

NOTAMMENT:

MON PROMOTEUR Mr: BOUSSAFEUR.K

Mr: HADID.M.R

MES ENSEIGNANTS

MA FAMILLE

MES AMIS.

NOTATIONS

Lettres latines :

e	Epaisseur (m)
\vec{F}_T	Force tangentielle (N)
\vec{F}_N	Force normale (N)
F_z	Force de portance (N)
F_x	Force de trainée (N)
\vec{F}	Résultante des forces aérodynamique (N)
F_g	Force de glissement entre les couches(N)
g	Accélération gravitationnelle (m/s^2)
L_C	Longueur de la corde (m)
L	Longueur de référence (m)
m	Masse (Kg)
p	Pression (N/m^2)
Q_m	Débit massique (Kg/s)
S	Surface (m^2)
t	Temps (s)
U_∞	Vitesse à l'infini amont (m/s)
$u ; v ; w$	Composantes de la vitesse dans le plan (x , y) (m/s)
V_l	Volume (m^3)
V	Vitesse (m/s)
x, y, z	Coordonnées cartésiennes (m)

Lettres grecques :

ε	Taux de déformation
$\vec{\gamma}$	Accélération du fluide.
μ	Viscosité dynamique (Kg/m.s)
ν	Viscosité cinématique (m ² /s)
ρ	Masse volumique (Kg/m ³)
β	Angle de cambrure (°)
Φ	Potentiel complexe vitesses
Ψ	Fonction de courant

Nombres sans dimension :

C_x	Coefficient de traînée du profil
C_y	Coefficient de portance du profil surpression
R	Rayon (m)
Re	Nombre de Reynolds
Re_c	Nombre de Reynolds critique

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE..... 1

CHAPITRE I :

GENERALITES SUR LA MECANIQUE DE FLUIDES

1. Introduction.....	2
2. Notion de fluide	2
2.1. Fluide parfait	2
2.2. Fluide réel.....	3
2.3. Fluide incompressible	3
2.4. Fluide compressible	3
2. Statique des fluides.....	4
3. Dynamique des fluides	4
4. Définition de la viscosité	4
5.1. La viscosité dynamique et la viscosité cinématique	5
5.1.1. Viscosité dynamique	5
5.1.2. Viscosité cinématique	6
5.2. Variation de la viscosité avec la pression	6
5.3. Variation de la viscosité avec la température.....	7
5.4. Mesurage de la viscosité	8
5.4.1. Viscosimètre à chute de bille ou viscosimètre d’Hoepler....	8
5.4.2. Viscosimètre rotatif ou viscosimètre de Couette	9
5. Notion de la couche limite.....	9
6. Nombre de Reynolds	10
7. Régime d’écoulement	13
7.1. Régime stationnaire.....	14
8.2. Régime laminaire	14
8.3. Régime turbulent.....	14
8. Analyse de mouvement d’une particule de fluide	15

8.1. La particule fluide	15
8.2. La translation.....	15
8.3. La rotation	16
8.4. Déformation linéaire	16
8.5. Déformation angulaire	17
9. Lignes de courant	17
10.1. Description d'Euler	18
10.2. Description de Lagrange	18

10. Equation de continuité.....	20
--	-----------

CHAPITRE II :

GENERALITES SUR LES PROFILS D'AILES

1. Définition	22
2. Caractéristiques géométriques.....	23
3. Familles de profils	24
4. Forces aérodynamiques	25
5. Aile d'envergure finie.....	28
6. Modélisation de réalisation.....	29

CHAPITRE III :

APPROCHE THEORIQUE

1. Introduction	31
2. Petit rappelle sur les nombres complexes	31
3. Propriétés de la transformation conforme	32
3.1. Transformation de JOUKOWSKI	33
3.1.1. Points singuliers	34
3.1.2. Equations paramétriques	35
3.2. Transformation de KARMAN-TREFFTZ	36

3.2.1. Points singuliers	36
3.2.2. Equations paramétriques	37
3.3. Transformation de VON-MISES	38
3.3.1. Points singuliers	38
3.3.2. Equations paramétriques	38
4. Equation de conservation de la quantité de mouvement	39
5. Equation de BERNOULLI	40

CHAPITRE IV :

PARTIE EXPERIMENTALE

❖ Travail réalisé	41
-------------------------	----

CHAPITRE V :

SIMULATION NUMERIQUE

1. Introduction	48
2. Logiciel utilisé	48
2.1. Création et définition de la géométrie sous GAMBIT	48
❖ Le menu général et le menu secondaire	49
❖ Le menu d'affichage	49
❖ Exportation de la géométrie	50
2.2. La simulation sous FLUENT..... ..	51
❖ Importation de la géométrie	51
❖ Vérification de la géométrie importée	52

❖ Vérification de l'échelle	52
❖ Choix du solveur	53
❖ Choix du régime d'écoulement	53
❖ Définition des caractéristiques du fluide	54
❖ Les conditions opératoires	55
❖ Les conditions aux limites	56
❖ Choix des critères de convergence	57
❖ Lancement des calculs itératifs	57
❖ Affichage graphique	58
3. Résultats de la simulation pour $Re = 153.50$	60
❖ Courbe de convergence des résidus	60
❖ Orientation des vecteurs vitesses autour de profil	61
❖ Distribution de la pression autour du profil	62
❖ Distribution de vitesses autour du profil	62
❖ Lignes de courant autour du profil	63
❖ Lignes d'évolution de la vitesse et de la pression	63
❖ Evolution de la vitesse	64
❖ Evolution de la pression	68
4. Résultats pour $Re=477.10$	71
5. Résultats pour $Re=872.22$	71
6. Analyse des résultats..	72
 CONCLUSION GENERALE	 75

LISTE DES FIGURES

FIGURE	PAGE
Figure (I-1) : Forces agissants sur un fluide parfait	2
Figure (I-2): Profil de vitesse d'écoulement plan d'un fluide réel	5
Figure (I-3): Viscosimètre d'Hoepler	8
Figure (I-4): Viscosimètre de Couette	9
Figure (I-5) : Couche limite	9
Figure (I-6) : Différents écoulements.	15
Figure (I-8): Tube et filet de courant	18
Figure (I-9): Description d'Euler	19
Figure (I-10): Description de Lagrange	20
Figure (I-11) : Bilan de masse	20
Figure (II-1) : Profil d'aile	23
Figure (II-2) : Forces aérodynamiques	25
Figure (II-3) : Nappe tourbillonnaire derrière une aile d'envergure finie.	28
Figure (III-1) : Transformation conforme	32
Figure(IV-1) :le banc d'essai.....	43
Figure(IV-2) :Visualisation des lignes de courant autour d'un cercle.	44
Figure(IV-3) : Visualisation des lignes de courant autour d'un profil symétrique.	45
Figure (V-1) : Interface GAMBIT.....	48
Figure (V-2) : Interface menu général et menu secondaire	49

Figure (V-3) : Interface menu d'affichage	49
Figure (V-4) : interface exportation de la géométrie	50
Figure (V-5) : Interface FLUENT	51
Figure (V-6) : Interface pour l'importation et lecture des fichiers.....	51
Figure (V-7) : Interface pour vérification de la géométrie importée.....	52
Figure (V-8) : Interface pour vérification de l'échelle.....	52
Figure (V-9) : Interface choix du solveur sous fluent	53
Figure (V-10) : Interface définition du régime d'écoulement.....	54
Figure (V-11) : Interface définition caractéristique du fluide	55
Figure (V-12) : Interface définition conditions opératoires.....	55
Figure (V-13) : Interface définition conditions aux limites	56
Figure (V-14) : Interface définition conditions aux limites	57
Figure (V-15) : Interface pour la commande Iterate.....	57
Figure (V-16) : Interface pour l'affichage graphique.....	58
Figure (V-17) : Interface pour l'évolution des vecteurs vitesses	58
Figure (V-18) : Interface pour l'évolution de champ de vitesses	59
Figure (V-19) : Interface pour l'évolution de champ de pressions	59
Figure (V-20) : Interface pour l'évolution des lignes de courant	60
Figure (V-21) : Courbe de convergence des résidus	61
Figure (V-22) : Orientation des vecteurs vitesses	61
Figure (V-23) : Distribution de la pression autour du profil	62

Figure (V–24): Distribution de vitesses autour du profil	62
Figure (V–25) : lignes du courant autour du profil	63
Figure (V–26) : lignes d'évolution de la vitesse et de pression	63
Figure (V–27) : Evolution de la vitesse suivant la ligne-1	64
Figure (V–28) : Evolution de la vitesse suivant la ligne-2	64
Figure (V–29) : Evolution de la vitesse suivant la ligne-3	65
Figure (V–30) : Evolution de la vitesse suivant la ligne-4	65
Figure (V–31) : Evolution de la vitesse suivant la ligne-6	66
Figure (V–32) : Evolution de la vitesse suivant la ligne-7	66
Figure (V–33) : Evolution de la vitesse suivant la ligne-8	67
Figure (V–34) : Evolution de la pression suivant la ligne-1	67
Figure (V–35) : Evolution de la pression suivant la ligne-2	68
Figure (V–36) : Evolution de la pression suivant la ligne-3	68
Figure (V–37) : Evolution de la pression suivant la ligne-4	69
Figure (V–38) : Evolution de la pression suivant la ligne-5	69
Figure (V–39) : Evolution de la pression suivant la ligne-6	70
Figure (V–40) : Evolution de la pression suivant la ligne-7	70
Figure (V–41) : Evolution de la pression suivant la ligne-8	71
Figure (V–42) : Lignes de courant de la simulation et de d l'expérience pour la même échelle.....	74

INTRODUCTION GENERALE

La simulation numérique des écoulements occupe une place importante dans le domaine de la recherche en hydraulique. Ces écoulements sont généralement tridimensionnels et instationnaires. Ils sont régis par les équations de Navier-Stokes complètes.

Les méthodes numériques de résolution sont limitées jusqu'à nos jours car d'une part, il n'existe pas de méthode numérique standard fiable et rapide et d'autre part, la résolution des équations de Navier-Stokes gouvernant le problème dans son ensemble, d'où la nécessité de faire des approximations et de négliger certains phénomènes.

Dans la première partie de notre travail (partie expérimentale) nous visualiserons les lignes de courant autour d'un profil d'aile symétrique réalisé par la transformation de **JOUKOWSKI** dans un Banc d'essai.

Dans la deuxième partie de ce travail, nous nous proposons d'entreprendre une simulation numérique bidimensionnelle de l'écoulement laminaire, visqueux d'un fluide incompressible autour de même profil d'aile. L'outil d'investigation étant le logiciel **FLUENT** qui résout les équations de Navier-Stokes.

Ce travail s'articulera sur cinq parties :

Le premier chapitre comporte les généralités sur la Mécanique des Fluides.

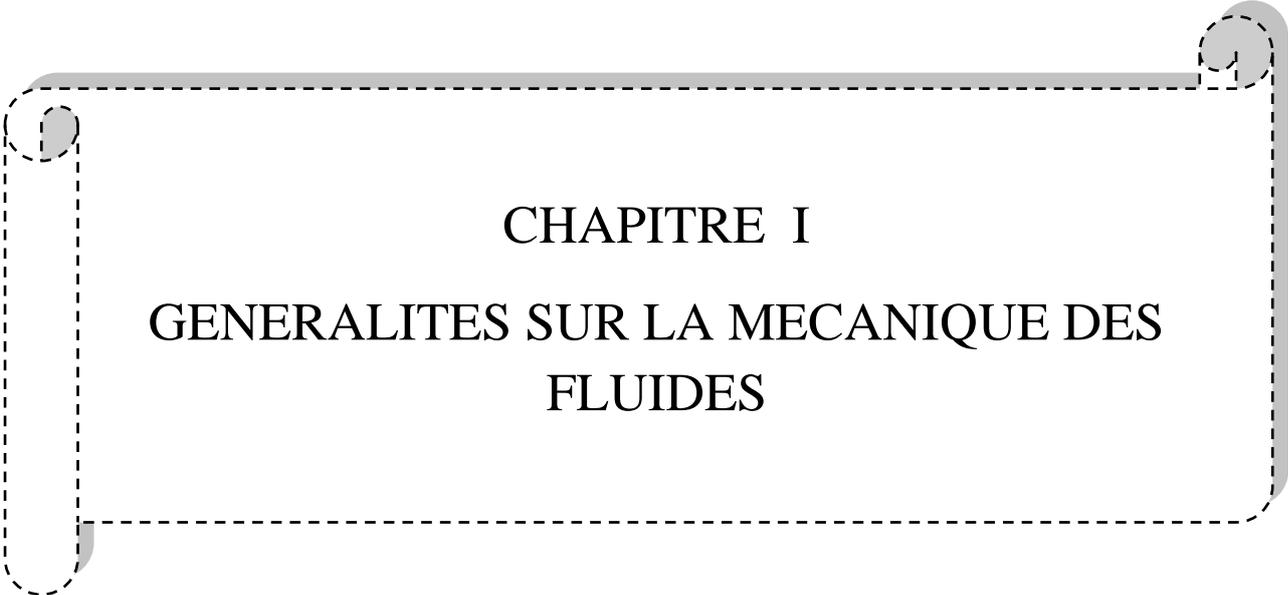
Le second chapitre comporte les généralités sur les profils d'aile.

Le troisième chapitre sera consacré à une approche théorique de notre problème.

Le quatrième chapitre comprend la partie expérimentale.

Le cinquième chapitre s'étale sur la présentation des résultats obtenus en utilisant le logiciel fluent et les comparer avec les résultats expérimentaux.

Nous terminerons enfin par une conclusion générale.



CHAPITRE I
GENERALITES SUR LA MECANIQUE DES
FLUIDES

1. Introduction :

La **mécanique des fluides** est la branche de la physique qui étudie les écoulements de fluides c'est-à-dire des liquides et des gaz lorsque ceux-ci subissent des forces ou des contraintes. Dans ce chapitre on s'intéresse aux différents types de fluides et aux paramètres physiques caractérisant les différents types d'écoulements ainsi que les régimes d'écoulement.

2. Notion de fluide :

Un fluide peut être [1] considéré comme étant formé d'un grand nombre de particules matérielles, très petites et libres de se déplacer les unes par rapport aux autres. Un fluide est donc un milieu matériel continu, déformable, sans rigidité et qui peut s'écouler.

2.1. Fluide parfait :

Soit un système fluide, c'est-à-dire un volume délimité par une surface fermée Σ fictive ou non.

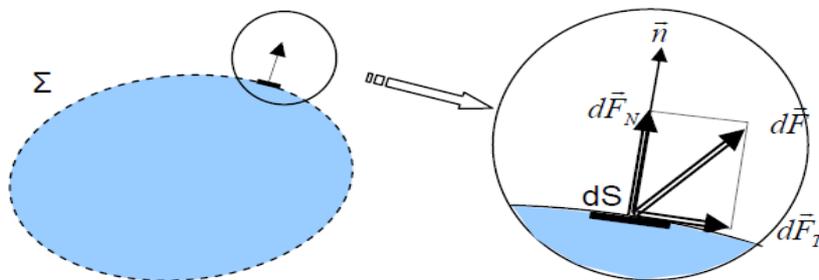


Figure (I-1) : Forces agissants sur un fluide parfait

Considérons $d\vec{F}$ la force d'interaction au niveau de la surface élémentaire dS de normale \vec{n} entre le fluide et le milieu extérieur.

On peut toujours décomposer $d\vec{F}$ en deux composantes:

- une composante $d\vec{F}_T$ tangentielle à dS .
- une composante $d\vec{F}_N$ normale à dS .

En mécanique des fluides, un fluide est dit parfait s'il est possible de décrire son

mouvement sans prendre en compte les effets de frottement. C'est à dire quand la composante $\overrightarrow{dF_T}$ est nulle. Autrement dit, la force $d\vec{F}$ est normale à l'élément de surface dS .

2.2. Fluide réel :

Contrairement à un fluide parfait, qui n'est qu'un modèle pour simplifier les calculs, pratiquement inexistant dans la nature, dans un fluide réel les forces tangentielles de frottement interne qui s'opposent au glissement relatif des couches fluides sont prises en considération. Ce phénomène de frottement visqueux apparaît lors du mouvement du fluide.

C'est uniquement au repos, qu'on admettra que le fluide réel se comporte comme un fluide parfait, et on suppose que les forces de contact sont perpendiculaires aux éléments de surface sur lesquels elles s'exercent. La statique des fluides réels se confond avec la statique des fluides parfaits.

2.3. Fluide incompressible :

Un fluide est dit incompressible lorsque le volume occupé par une masse donnée ne varie pas en fonction de la pression extérieure. Les liquides peuvent être considérés comme des fluides incompressibles (eau, huile, etc.).

- Il prend la forme du récipient qui le contient
- Il est inextensible : il n'occupe pas tout le volume qui lui est offert.
- Si on le comprime, il conserve environ son volume initial : un liquide est pratiquement incompressible.

2.4. Fluide compressible :

Un fluide est dit compressible lorsque le volume occupé par une masse donnée varie en fonction de la pression extérieure. Les gaz sont des fluides compressibles.

- Il se répand.
- Il est extensible et occupe tout l'espace qui lui est offert.
- Il est compressible.

Par exemple, l'air, l'hydrogène, le méthane à l'état gazeux, sont considérés comme des fluides compressibles

3. La statique des fluides :

C'est l'hydrostatique qui étudie les fluides au repos. C'est historiquement le début de la mécanique des fluides, avec la poussée d'Archimède, l'étude de la pression.

4. La dynamique des fluides :

C'est l'étude des fluides en mouvement. Les fluides peuvent aussi se classer en deux familles relativement à leur viscosité, une de leur caractéristique physico-chimique :

- La famille des fluides "**newtoniens**" (comme l'eau, l'air et la plupart des gaz), ces ont une viscosité constante ou qui ne peut varier qu'en fonction de la température.
- Les fluides "**non newtoniens**" ont, en plus, la particularité d'avoir leur viscosité qui varie en fonction de la vitesse et des contraintes qu'ils subissent lorsque ceux-ci s'écoulent. Parmi ces fluides on trouve le sang, les gels, les boues, les pâtes....

5. Définition de la viscosité :

La viscosité d'un fluide correspond aux résistances de frottement qui s'opposent au déplacement relatif de ses molécules lorsqu'il est mis en mouvement. C'est une grandeur physique qui exprime la capacité d'un corps à s'opposer au cisaillement. Elle se manifeste chaque fois que les couches voisines d'un même fluide sont en mouvement relatif, c'est à dire lorsqu'il s'établit un gradient de vitesse. On peut donc dire de la viscosité qu'elle est la mesure du frottement fluide. La force de frottement peut être figurée par l'énergie nécessaire pour déplacer un objet qui frotte sur un autre.

La viscosité peut donc être considérée comme le frottement interne qui résulte du glissement d'une couche de fluide sur une autre.

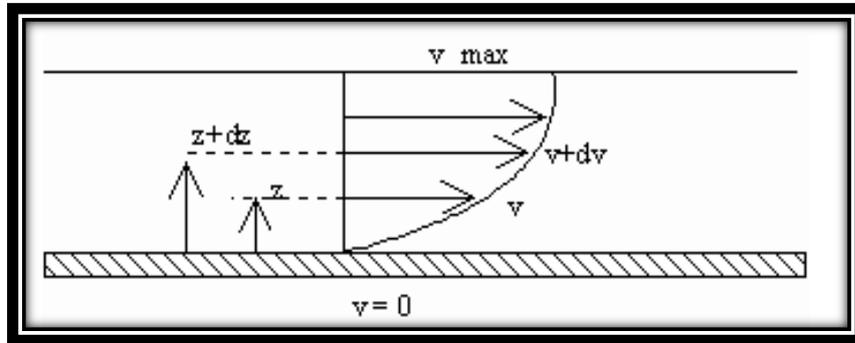


Figure (I-2) : Profil de vitesse d'écoulement plan d'un fluide réel

Si on représente par un vecteur, la vitesse de chaque particule située dans une section droite perpendiculaire à l'écoulement d'ensemble, la courbe des extrémités de ces vecteurs représente le profil de vitesse. Le mouvement du fluide peut être considéré comme résultant du glissement des couches de fluide les unes sur les autres. La vitesse de chaque couche est une fonction de la distance z de cette couche au plan fixe : $v = v(z)$. Considérons deux couches contiguës distantes de dz . La force de frottement qui s'exerce à la surface de séparation de ces deux couches s'oppose au glissement d'une couche sur l'autre.

5.1. La viscosité dynamique et la viscosité cinématique :

5.1.1. Viscosité dynamique :

La viscosité dynamique exprime la proportionnalité entre la force qu'il faut exercer sur une plaque lorsqu'elle est plongée dans un courant et la variation de vitesse. Elle est exprimée par un coefficient représentant la contrainte de cisaillement nécessaire pour produire un gradient de vitesse d'écoulement d'une unité dans la matière.

Considérons deux couches de fluide adjacentes distantes de dz . La force de frottement F qui s'exerce à la surface de séparation de ces deux couches s'oppose au glissement d'une couche sur l'autre. Elle est proportionnelle à la différence de vitesse des couches soit dv , à leur surface S et inversement proportionnelle à dz :

Le facteur de proportionnalité μ est le coefficient de viscosité dynamique du fluide.

$$\mathbf{F}_g = \mu \mathbf{S} \frac{dV}{dz} \quad (\text{I - 1})$$

\mathbf{F}_g : force de glissement entre les couches en (N),

μ : Viscosité dynamique en (kg/m.s),

\mathbf{S} : surface de contact entre deux couches en (m^2),

dV : Écart de vitesse entre deux couches en (m/s),

dZ : Distance entre deux couches en (m).

Dans le système international (SI), l'unité de la viscosité dynamique est le Pascal seconde (Pa·s) ou Poiseuille (Pl) : $1 \text{ Pa}\cdot\text{s} = 1 \text{ Pl} = 1 \text{ kg/m}\cdot\text{s}$

5.1.2. Viscosité cinématique :

Une deuxième définition est souvent utilisée, c'est celle de la viscosité cinématique ν , rapport de la viscosité dynamique μ à la masse volumique ρ du fluide :

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (\text{I - 2})$$

L'unité SI est le mètre carré par seconde (m^2/s) qui est donc la viscosité cinématique d'un fluide dont la viscosité dynamique est de 1(pascal.seconde) et la masse volumique 1 (kilogramme par mètre cube).

5.2. Variation de la viscosité avec la pression :

• Liquides :

La viscosité dynamique des liquides est pratiquement indépendante de la pression tant que celle-ci reste inférieure à 200 bars environ ; en raison de leur très faible compressibilité, il en est de même de leur viscosité cinématique tant que la pression reste inférieure à la même limite.

- **Gaz :**

La viscosité dynamique des gaz est pratiquement indépendante de la pression ; il s'ensuit que leur viscosité cinématique diminue quand la pression augmente.

5.3. Variation de la viscosité avec la température :

- **Liquides :**

La viscosité dynamique des liquides diminue quand la température augmente ; il en est de même de leur viscosité cinématique, bien qu'à un degré moindre. A remarquer que, en règle générale, la viscosité (dynamique aussi bien que cinématique) des huiles varie beaucoup plus que celle de l'eau avec la température, tandis que celle de différents liquides organiques (notamment silicones) varie moins ; cette dernière comparaison est illustrée par le diagramme ci-dessous.

- **Gaz :**

La viscosité dynamique des gaz augmente avec la température ; de même, en général, leur viscosité cinématique.

Pour les fluides Newtoniens, la viscosité est constante pour toutes les vitesses de cisaillement et ne dépend que de la pression et de la température. C'est le cas des gaz, des vapeurs, des liquides purs de faible masse molaire...

Pour les fluides non-Newtoniens, la viscosité varie avec la vitesse de cisaillement. C'est le cas de la plupart des peintures, les boues, les purées...L'étude de ces fluides relève de la rhéologie.

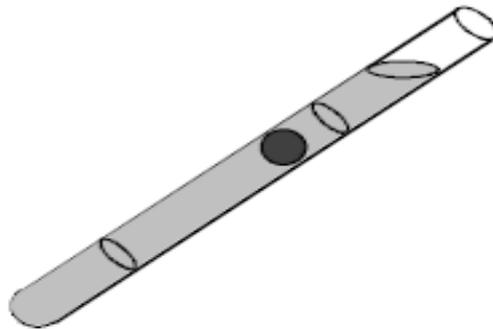
Quelques valeurs de viscosité dans le système (SI)

(À 20 °C sous la pression atmosphérique normale)

	Viscosité dynamique	Viscosité cinématique ($\times 10^{-6}$)
Ethanol	$1,20 \times 10^{-3}$	1,51
Benzène	$0,625 \times 10^{-3}$	0,741
Glycérol	1,49	1182
Mercure	1,554	0,1147
Air	$18,5 \times 10^{-6}$	15,6

Tableau (I-1)**5.4. Mesurage de la viscosité :****5.4.1. Viscosimètre à chute de bille ou viscosimètre d'Hoepler :**

Une bille sphérique tombe lentement dans un tube bien calibré renfermant le liquide visqueux. On mesure la durée t que met la bille pour parcourir une certaine distance. On montre que la viscosité dynamique μ est proportionnelle à la durée t : $\mu = K \cdot t$

**Figure (I-3) : Viscosimètre d'Hoepler**

5.4.2. Viscosimètre rotatif ou viscosimètre de Couette :

Un cylindre plein (A) tourne à vitesse constante dans un liquide contenu dans un récipient cylindrique (B) ; celui-ci, mobile autour de son axe de révolution, est entraîné par le liquide. Un ressort, exerçant un couple de torsion après avoir tourné d'un angle α , retient (B) en équilibre. On montre que la viscosité dynamique μ est proportionnelle à l'angle α : $\mu = K \cdot \alpha$

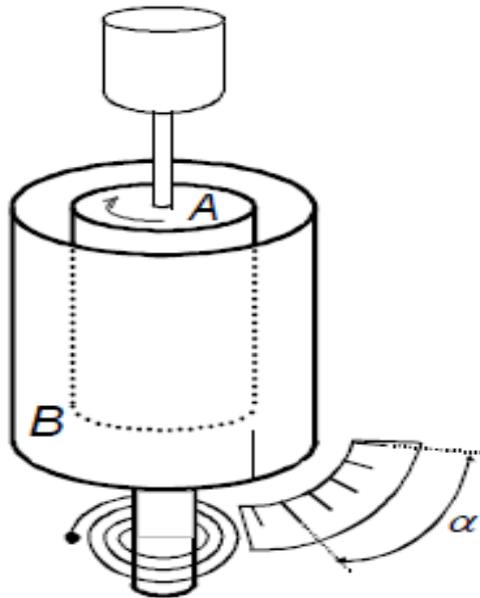


Figure (I-4) : Viscosimètre de Couette

6. Notion de la couche limite :

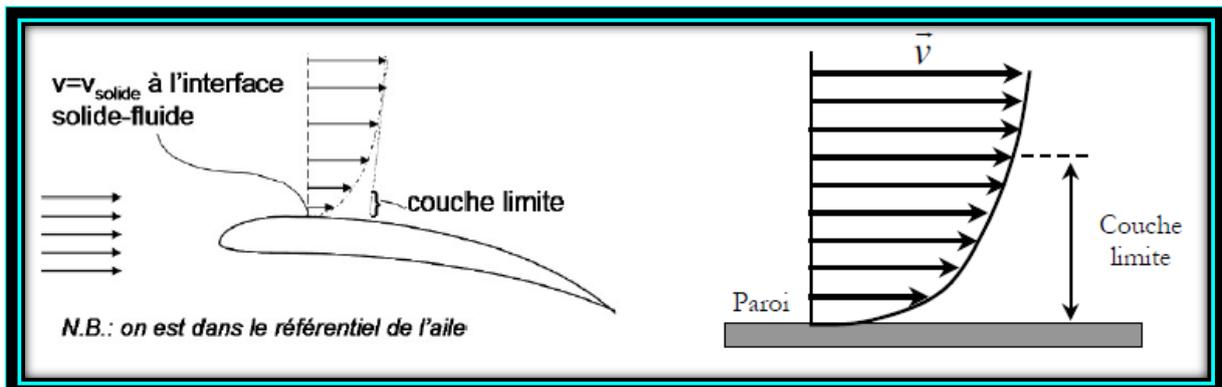


Figure (I-5) : Couche limite

Dans un écoulement [2] laminaire à grand nombre de Reynolds, loin de tout obstacle, le fluide peut être considéré comme parfait : les forces de viscosité sont alors négligeables. En revanche, lorsqu'on introduit un obstacle, au voisinage de ce dernier les phénomènes de diffusion (viscosité) et de convection doivent être pris en compte simultanément. Il existe ainsi une zone où la vitesse du fluide évolue rapidement de sa valeur en l'absence d'obstacle jusqu'à zéro si l'obstacle est immobile : cette zone est appelée couche limite. L'écoulement dans la couche limite peut lui-même être laminaire ou turbulent.

Donc la couche limite est la zone de fluide de faible épaisseur située au voisinage d'un obstacle et dans laquelle le fluide ne peut plus être considéré comme parfait. En dehors de cette zone, toute la dynamique des fluides parfaits précédemment étudiée reste valable.

Notons enfin que la forme de l'obstacle joue un grand rôle sur celle de la couche limite. Pour un solide de forme compacte comme une sphère, l'épaisseur de la couche limite est faible devant le rayon et on peut l'ignorer. Ainsi, pour des obstacles « **mal profilés** », se produit le **phénomène de décollement de couche limite**.

Celui-ci engendre la création d'une grande zone de turbulence dans le sillage de l'obstacle. Ce type de phénomène doit par exemple être contrôlé et évité au mieux dans le calcul des profils.

7. Nombre de Reynolds :

Le **nombre de Reynolds** est un nombre sans dimension liant la **viscosité**, la **masse volumique**, et une **longueur de référence**. C'est un nombre proportionnel au rapport entre les forces d'inertie par les forces de viscosité.

$$\mathbf{Re} = \frac{V \times L}{\nu} \quad (\mathbf{I - 3})$$

$$\text{Ou } Re = \frac{\rho \times V \times L}{\mu} \quad (\text{I - 4})$$

V : vitesse moyenne.

L : longueur de référence.

μ : viscosité dynamique.

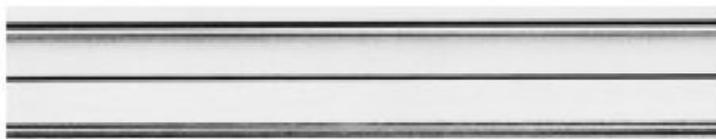
ρ : masse volumique.

ν : viscosité cinématique

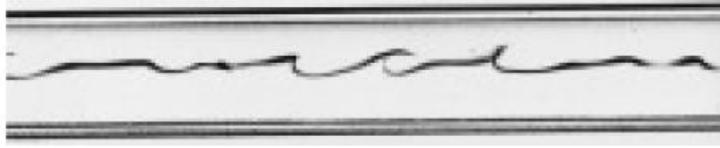
L'intérêt du nombre de Reynolds est qu'il permet de classer les différents écoulements. Le nombre de Reynolds auquel on perd l'écoulement laminaire est appelé le nombre de Reynolds critique. **$Re_c \approx 2000$** .



$Re < 2000$ le régime est laminaire.



$2000 < Re < 3000$ le régime est intermédiaire.



$Re > 3000$ le régime est turbulent.



Pour des nombres de Reynolds faibles, la viscosité joue un rôle prépondérant. Les écoulements seront très stables et bien définis (on parle d'écoulements rampants). Ce type d'écoulement est associé aux fluides très visqueux (μ élevée), faibles vitesses, pour des systèmes de petites taille ...

Pour des nombres de Reynolds élevés, la convection joue un rôle prépondérant et les écoulements deviennent instables et **turbulents** on rencontre ce type d'écoulement pour des fluides peu visqueux, aux fortes vitesses, pour des systèmes de grande taille. Pour un écoulement laminaire, le calcul du nombre de Reynolds semble donc a priori inutile puisque le terme convectif n'intervient pas. En effet ce calcul devient pertinent pour discuter de la possibilité même d'une structure laminaire de l'écoulement, ou plus exactement de sa stabilité. L'augmentation de la vitesse par exemple dans un écoulement laminaire pourra créer des instabilités faisant évoluer l'écoulement vers un régime turbulent. Des études d'ordre purement expérimental permettent alors de définir une valeur limite numérique du nombre de Reynolds séparant les deux types de régime. Cette valeur dépend évidemment de chaque écoulement, mais on peut retenir une valeur usuelle de l'ordre de **2000**.

❖ **Quelques valeurs du nombre de Reynolds :**

Il faut faire deux observations importantes sur le nombre de Reynolds. La première est qu'il n'a pas d'unité. C'est en effet le rapport de deux quantités qui sont des énergies volumiques, et le résultat est donc un **nombre sans dimension**.

La deuxième observation est qu'il ne dépend pas uniquement du fluide que l'on considère : il n'y a pas de sens à parler du nombre de Reynolds "de l'eau", puisque cela dépend des caractéristiques de l'écoulement (vitesse et la longueur de référence).

Le tableau ci-dessous montre le calcul du nombre de Reynolds dans les deux situations .On peut constater qu'**il est 100 millions de fois plus élevé dans le fleuve que dans la bouteille d'huile !**

	Fleuve	Bouteille d'huile
Densité (Kg/m³)	1000	1000
Viscosité(Pa.s)	0.001	1
Diamètre(m)	10	0.01
Vitesse(m/s)	1	0.01
Reynolds	10000000	0.1

Tableau (I-2) : Nombre de Reynolds pour un fleuve et une bouteille d'huile.

8. Régime d'écoulement :

L'étude d'un écoulement [3] nécessite de distinguer différents régimes d'écoulement.

8.1. Régime stationnaire :

La vitesse ne dépend pas explicitement du temps :

$$\frac{\overrightarrow{\partial v}(x,y,z,t)}{\partial t} = \vec{0}. \quad (\text{I - 5})$$

Cela ne signifie pas que la particule n'est pas **accélérée** ! Cela signifie simplement que les lignes de courant n'évoluent pas au cours du temps. En régime stationnaire, une ligne de courant est aussi une trajectoire.

8.2. Régime laminaire :

Sur la figure ci-dessous la fumée de cigarettes permet de visualiser l'écoulement de convection induite par la chaleur de la cigarette. Dans un premier temps on observe que l'écoulement s'organise en filets réguliers. On dit que l'écoulement est laminaire.

8.3 Régime turbulent :

Toujours sur la figure ci-dessous, on observe une transition dans le comportement de l'écoulement. L'écoulement laminaire devient soudain, imprévisible ; Les filets s'entremêlent de façon complexe et chaotique. L'écoulement est alors turbulent.

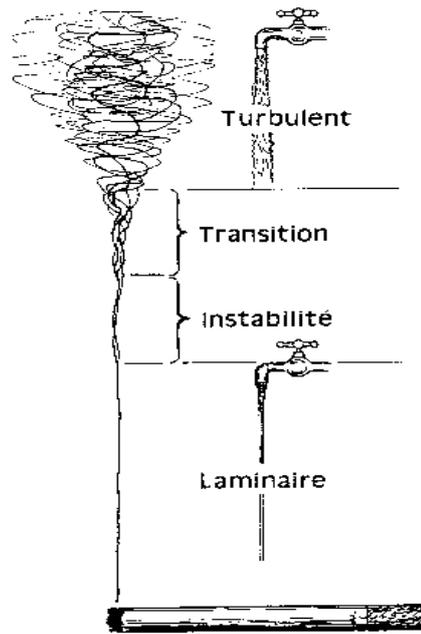


Figure (I-6) : Différents écoulements.

9. Analyse du mouvement d'une particule fluide :

9.1. La particule fluide :

C'est l'entité élémentaire choisie pour permettre une description complète des écoulements. Il s'agit d'un « **paquet de molécules** » entourant un point M donné de l'espace fluide. Ces molécules sont alors supposées avoir toutes la même vitesse à chaque instant.

9.2. La translation :

La translation se caractérise par des vecteurs vitesse $\vec{u}, \vec{v}, \vec{w}$ relatives à chaque direction x, y, z et à chaque axe du repère orthonormé $o(\vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$:

$$\vec{u}\vec{i} + \vec{v}\vec{j} + \vec{w}\vec{k} = \vec{V} \quad (\text{I - 6})$$

\vec{V} : Vecteur vitesse absolue.

9.3. La rotation :

La rotation se caractérise par un vecteur tourbillon $\vec{\Omega}(\Omega_x, \Omega_y, \Omega_z)$, et chaque composante de ce vecteur représente un taux de rotation suivant chaque axe :

$$\begin{aligned}\Omega_x &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} \right) \\ \Omega_y &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} \right); \\ \Omega_z &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right)\end{aligned}\tag{I - 7}$$

$\vec{\Omega}$: est appelé vecteur tourbillon.

9.4. Déformation linéaire :

La déformation linéaire se traduit par l'augmentation du volume de l'élément de fluide et se caractérise par :

$$\text{div} \vec{V} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = \theta\tag{I - 8}$$

θ : est appelée taux de dilatation.

9.5. Déformation angulaire :

De même que pour la rotation, on peut définir aussi le taux de déformation angulaire suivant chaque axe comme suit :

$$\begin{aligned}\epsilon_x &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \\ \epsilon_y &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right); \\ \epsilon_z &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)\end{aligned}\tag{I - 9}$$

$\vec{\epsilon}$: Vecteur taux de déformation angulaire.

10. Lignes de courant :

Une ligne de courant [3] ou ligne d'écoulement, est une ligne de champ du vecteur vitesse c'est-à-dire une courbe tangente en tout point $M(x, y, z)$ à $\mathbf{v}(x, y, z, t)$ à l'instant t . L'ensemble des lignes de courant peut évoluer au cours du temps. L'équation de la ligne de courant s'obtient en résolvant les équations différentielles suivantes :

$$\frac{dx}{v_x} = \frac{dy}{v_y} = \frac{dz}{v_z}\tag{I - 10}$$

Une ligne de courant n'est pas forcément une trajectoire d'une particule de fluide. Ces deux notions sont à priori distinctes.

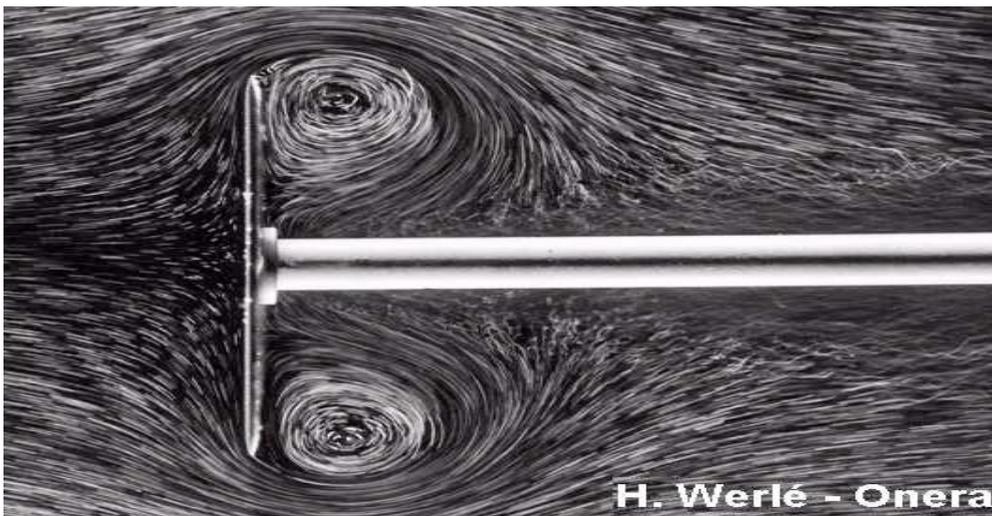


Figure (I-7): Visualisation des lignes d'écoulement : On utilise des particules réfléchissantes que l'on photographie avec un court temps de pose. On a accès ainsi à des segments brillants qui donnent le sens de la vitesse en différents points ce qui permet de reconstituer la carte du champ de vitesse.

Tube de courant :

Ensemble de lignes de courant s'appuyant sur une courbe fermée.

Filet de courant :

Tube de courant s'appuyant sur un petit élément de surface ΔS .

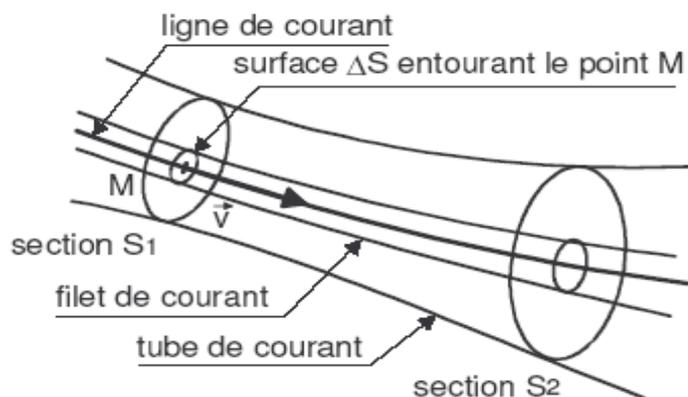


Figure (I-8) : Tube et filet de courant

10.1. Description d'Euler :

C'est une description de l'écoulement qui consiste à établir à un instant t donné l'ensemble des vitesses associées à chacun des points de l'espace fluide. Ainsi, à chaque point M est associé une vitesse susceptible d'évoluer dans le temps. L'écoulement du fluide est alors décrit au moyen d'un ensemble de vecteurs vitesse appelé « **champ de vecteurs vitesse** ». C'est donc une image instantanée de l'écoulement qui est utilisée.

Sur la base de ce champ de vecteurs vitesse, on définit comme « **ligne de courant** » la courbe qui en chacun de ses points est tangente au vecteur vitesse. Au même titre que le champ de vecteurs vitesse, il s'agit donc d'une représentation au sein l'espace fluide susceptible d'évoluer dans le temps ; en conséquence, on prendra soin de dater les lignes de courant ainsi définies (ligne de courant passant par tel point à l'instant).

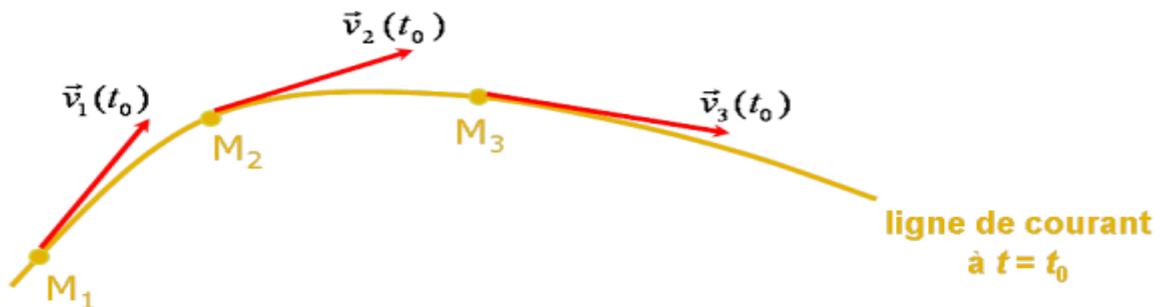


Figure (I-9) : Description d'Euler

10.2. Description de Lagrange :

Il s'agit d'une description de l'écoulement qui consiste à suivre dans l'espace fluide la position d'une particule choisie en fonction du temps. Il en découle la définition de la « **trajectoire** » d'une particule fluide : c'est l'ensemble des positions occupées successivement par une même particule.

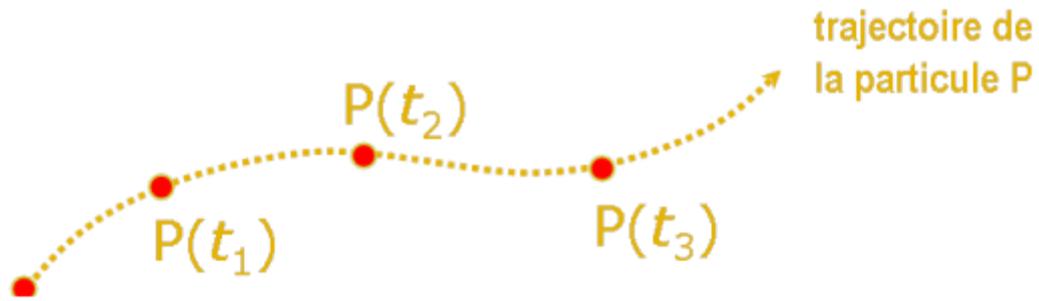


Figure (I-10) : Description de Lagrange

11. Equation de continuité :

Cette équation exprime [4] la conservation de la masse contenue dans un volume élémentaire dV_l . Considérons un parallélépipède élémentaire de fluide de volume $dx dy dz$. la masse totale entrant dans un parallélépipède ayant pour côtés dx , dy , dz :

$$\rho[u \cdot dydz + vdx dz + wdx dy]dt \tag{I - 11}$$

La masse totale sortant au même temps :

$$\left[\rho u + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} dx \right] dydzdt + \left[\rho v + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} dy \right] dx dzdt + \left[\rho w + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} dz \right] dx dydt \tag{I - 12}$$

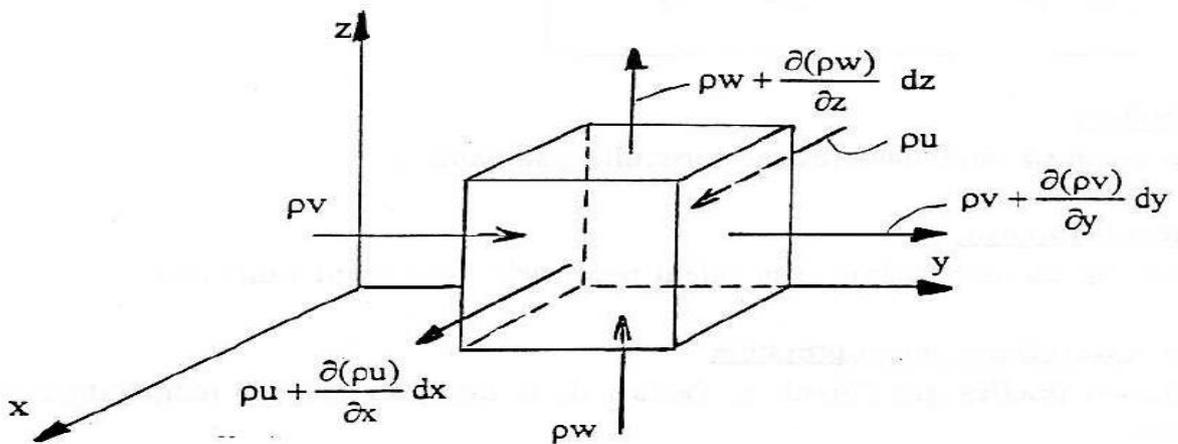


Figure (I-11) : Bilan de masse

La masse sortante est donc égale à :

$$dm = \left[\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \right] dx dy dz dt \quad (\text{I - 13})$$

La diminution de masse à l'intérieur de l'élément pendant la même durée dt :

$$dm = - \frac{\partial \rho}{\partial t} dx dy dz dt \quad (\text{I - 14})$$

En égalant les deux valeurs de dm on obtient l'équation de continuité :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (\text{I - 15})$$

Ou encore sous forme plus compacte :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div} \rho \vec{V} = 0 \quad (\text{I - 16})$$

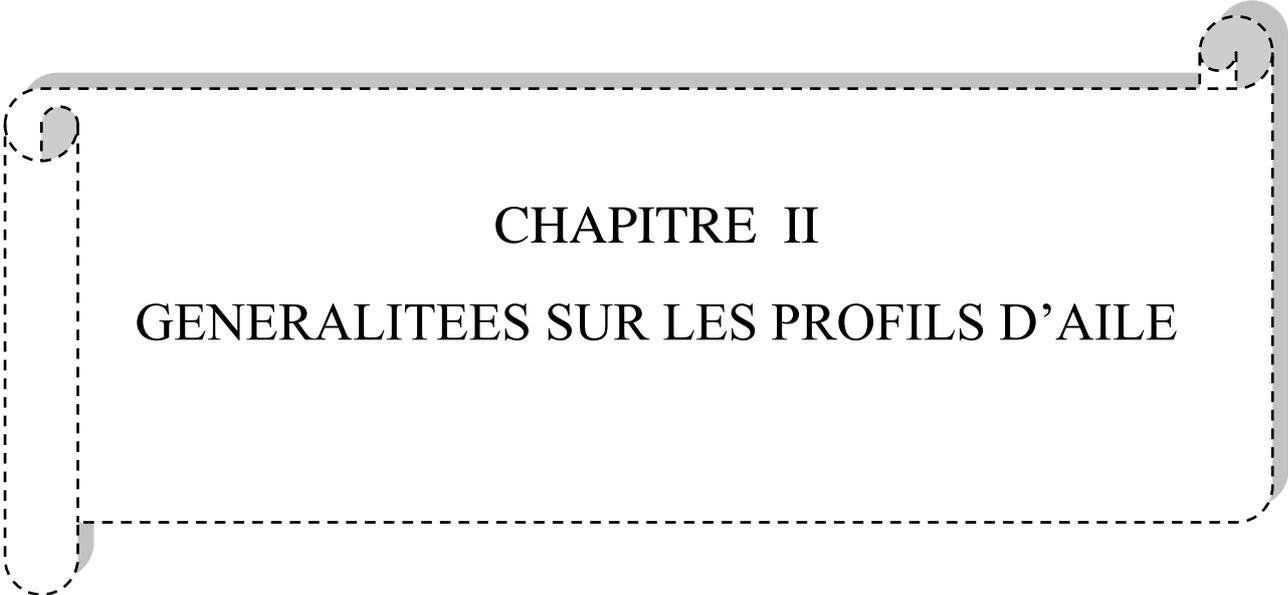
Cas particuliers :

Dans le cas d'un écoulement permanent l'équation de continuité se réduit à :

$$\text{div} \rho \vec{V} = 0 \quad (\text{I - 17})$$

Dans le cas d'un fluide incompressible la masse volumique ρ est constante, donc l'équation de continuité se réduit à :

$$\text{div} \vec{V} = 0 \quad (\text{I - 18})$$

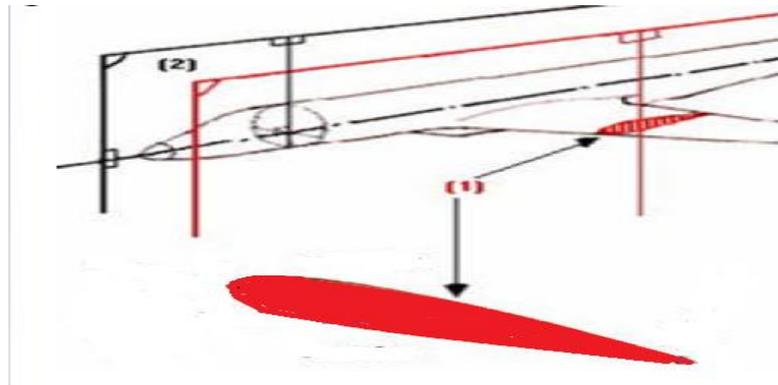


CHAPITRE II
GENERALITEES SUR LES PROFILS D'AILE

1. Définition:

Le profil de l'aile est une section droite, nous obtenons cette section si nous coupons l'aile suivant le plan (1) qui est parallèle au plan (2) de symétrie de l'avion.

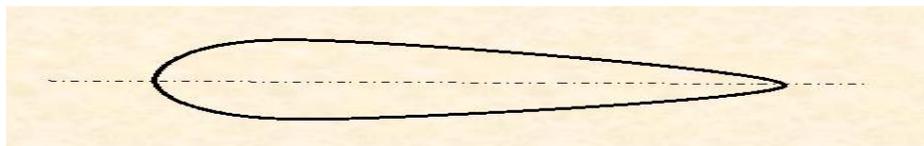
Le profil d'une aile est spécifique à l'application de l'avion (de tourisme, de chasse, de ligne ou de transport).



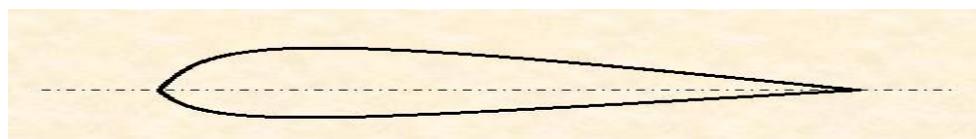
❖ Les différents profils d'ailes :

Selon la cambrure et suivant la forme générale que les profils ont, on peut distinguer 5 types.

- Profil d'aile **biconvexe symétrique** utilisé essentiellement pour les empennages et les pales d'hélico.

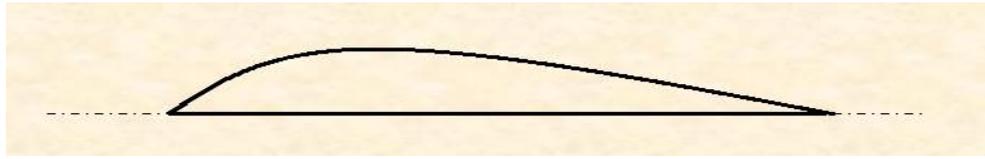


- Profil d'aile **biconvexe dissymétrique** utilisé pour les ailes de planeurs, avions et certaines pales d'hélico.

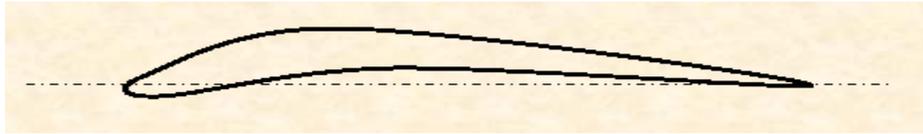


- Profil d'aile à **plan convexe** utilisé pour les avions légers, planeurs et hélices.

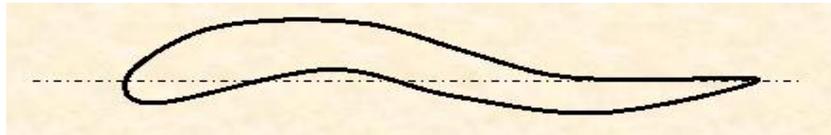
CHAPITRE II
GENERALITES SUR LES PROFILS D'AILE



- Profil d'aile **creux simple courbure** utilisé pour les planeurs lents.



- Profil d'aile à **double courbure** utilisé pour les ailes volantes (auto stable).



2. Caractéristiques géométriques :

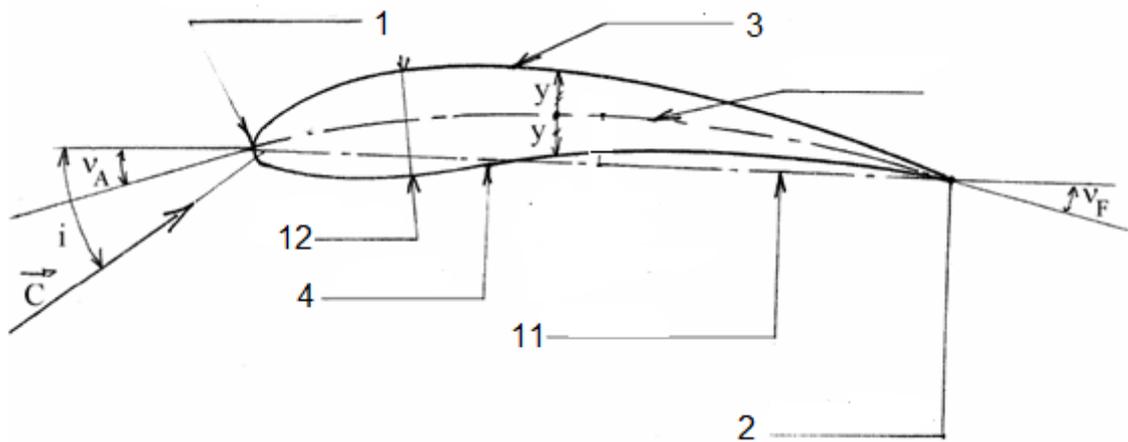


Figure (II-1) : Profil d'aile

1. **Bord d'attaque** : bord antérieur de l'aile.
2. **Bord de fuite** : bord postérieur de l'aile.

3. **Extrados** : surface supérieure de l'aile.
4. **Intrados** : surface inférieure de l'aile.
5. **i** : angle d'incidence.
6. **ν_A** : angle d'attaque.
7. **ν_F** : angle de fuite.
8. **e/l** : l'épaisseur relative.
9. **f/l** : la courbure relative.
10. **Squelette** : lieu géométrique des points situés à égale distance verticale de l'extrados et de l'intrados.
11. **Corde(l)** : droite joignant le bord d'attaque au bord de fuite ; la **profondeur** est la longueur de la corde.
12. **Epaisseur(e)** : distance entre l'intrados et l'extrados mesurée perpendiculairement à la corde. L'épaisseur maximum, pour les profils classiques, se situe généralement à une distance d'environ 30 % de la profondeur, à partir du bord d'attaque.
13. **Cambrure** : distance entre la corde et le squelette mesurée perpendiculairement à la corde. Si la cambrure varie le long du profil, celui-ci est dit dissymétrique. Un profil symétrique n'a pas de cambrure.

3. Familles de profils :

Il existe trois familles différentes de profils qui sont réparties selon l'ordre du nombre des chiffres qu'ils comportent [6]:

- Profils empiriques : ils sont repérés par quatre chiffres : exemple : **NACA 4414**.

Le squelette est constitué de deux arcs de parabole se rejoignant au point de flèche maxi. Le premier chiffre est la cambrure relative en % (pour l'exemple : 4%). Le deuxième est la distance relative en dizaine de % de la flèche maxi au bord d'attaque (ici 40%) et le troisième et quatrième est l'épaisseur relative (ici 14%). La loi d'épaisseur est identique pour tous les profils.

- Profils semi-laminaires : ils sont repérés par cinq chiffres dont fait partie le fameux **NACA 23012**.

Dans cette famille, le premier chiffre représente la valeur de la flèche, les deux chiffres suivants représentent la valeur de la distance entre le bord d'attaque et le point (y) et les deux derniers indiquent la valeur de l'épaisseur relative.

- Profils laminaires : ils se composent de cinq chiffres : exemple : **NACA 66 209**.

Dans cette famille on cherche à diminuer au maximum la traînée pour améliorer les performances en croisière.

Le premier chiffre est le repère de la série et il est suivi par le chiffre indiquant la position du point de dépression maximale en dixièmes de la corde. Le troisième chiffre indique la valeur de ΔC_y de la plage d'adaptation. Le quatrième chiffre représente la valeur du coefficient C_y d'adaptation tandis que les deux derniers donnent l'épaisseur relative.

4. Forces aérodynamiques :

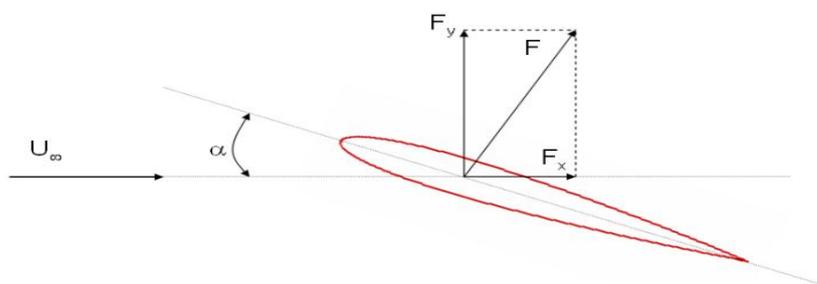


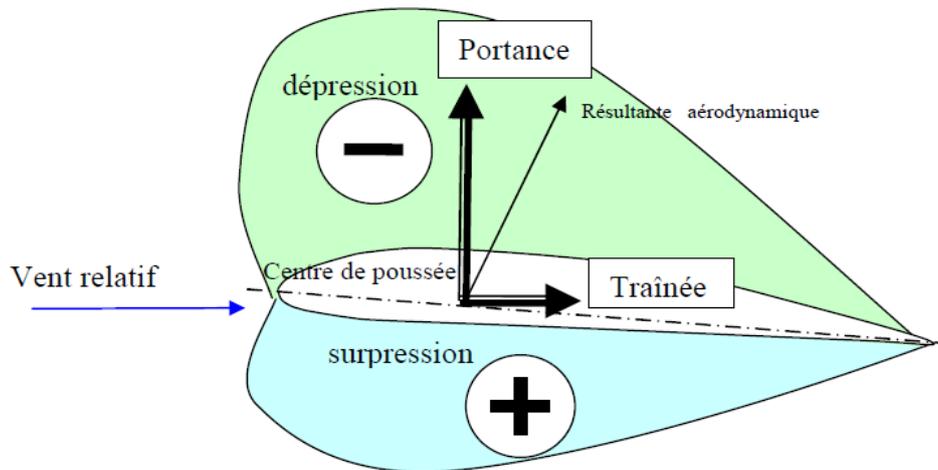
Figure (II-2) : Forces aérodynamiques

Le champ de pression s'exerçant sur un obstacle induit globalement un torseur d'efforts où l'on considère généralement :

- une force de traînée : \mathbf{F}_x , parallèle à la direction moyenne de l'écoulement.
- une force de portance : \mathbf{F}_y , perpendiculaire à la direction moyenne de l'écoulement, dans le plan vertical.
- L'expression de la force est de la forme générale

$$\mathbf{F}_y = \frac{1}{2} \rho V^2 S C \quad (\text{II - 1})$$

CHAPITRE II
GENERALITES SUR LES PROFILS D'AILE



❖ **La portance :**

La portance est [5] une force qui dépend des pressions qui s'exercent sur l'aile, elle est due à la différence de pression entre l'extrados et l'intrados.

- Toute l'envergure de l'aile crée une portance, cette dernière sera donc proportionnelle à la surface de l'aile.
- La forme du profil permet de déterminer la qualité de la portance. Cette forme est caractérisée par un coefficient nommé C_Y .
- L'air dans lequel se déplace l'aile a des caractéristiques dépendant d'autres grandeurs comme la température, la pression etc. Le paramètre global retenu est la masse volumique en kg/m^3 .

Ceci conduit à l'expression suivante:

$$F_y = \frac{1}{2} \rho V^2 S C_y \quad (\text{II} - 2)$$

ρ : masse volumique de l'air en kg/m^3 .

S : surface de l'aile en m^2 .

V: vitesse en m/s.

C_y : coefficient de portance du profil surpression.

❖ **La traînée :**

La traînée est une force résistante qui freine l'avion, elle est due au décollement de la couche limite. La traînée dépend, comme la portance, de la pression qui s'exerce sur l'aile, de la surface de l'aile et des caractéristiques de profil. Lorsqu'un objet se déplace, il crée une traînée qui résiste à son avancement.

Ceci conduit à l'expression suivante:

$$F_x = \frac{1}{2} \rho V^2 S C_x \quad (\text{II - 3})$$

ρ: masse volumique de l'air en kg/m³.

S: surface de l'aile en m².

V²: vitesse en m/s.

C_x : coefficient de traînée du profil.

Chaque profil est étudié pour que sa traînée soit la plus faible possible mais aucun profil ne peut avoir une traînée égale à zéro. Le C_x caractérise les performances du profil.

❖ **Le bord d'attaque :**

Le bord d'attaque est une zone importante. De sa forme et de son état de surface dépend la qualité de l'écoulement de l'air sur le reste du profil. Il est donc important de respecter sa forme et son état de surface.

- Un bord d'attaque trop pointu ou abîmé détériore l'écoulement aérodynamique, ce qui réduit la portance et augmente beaucoup la traînée.
- Un bord d'attaque tombant (orienté vers le bas) donnera un vol instable.

❖ **Le bord de fuite :**

Sur les modèles de début, compte tenu des profils utilisés, inutile de transformer le bord de fuite de l'aile en lame de rasoir. Cette zone deviendrait plus

fragile, sans pour autant, garantir que l'écoulement aérodynamique influence les performances générales du profil.

5. Aile d'envergure finie :

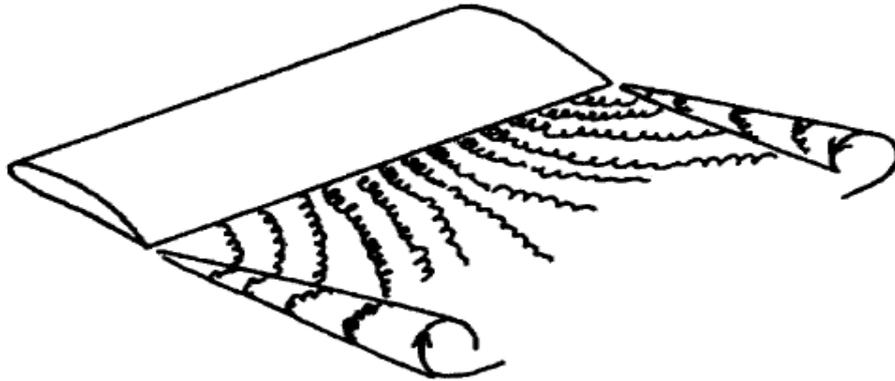


Figure (II-3) : Nappe tourbillonnaire derrière une aile d'envergure finie.

Lorsque l'envergure est finie [6], l'écoulement est différent de celui autour d'un profil.

Il s'établit aux extrémités de l'aile un courant secondaire allant de l'intrados dont on a la surpression vers l'extrados où on a la dépression tendant à égaliser la pression.

La différence de pression devant s'annuler aux extrémités de l'aile, il se produit le long de l'envergure un gradient de pression de sens opposés sur les deux faces de l'aile. La ligne de courant subit par conséquent une déviation. Ce mouvement s'amorce sur l'aile et continue derrière elle ; il se forme ainsi deux tourbillons marginaux comme l'indique la **figure (II-3)** qu'il est d'ailleurs facile de visualiser expérimentalement.

Dans le cas d'une aile d'envergure limitée, des tourbillons marginaux induisent une résistance supplémentaire appelée traînée induite.

6. Modélisation de résolution :

La théorie des variables complexes offre une méthode de résolution très efficace pour les écoulements potentiels bidimensionnels des fluides incompressibles.

Dans ce cas, le potentiel complexe est défini comme suit :

$$F(z) = \Phi(x, y) + i\Psi(x, y) \quad (\text{II - 4})$$

Avec : $z = x + iy$

Φ : Potentiel complexe.

Ψ : La fonction de courant.

On a quelques méthodes essentielles qui permettent le calcul de ce potentiel complexe :

Méthode analytique :

Elle permet la recherche des solutions correspondant à un potentiel complexe analytiquement. Dans cette méthode, la géométrie de l'obstacle est imposée par la forme même du potentiel, c'est le cas par exemple de l'écoulement autour d'un cylindre circulaire infini.

Parmi les méthodes analytiques, on distingue aussi celle des transformations conformes. Cette méthode permet de passer de l'écoulement autour d'un cylindre infini à base circulaire, qui est connu, vers l'écoulement autour d'un cylindre à base quelconque. Ce mode de calcul est très utilisé en aérodynamique.

Méthode des singularités :

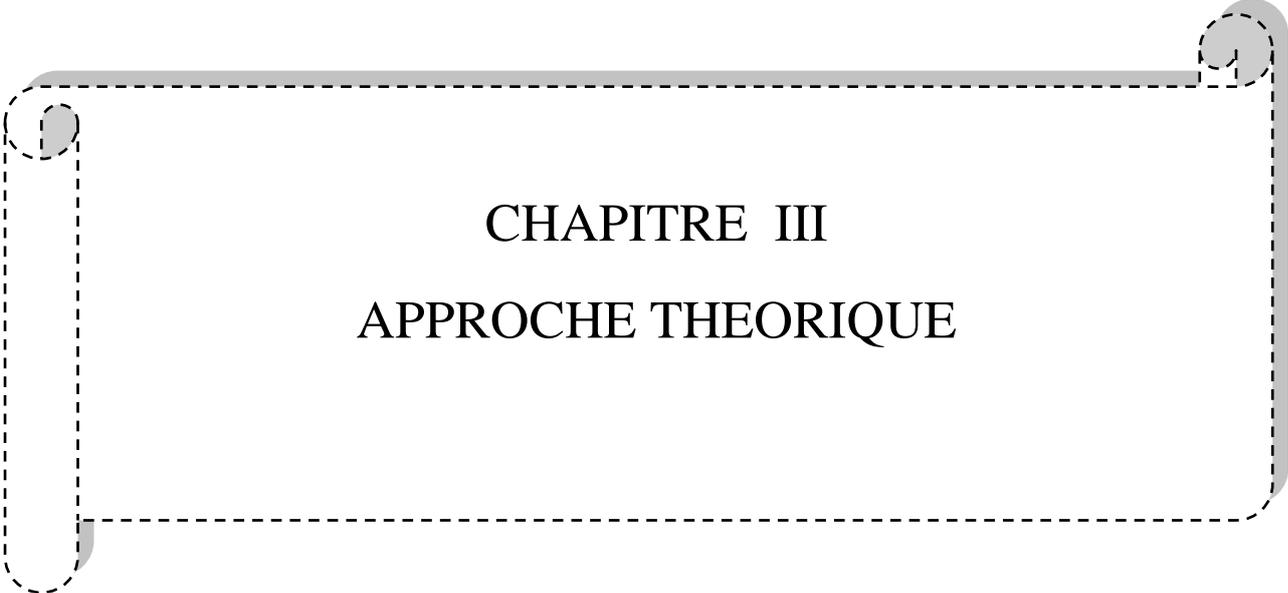
Le potentiel complexe de l'écoulement est recherché en superposant à l'écoulement uniforme non perturbé, les termes qui traduisent la présence d'un obstacle. Elle consiste à simuler la présence de l'obstacle par une succession d'écoulements élémentaires (source, vortex, ou doublet).

Méthodes numériques :

Plusieurs méthodes numériques existent pour la résolution des écoulements autour de profils. Elles sont utilisées pour la discrétisation des opérateurs différentiels.

Méthode empirique :

Cette méthode est basée sur l'expérimentation.



CHAPITRE III
APPROCHE THEORIQUE

1. Introduction :

Les transformations conformes jouent un rôle important en aérodynamique, elle permet de résoudre l'écoulement autour d'une forme quelconque à partir de l'écoulement autour d'une forme simple.

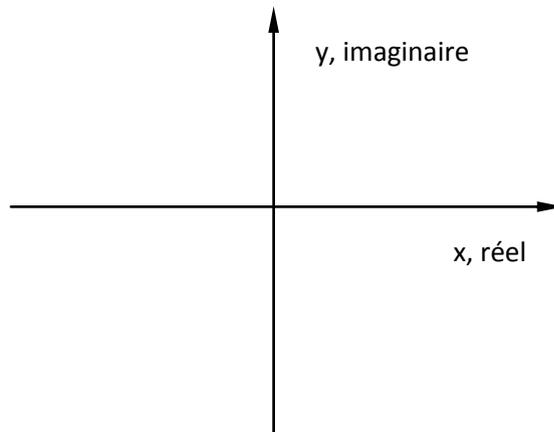
Et on a dans ce chapitre à étudier un profil d'aile au moyen de la transformation de JOUKOWSKI.

2. Petit rappelle sur les nombres complexes :

Le nombre complexe z est la somme de deux parties, une partie réelle et une autre partie imaginaire.

$z = \text{réelle} + i \cdot \text{imaginaire} = x + iy$ en coordonnées cartésiennes, x est la partie réelle et y est la partie imaginaire.

$z = r \exp(i \cdot \theta)$ en coordonnées polaires.



i : est un nombre complexe spécial tel que :

$$i = \sqrt{-1}, i^2 = -1, i^3 = -i \text{ et } i^4 = 1$$

On définit le nombre complexe conjugué de z par : $z^* = x - iy$.

Le module de z est défini par $|z| = (z \cdot z^*)^{1/2} = (x^2 + y^2)^{1/2}$.

L'argument de z noté $\arg(z) = \frac{y}{x}$

3. Propriétés de la transformation conforme :

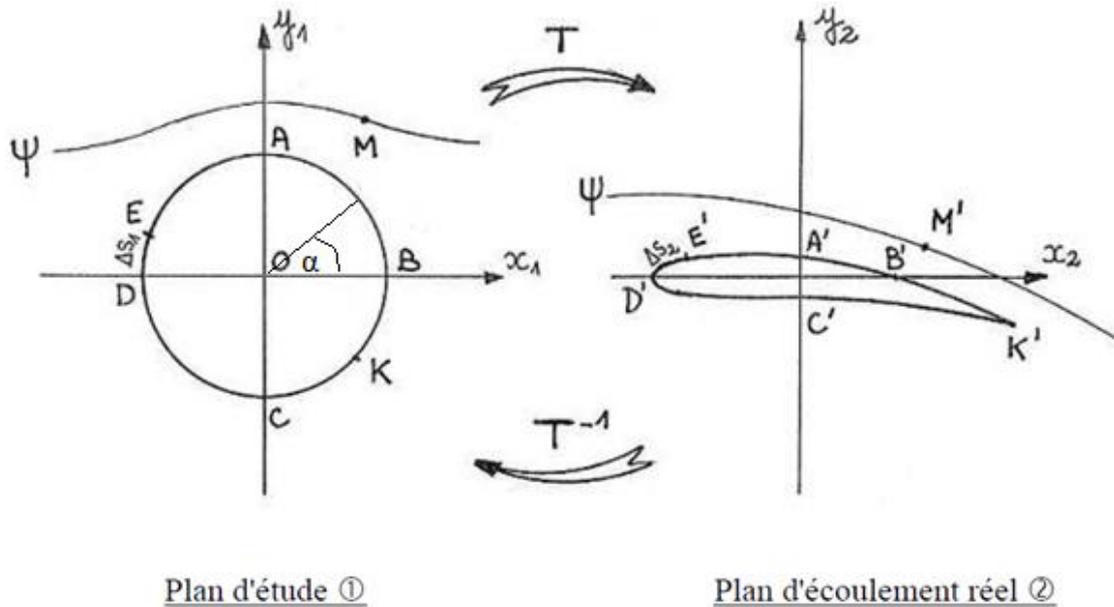


Figure (III-1) : Transformation conforme

- la transformation conforme conserve les angles : si deux vecteurs forment un angle α donné, cet angle sera conservé pour les deux vecteurs homologues du plan d'écoulement.
- Les lignes de courant et les équipotentiels étant orthogonales en un point du plan d'étude, elles conserveront cette propriété dans le plan 2.
- Les côtes des équipotentiels et des lignes de courant se conserveront respectivement au cours de la transformation. La forme du profil réel correspond à la ligne de courant $\Psi = 0$ de l'écoulement de référence.
- La circulation du vecteur vitesse entre deux points du plan 1 sera conservée entre les deux points homologues du plan 2.

Pour reconstituer l'écoulement réel, il est possible d'utiliser plusieurs transformations conformes successives et on citera les trois les plus utilisés :

- ❖ Transformation de JOUKOWSKI.
- ❖ Transformation de KARMAN-TREFFTZ.
- ❖ Transformation de VON-MISES.

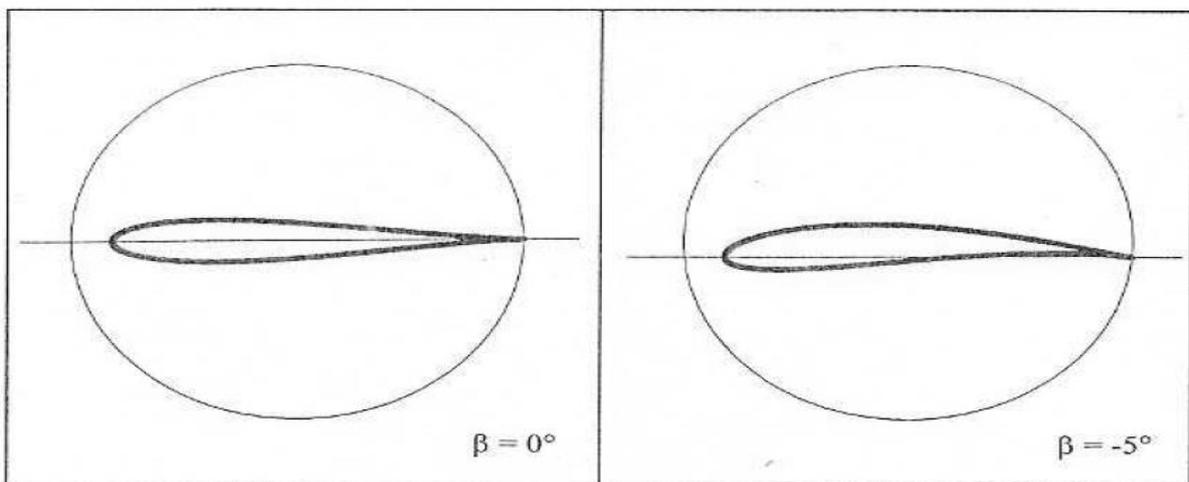
3.1. Transformation de JOUKOWSKI :

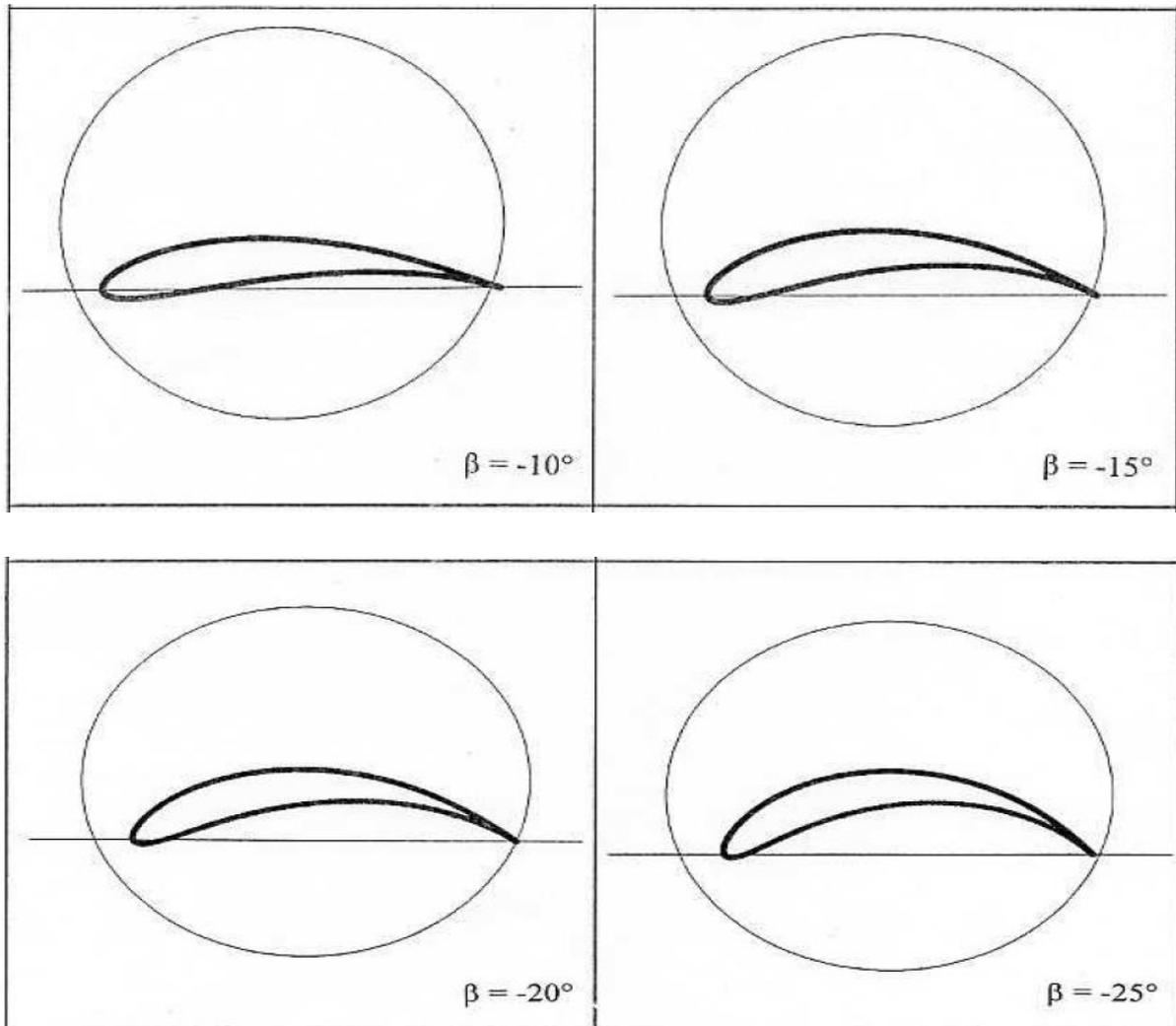
Ce type de transformation se définit par :

$$Z=F(z)=\frac{1}{2}\left(z+\frac{a^2}{z}\right) \quad (\text{III - 1})$$

Avec $\begin{cases} Z = X + iY \\ z = x + iy \end{cases}$

La transformation de JOUKOWSKI, fournit dans le plan Z , des séries d'images qui sont définies selon la position et le rayon du cercle dans le plan z . L'angle β fixant la cambrure du profil et le rapport $b/a \cos\beta$ fixant l'épaisseur relative, les profils appartenant à la famille JOUKOWSKI présente au bord de fuite une pointe de rebroussement.





Série de profils JOUKOWSKI pour $b/a \cos\beta=0,9$

3.1.1. Points singuliers :

Lorsque Z' est nulle ou infinie, on dit que la conformité est perturbée, et les points dont l'affixe satisfaisait à $\frac{dZ}{dz} = 0$ ou l'infinie sont appelés points singuliers.

Les points singuliers pour la transformation de JOUKOWSKI sont $z = \pm a$ et $z = 0$.

Le point dans le plan Z correspondant à $z = +a$ à signification particulière. Elle illustre une généralité qui consiste à faire passer le cercle de base par ces points singuliers afin d'obtenir un profil à bord de fuite et pointu correspondant dans le plan Z .

3.1.2. Equations paramétriques :

On a l'équation suivante :

$$Z = \frac{1}{2} \left(z + \frac{a^2}{z} \right)$$

$$\begin{aligned} X + iY &= \frac{1}{2} \left(x + iy + \frac{a^2}{x+iy} \right) \\ &= \frac{1}{2} \left[x + iy + a^2 \left(\frac{x}{x^2+y^2} - i \frac{y}{x^2+y^2} \right) \right] \\ &= \frac{1}{2} \left[x \left(1 + \frac{a^2}{x^2+y^2} \right) - iy \left(1 - \frac{a^2}{x^2+y^2} \right) \right]. \end{aligned}$$

On distingue les parties imaginaires et les parties réelles :

$$X = \frac{1}{2} x \left(1 + \frac{a^2}{x^2+y^2} \right) \tag{III - 2}$$

$$Y = \frac{1}{2} y \left(1 - \frac{a^2}{x^2+y^2} \right) \tag{III - 3}$$

Et comme

$$\begin{cases} x = x_0 + R \cos\alpha \\ y = y_0 + R \sin\alpha \\ R = \sqrt{(x_0 - x)^2 + y_0^2} \end{cases}$$

On aura:

$$X = \frac{1}{2} (x_0 + R \cos\alpha) \left[1 + \frac{a^2}{(x_0 + R \cos\alpha)^2 + (y_0 + R \sin\alpha)^2} \right] \tag{III - 4}$$

$$Y = \frac{1}{2} (y_0 + R \sin\alpha) \left[1 - \frac{a^2}{(x_0 + R \cos\alpha)^2 + (y_0 + R \sin\alpha)^2} \right] \tag{III - 5}$$

3.2. Transformation de KARMAN-TREFFTZ :

Cette transformation est définie par :

$$\frac{Z-Z_0}{Z+Z_0} = \left(\frac{z-z_0}{z+z_0} \right)^p \quad (\text{III - 6})$$

Avec $p = 2 - \left(\frac{t}{\pi} \right)$

t : angle formé par les deux tangentes au bord de fuite du profil.

Z_0 et z_0 sont deux complexes arbitraires.

Contrairement à la transformation de JOUKOWSKI, cette transformation permet de débarrasser de la pointe de rebroussement au bord de fuite du profil, sans l'annulation de l'angle t .

3.2.1. Points singuliers :

Pour $Z_0 = z_0 = a$, on aura l'expression de KARAMANN-TREFFETZ suivante :

$$\frac{Z-a}{Z+a} = \left(\frac{z-a}{z+a} \right)^p$$

$$\Rightarrow Z - a = (Z + a) \left(\frac{z-a}{z+a} \right)^p$$

$$\Rightarrow Z \left[1 - \left(\frac{z-a}{z+a} \right)^p \right] = a \left[1 + \left(\frac{z-a}{z+a} \right)^p \right]$$

Et à la fin on aura :

$$Z = f(z) = \frac{a[(z+a)^p - (z-a)^p]}{(z+a)^p + (z-a)^p} \quad (\text{III - 7})$$

$$\frac{dZ}{dz} = f'(z) = \frac{4pa^2[(z+a)^p - (z-a)^p]^{p-1}}{[(z+a)^p + (z-a)^p]^2} \quad (\text{III - 8})$$

Et les deux points singuliers seront :

$$z = a \quad \text{et} \quad z = -a$$

3.2.2. Equations paramétriques :

$$\text{On a: } Z \left[1 - \left(\frac{z-a}{z+a} \right)^p \right] = a \left[1 + \left(\frac{z-a}{z+a} \right)^p \right] \quad \text{(III - 9)}$$

$$\text{Ce qui donne: } Z = f(z) = \frac{a \left[1 + \left(\frac{z-a}{z+a} \right)^p \right]}{1 - \left(\frac{z-a}{z+a} \right)^p} \quad \text{(III - 10)}$$

On pose :

$$Z_1 = X_1 + iY_1 = \frac{z-a}{z+a} = \frac{(x-a)+iy}{(x+a)+iy} \quad \text{(III - 11)}$$

$$X_1 = R_1 \cos \alpha_1 \quad \text{avec : } R_1 = |Z_1|$$

$$Y_1 = R_1 \sin \alpha_1 \quad \alpha_1 = \arg(Z_1)$$

$$Z_2 = X_2 + iY_2 = Z_1^p \quad \text{(III - 12)}$$

$$X_2 = R_2 \cos \alpha_2 \quad \text{avec : } R_2 = |Z_1|^p$$

$$Y_2 = R_2 \sin \beta_2 \quad \alpha_2 = p \alpha_1$$

$$Z_3 = X_3 + iY_3 = \frac{1+Z_2}{1-Z_2} \quad \text{(III - 13)}$$

$$X_3 = R_3 \cos \alpha_3 \quad \text{avec : } R_3 = |Z_1|^p$$

$$Y_3 = R_3 \sin \alpha_3 \quad \beta_1 = \arg(Z_3)$$

$$Z = a.Z_3 \quad \text{alors} \quad X = a.X_3 \quad \text{et} \quad Y = a.Y_3$$

3.3. Transformation de VON-MISES :

Dans cette transformation les points singuliers sont définis pour $\frac{dZ}{dz} = 0$ et pour les trouver on doit résoudre le polynôme complexe d'ordre 4.

$$z^2 + a^2z^2 - 4a^2z - 9a^2 = 0$$

Donc il faut trouver 4 points singuliers.

3.3.2. Equations paramétriques :

$$\text{On a : } \begin{cases} x = x_0 + R\cos\beta \\ y = y_0 + R\sin\beta \end{cases}$$

$$X = \frac{1}{2} \left[x + \frac{a^2x}{x^2 + y^2} + \frac{2a^2(x^2 - y^2)}{(x^2 + y^2)^2} + \frac{3a^2(x^3 - 3xy^2)}{(x^2 + y^2)^3} \right] \quad (\text{III - 14})$$

$$Y = \frac{1}{2} \left[y - \frac{a^2y}{x^2 + y^2} - \frac{4a^2xy}{(x^2 + y^2)^2} - \frac{3a^2(y^3 - 3xy^2)}{(x^2 + y^2)^3} \right] \quad (\text{III - 15})$$

On remplace x et y par leur valeur on aura :

$$\begin{aligned} X = & \frac{1}{2} \left[(x_0 + R\cos\alpha) + a^2 \frac{(x_0 + R\cos\alpha)}{(x_0 + R\cos\alpha)^2 + (y_0 + R\sin\alpha)^2} + \right. \\ & 2a^2 \frac{[(x_0 + R\cos\alpha)^2 - (y_0 + R\sin\alpha)^2]}{[(x_0 + R\cos\alpha)^2 + (y_0 + R\sin\alpha)^2]^2} + \\ & \left. 3a^2 \frac{[(x_0 + R\cos\alpha)^3 - 3(x_0 + R\cos\alpha)(y_0 + R\sin\alpha)^2]}{[(x_0 + R\cos\alpha)^2 + (y_0 + R\sin\alpha)^2]^3} \right] \quad (\text{III - 16}) \end{aligned}$$

$$Y = \frac{1}{2} \left[y_0 + R\sin\beta - a^2 \frac{(y_0 + R\sin\beta)}{(x_0 + R\cos\beta)^2 + (y_0 + R\sin\beta)^2} - \right. \quad (\text{III - 17})$$

$$\left. \frac{4a^2(x_0 + R\cos\beta)(y_0 + R\sin\beta)}{[(x_0 + R\cos\beta)^2 + (y_0 + R\sin\beta)^2]^2} - 3a^2 \frac{[(y_0 + R\sin\beta)^3 - 3(x_0 + R\cos\beta)(y_0 + R\sin\beta)^2]}{[(x_0 + R\cos\beta)^2 + (y_0 + R\sin\beta)^2]^3} \right]$$

4. Equation de conservation de la quantité de mouvement:

Soit \vec{P} la quantité de mouvement d'un fluide animé d'une vitesse \vec{V} tel que :

$$\vec{P} = m\vec{V} \quad (\text{III - 18})$$

On dit que la quantité de mouvement est conservée lorsque :

$$\frac{d\vec{P}}{dt} = \vec{0} \quad (\text{III - 19})$$

Alors :

$$\frac{dm\vec{V}}{dt} = \vec{0} \quad (\text{III - 20})$$

Et si la masse est conservée $m = c^t$:

$$m \frac{d\vec{V}}{dt} + \vec{V} \frac{dm}{dt} = \vec{0} \quad (\text{III - 21})$$

$$m \frac{d\vec{V}}{dt} = \vec{0}$$

La loi fondamentale de la dynamique s'écrit comme suit :

$$\sum \vec{F}_{ext} = m\vec{\gamma} \quad (\text{III - 22})$$

Avec :

$$\frac{d\vec{V}}{dt} = \vec{\gamma} \quad (\text{III - 23})$$

Où : $\vec{\gamma}$: Accélération du fluide.

\vec{F}_{ext} : Forces extérieurs exerçant sur le fluide.

Les forces exerçant :

Force de pression :

$$\vec{F}_p = -\overrightarrow{\text{grad}P} d\tau \quad (\text{III - 24})$$

Force de volume :

$$\vec{F}_V = \rho V \vec{F}_m \quad (\text{III - 25})$$

Force de viscosité :

$$\vec{F}_\nu = \nu \Delta \vec{V} \quad (\text{III - 26})$$

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = -\frac{1}{\rho} \overrightarrow{\text{grad}P} + \vec{F}_m + \nu \Delta \vec{V} \quad (\text{III - 27})$$

Ce qui nous ramène au système d'équations de Navier-Stockes :

$$\frac{du}{dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{dP}{dx} + F_{m_x} + \nu \Delta \vec{V}$$

$$\frac{dv}{dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{dP}{dy} + F_{m_y} + \nu \Delta \vec{V} \quad (\text{III - 28})$$

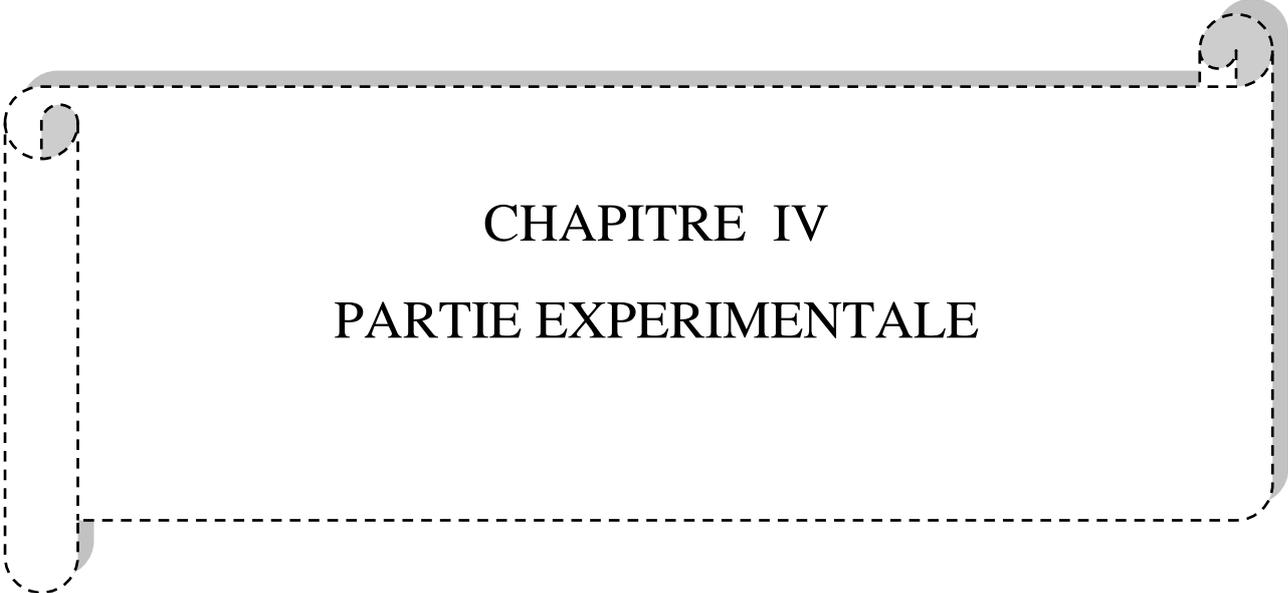
$$\frac{dw}{dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{dP}{dz} + F_{m_z} + \nu \Delta \vec{V}$$

5. Equation de BERNOULLI:

Pour un fluide incompressible en régime stationnaire la loi de BERNOULLI est donné par :

$$P + \frac{\rho V^2}{2} + \rho g z + P_{erte} = C^{te} \quad (\text{III - 29})$$

P_{erte} : Pertes de charges.



CHAPITRE IV
PARTIE EXPERIMENTALE

❖ **Travail réalisé :**

Notre travail consiste d'appliquer la transformation conforme sur cercle de rayon $R=22\text{mm}$ en un profil d'aile.

Ce profil est symétrique (pas de cambrure) d'épaisseur $e=9.46\text{mm}$ et de longueur de $a=80\text{mm}$. Le type de transformation utilisée dans ce travail est celle de **Joukowski**.

Avec $x_0=2\text{mm}$ $y_0=0\text{mm}$

$$X = \frac{1}{2} (x_0 + R \cos\alpha) \left[1 + \frac{a^2}{(x_0 + R \cos\alpha)^2 + (y_0 + R \sin\alpha)^2} \right]$$

$$Y = \frac{1}{2} (y_0 + R \sin\alpha) \left[1 - \frac{a^2}{(x_0 + R \cos\alpha)^2 + (y_0 + R \sin\alpha)^2} \right]$$

En faisant varier α de 0° à 360° on aura le tableau suivant :

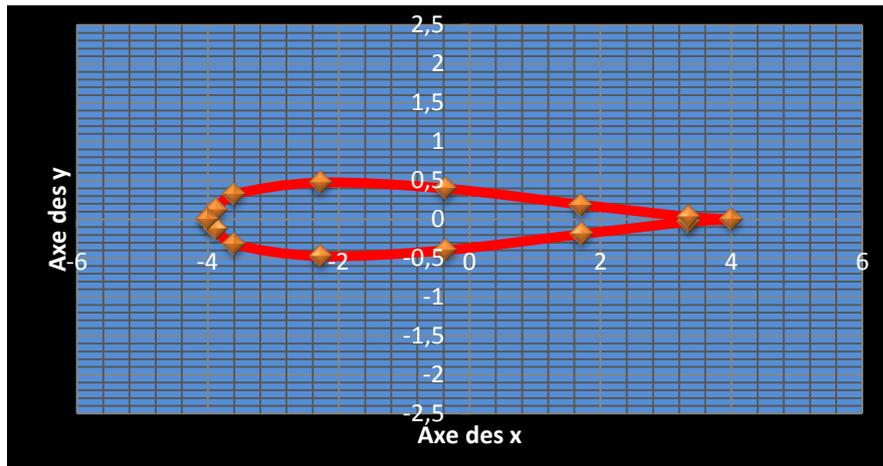
CHAPITRE IV

PARTIE EXPERIMENTALE

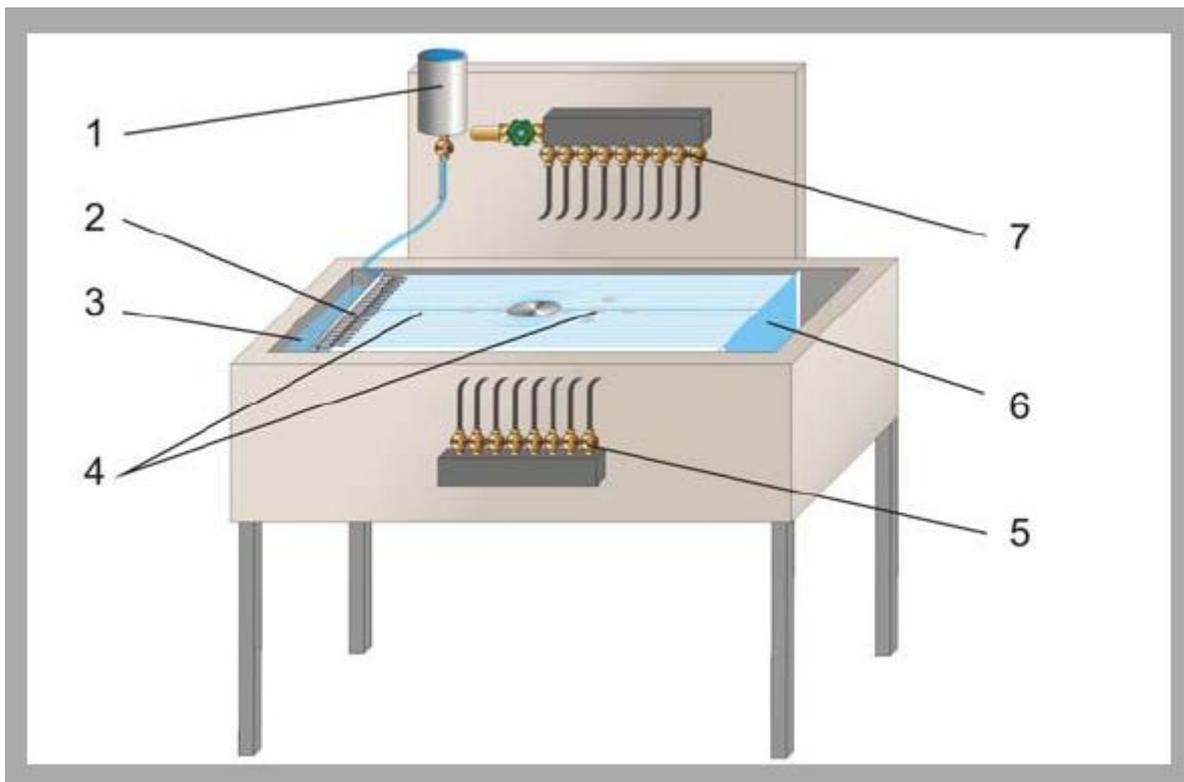
α	X(cm)	Y(cm)
0	4	0
10	3,874	0,116
30	3,598	0,32
60	2,277	0,473
90	0,364	0,396
120	-1,711	0,189
150	-3,361	0,031
180	-4	0
210	-3,361	-0,031
240	-1,701	-0,189
270	0,364	-0,396
300	2,277	-0,473
330	3,598	-0,32
350	3,874	-0,116
360	4	0

Tableau(IV-1)

CHAPITRE IV
PARTIE EXPERIMENTALE



Ensuite place ce profil dans un appareil de visualisation des lignes de courant, il s'agit de banc d'essai :



Figure(IV-1) :le banc d'essai.

1 :Produit de contraste(encre de couleur bleue).

2 :Tubes d'injection de l'encre.

CHAPITRE IV

PARTIE EXPERIMENTALE

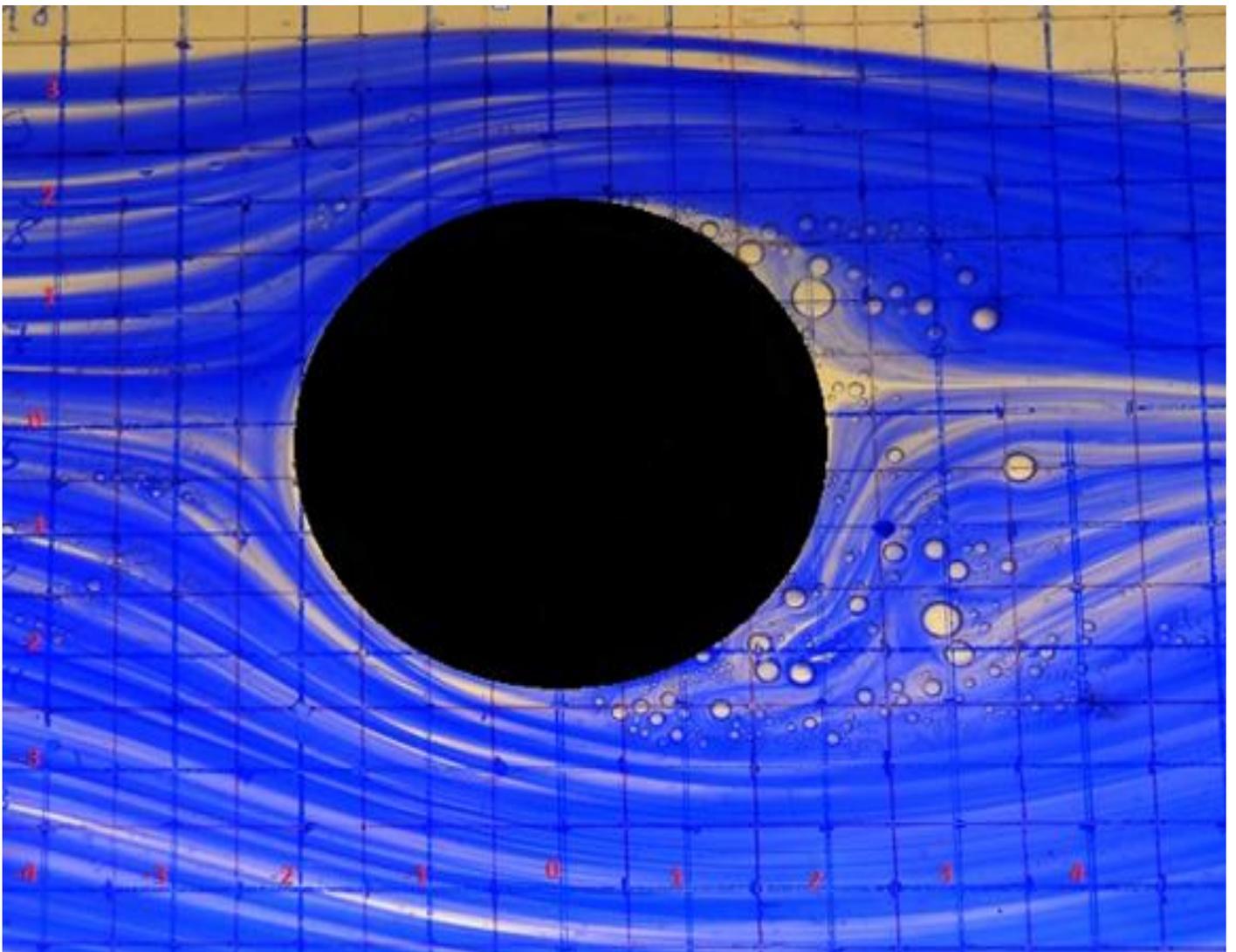
3 : Arrivée d'eau.

4 : Deux plaques en verre de 5mm d'épaisseur.

5 : Soupapes pour puits.

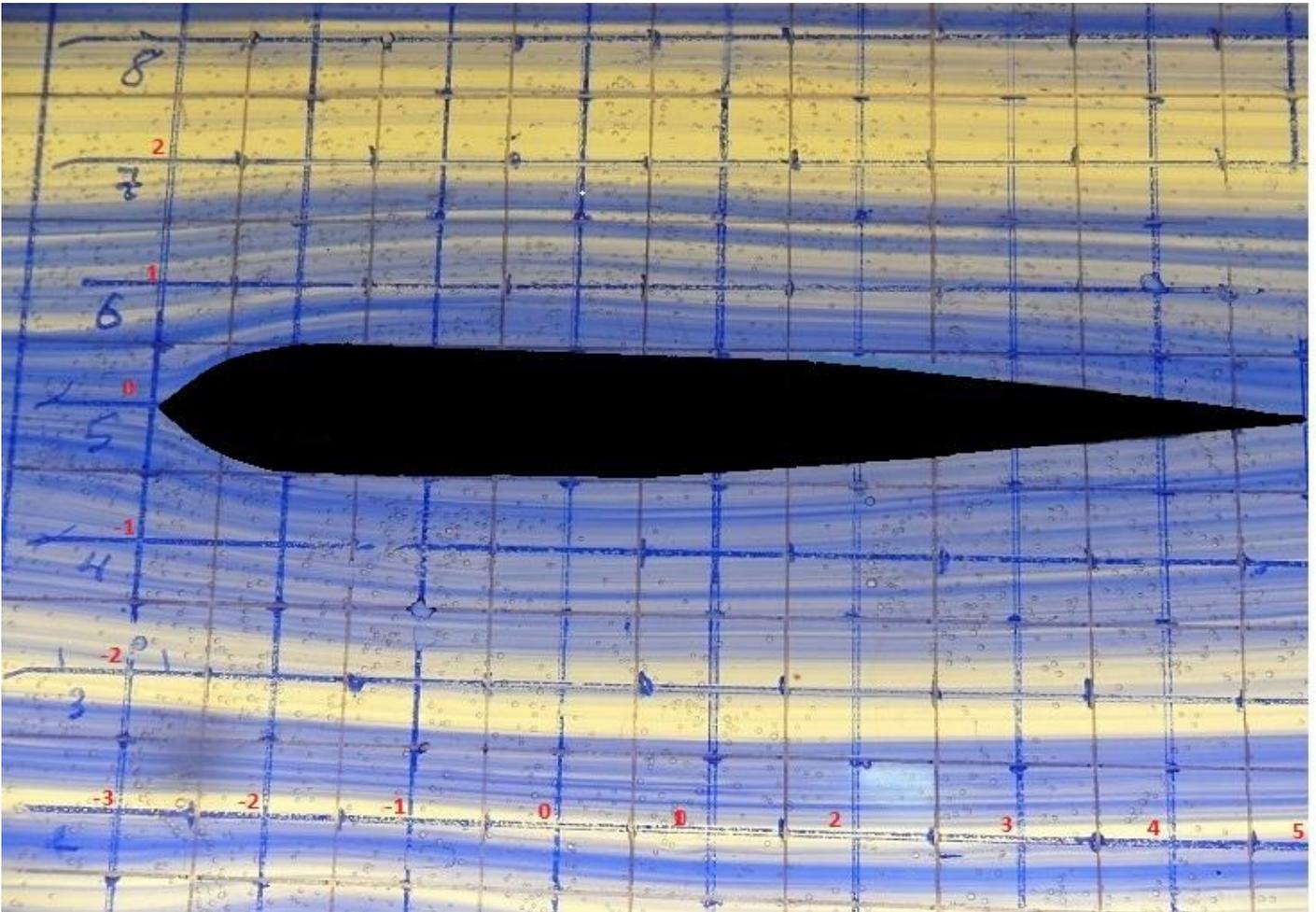
6 : Sortie d'eau .

7 : Soupapes pour sources.



Figure(IV-2) :Visualisation des lignes de courant autour d'un cercle.

CHAPITRE IV
PARTIE EXPERIMENTALE



Figure(IV-3) : Visualisation des lignes de courant autour d'un profil symétrique.

Ensuite à l'aide des paramètres ci-dessous on calcul trois nombres de Renolds :

$$T = 20C^{\circ}$$

$$\mu = 1.002 \times 10^{-3} \text{ P.s}$$

$$\rho = 10^3 \text{ Kg /M}^3$$

$$S = 4.275 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$P_m = 57.3 \times 10^{-3} \text{ m}$$

CHAPITRE IV

PARTIE EXPERIMENTALE

$$\text{Re} = \frac{\rho L V}{\mu}$$

Avec : $L = \frac{4S}{P_m}$; P_m : Est le périmètre mouillé

S : Est la section de passage

L : Longueur caractéristique (de référence)

Donc :

$$\text{Re} = \frac{4\rho S V}{\mu P_m}$$

Enfin avec le débit massique $Q_m = \rho S V$ on aura:

$$\text{Re} = \frac{4Q_m}{\mu P_m}$$

On a aussi $Q_m = \frac{V_l}{t}$

t : Temps calculé à l'aide d'un chronomètre.

V_l : Volume d'eau récupéré durant l'instant (t).

V : Vitesse d'écoulement.

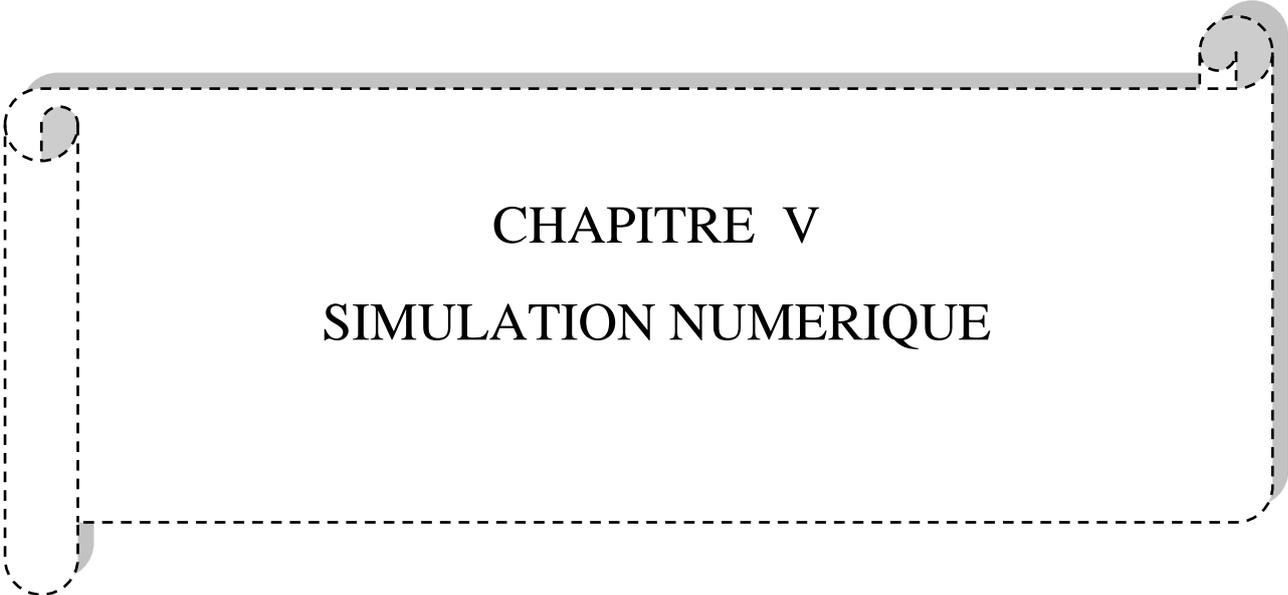
Maintenant on peut calculer trois valeurs de Reynolds en faisant varier le débit massique Q_m et on aura le tableau suivant:

CHAPITRE IV

PARTIE EXPERIMENTALE

t (s)	$V_l(L)$	Q_m (Kg/S)	Re	V (m/s)
35	0.78	0.022	153.50	0.051
11.39	0.78	0.068	477.10	0.159
6.39	0.80	0.125	872.22	0.291

Tableau(IV-2) : valeurs de la vitesse en fonction de Nombre de Reynolds.



CHAPITRE V
SIMULATION NUMERIQUE

1. Introduction :

Dans cette partie du travail, en utilisant le logiciel de simulation numérique d'écoulements de fluides **Fluent**, nous allons présenter les résultats obtenus pour l'écoulement autour d'un profil d'aile de **JOUKOWSKI** qui est fixe et symétrique. Nous nous intéresserons à l'évolution de la vitesse et de pression ainsi que les lignes de courant pour trois valeurs de Reynolds en régime laminaire.

2. Logiciel utilisé :

Pour réaliser nos simulations on fait appel au logiciel de simulation **Fluent**.

Ce type de logiciel a plusieurs applications dans différents domaines et parmi ces domaines l'écoulement autour des obstacles.

Ce logiciel est un solveur, car le maillage du système étudié doit être réalisé en utilisant un mailleur comme **GAMBIT**.

2.1. Création et définition de la géométrie sous GAMBIT :

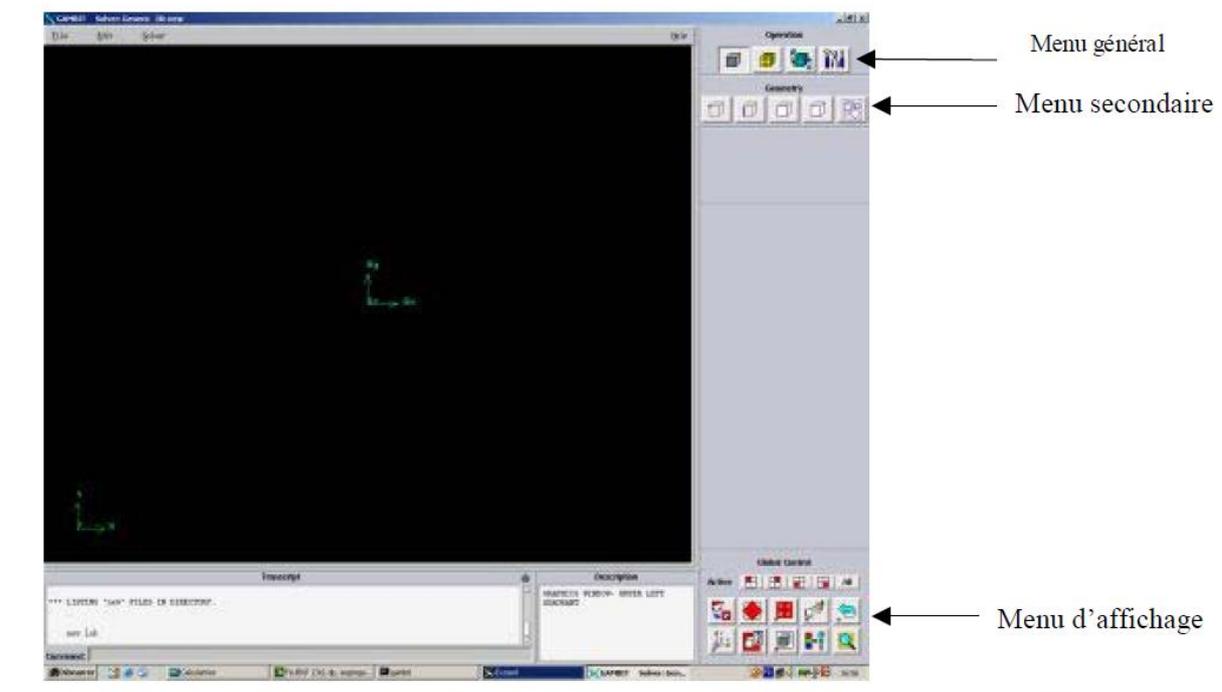


Figure (V-1) : Interface GAMBIT

CHAPITRE V
SIMULATIONS NUMERIQUES

❖ Le menu général et le menu secondaire :

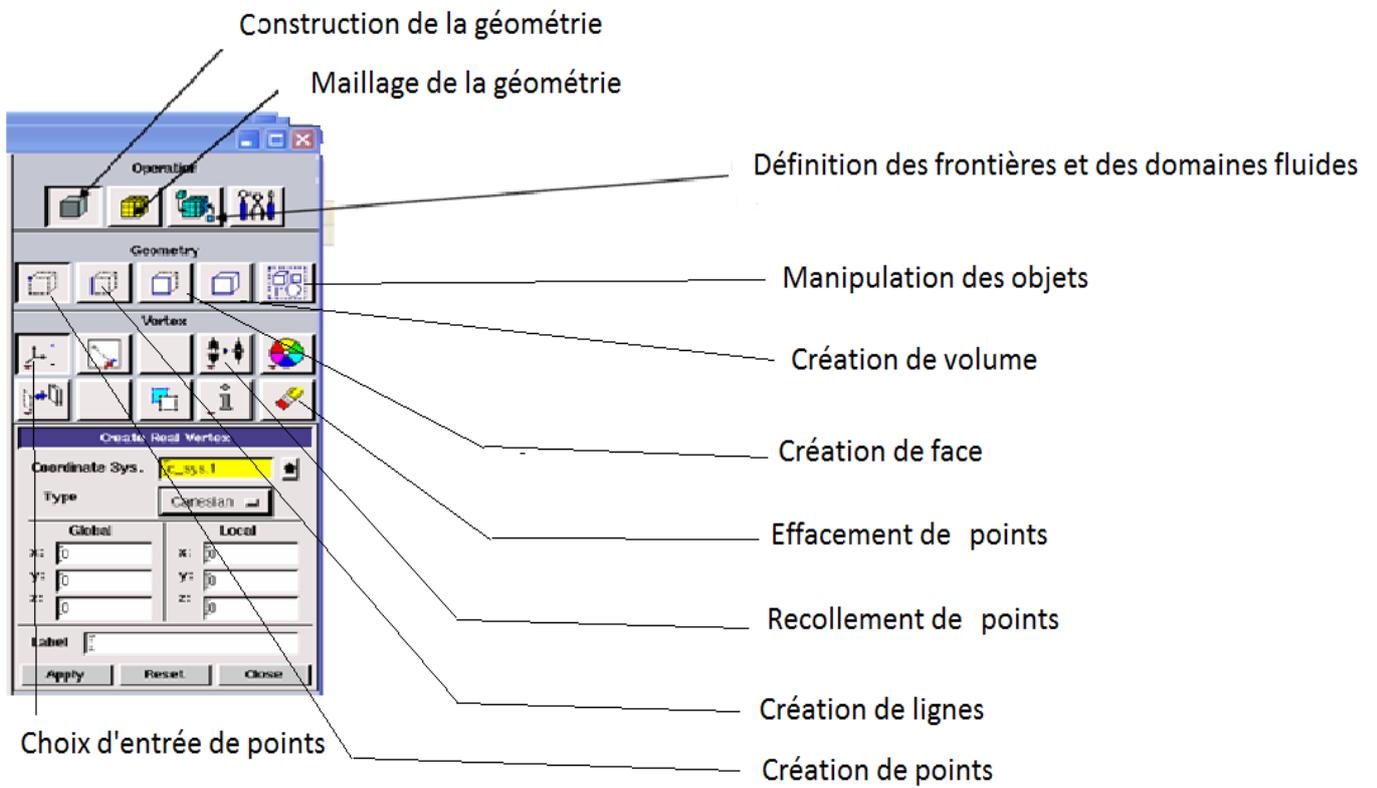


Figure (V-2) : Interface menu général et menu secondaire

❖ Le menu d'affichage :

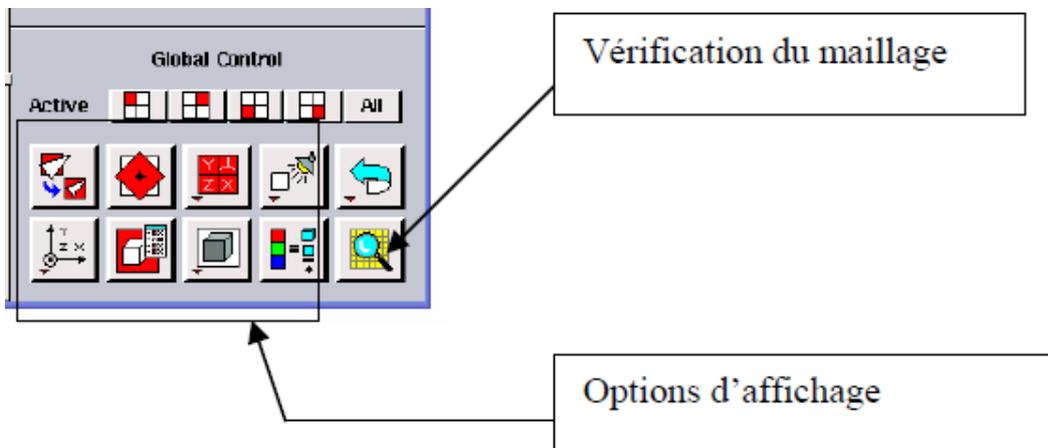


Figure (V-3) : Interface menu d'affichage

CHAPITRE V

SIMULATIONS NUMERIQUES

❖ Exportation de la géométrie :

Une fois notre géométrie est créée ainsi que les conditions aux limites sont définies, on exporte la géométrie à fluent :

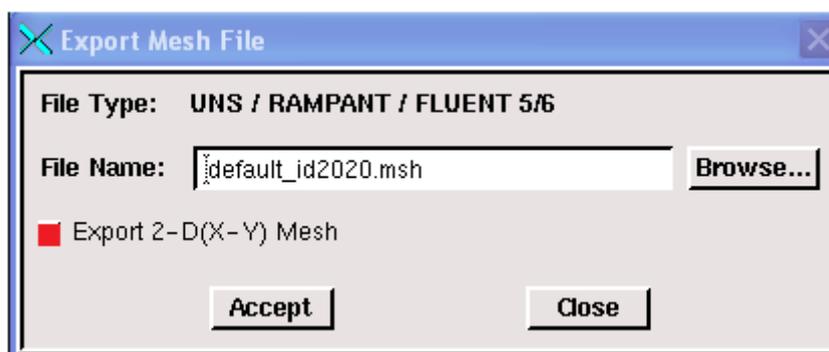
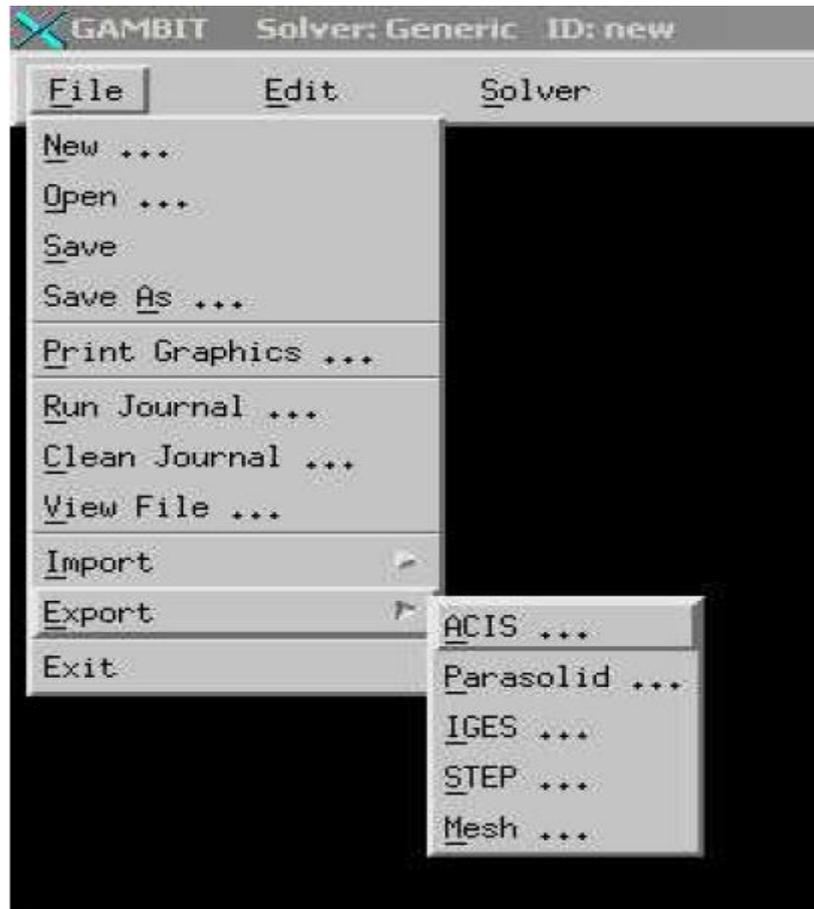


Figure (V-4) : interface exportation de la géométrie

2.2. La simulation sous FLUENT :

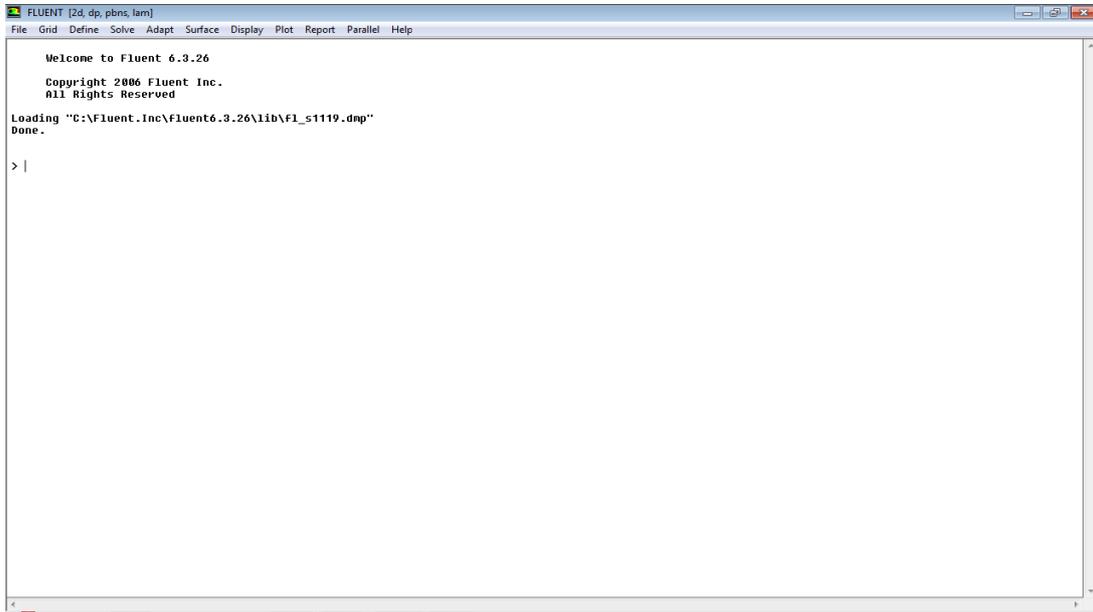


Figure (V-5) : Interface FLUENT

❖ Importation de la géométrie :

Pour commencer la simulation il faut importer le fichier généré sous Gambit.

File → **Read** → **Case**

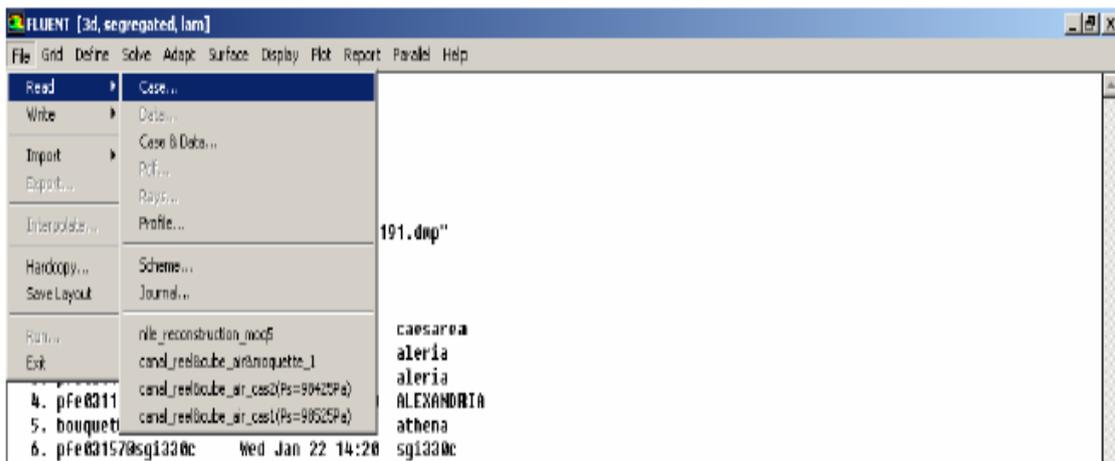


Figure (V-6) : Interface pour l'importation et lecture des fichiers

CHAPITRE V

SIMULATIONS NUMERIQUES

❖ Vérification de la géométrie importée :

Ceci permet de vérifier si le maillage importé ne contient pas d'erreurs .

Grid → Check

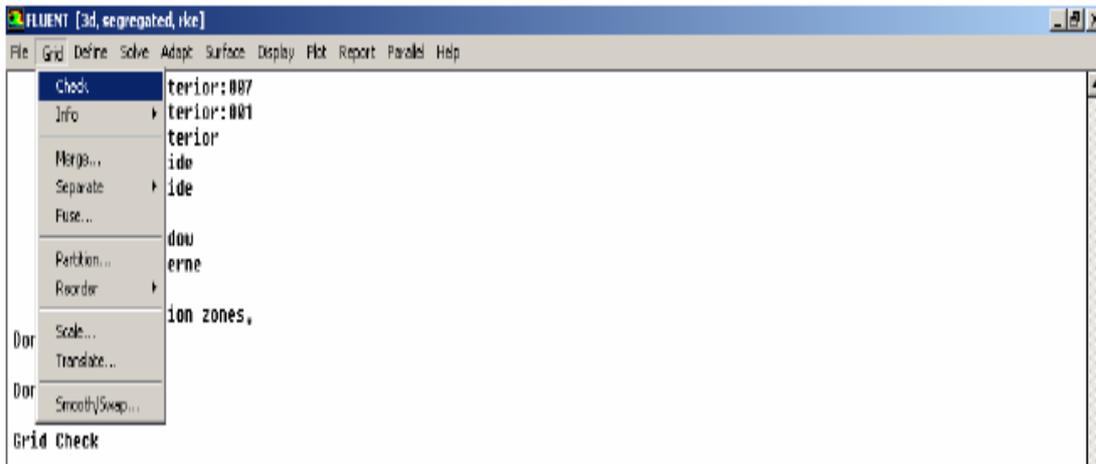


Figure (V-7) : Interface pour vérification de la géométrie importée

❖ Vérification de l'échelle :

Il faut toujours vérifier que les dimensions affichées correspondent aux dimensions physiques du problème.

Grid → Scale

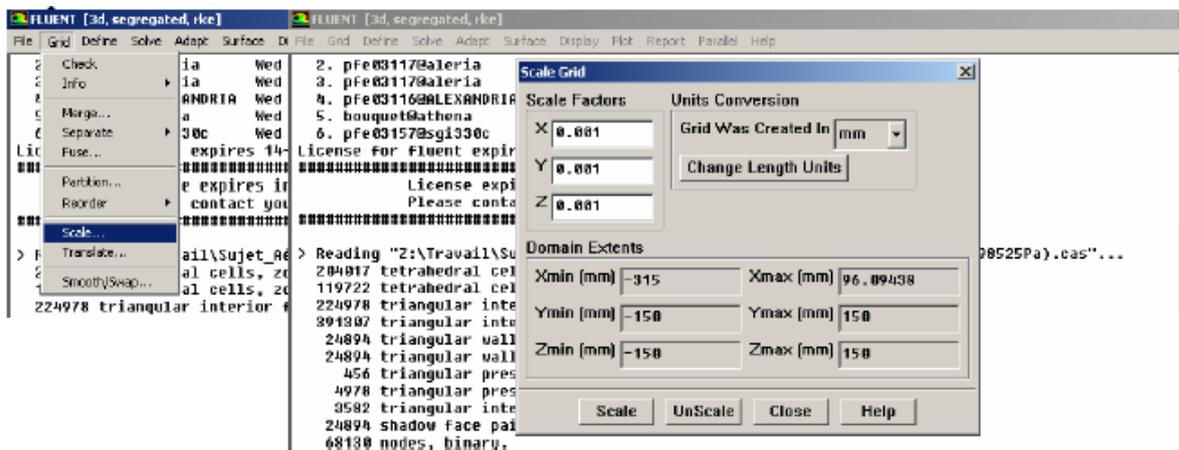


Figure (V-8) : Interface pour vérification de l'échelle

❖ **Choix du solveur :**

Ceci nous permet de choisir la nature de l'écoulement (stationnaire ou instationnaire), et les différents aspects du problème (dimension de l'écoulement, 2D ou 3D)

Define → **Models** → **Solver**

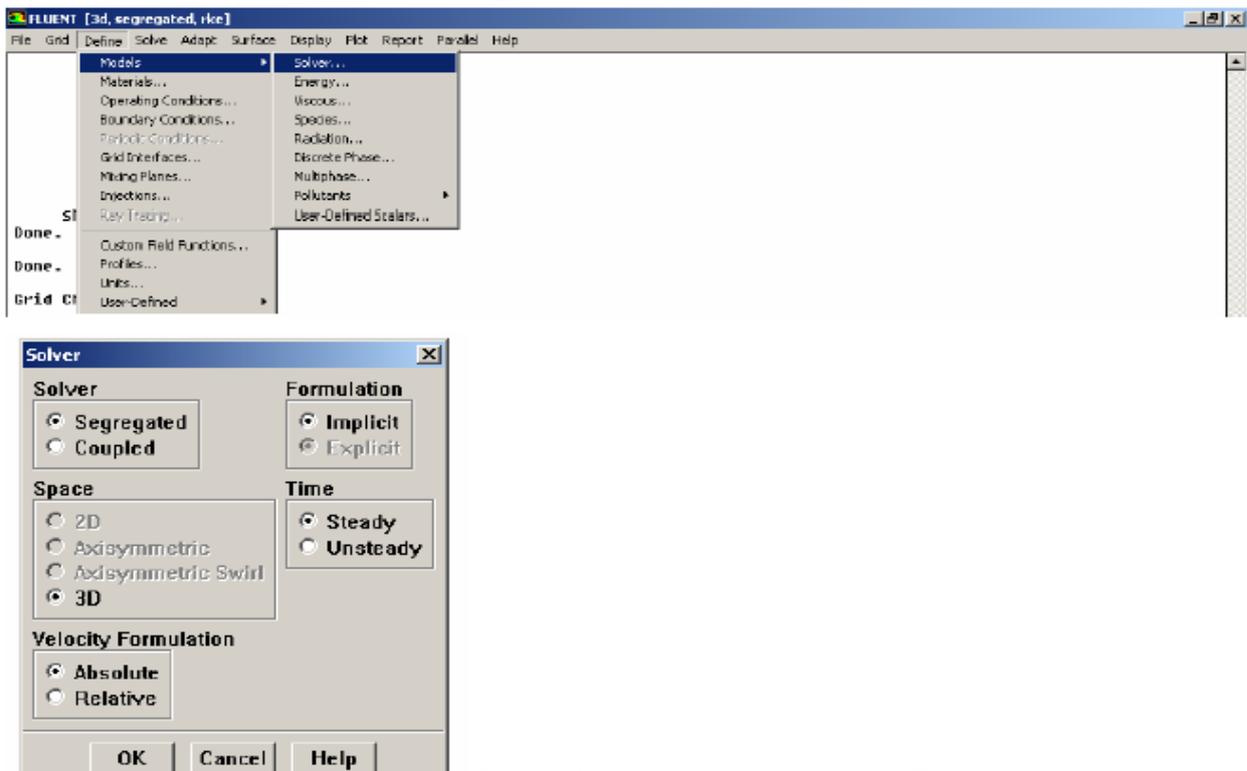


Figure (V-9) : Interface choix du solveur sous fluent

❖ **Choix du régime d'écoulement :**

Fluent propose différentes modélisations de l'écoulement et afin de sélectionner le type de d'écoulement il suffit d'activer les commandes suivantes :

Define → Models → Viscous → laminar

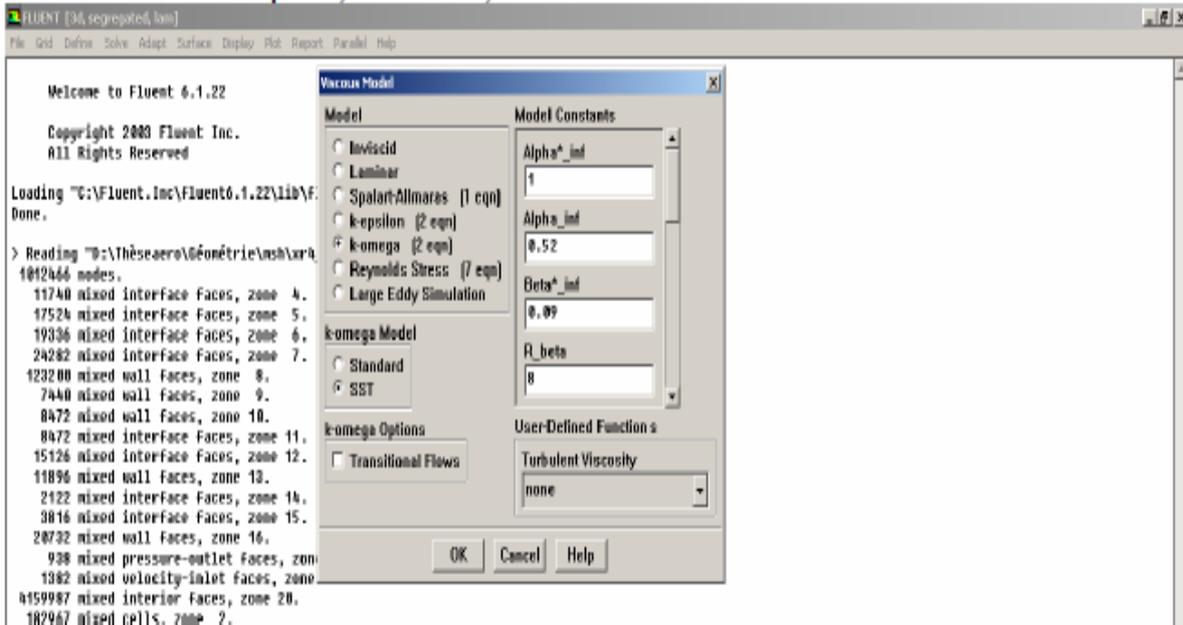


Figure (V-10) : Interface définition du régime d'écoulement

❖ Définition des caractéristiques du fluide :

Les caractéristiques du fluide sont chargées à partir de la bibliothèque de données de Fluent. Cette étape du logiciel nous permet de sélectionner les matériaux requis pour la simulation ceci peut se faire en sélectionnant les matériaux déjà présents dans la base de données du solveur.

Define → Materials

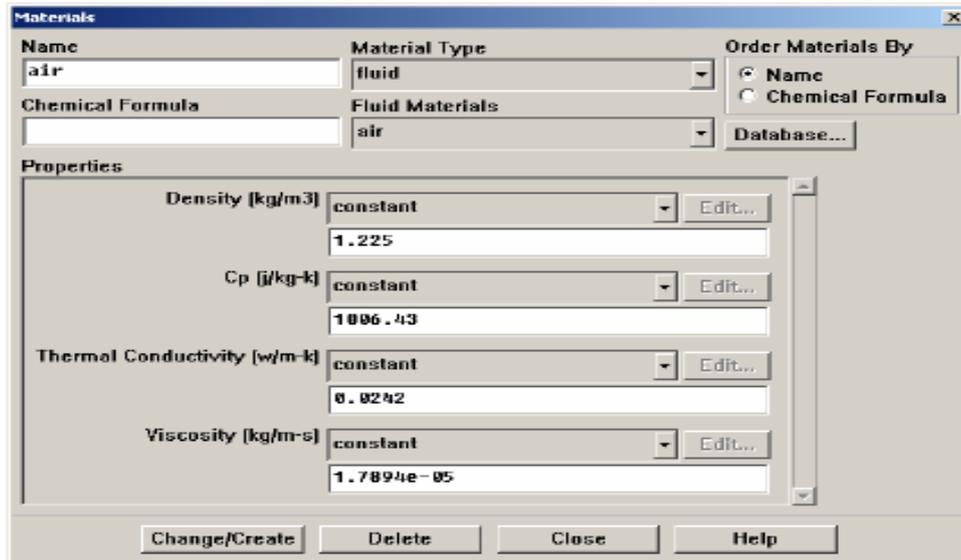


Figure (V-11) : Interface définition caractéristique du fluide

❖ Les conditions opératoires :

Avant de choisir les conditions aux limites, il faut choisir d'abord la valeur de la pression de référence.

Define → Operating Condition

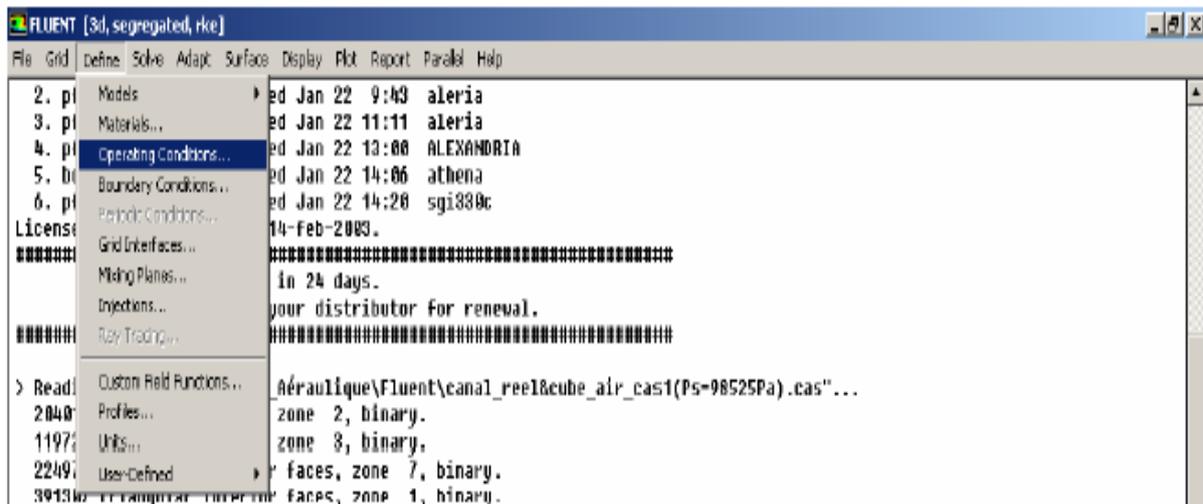
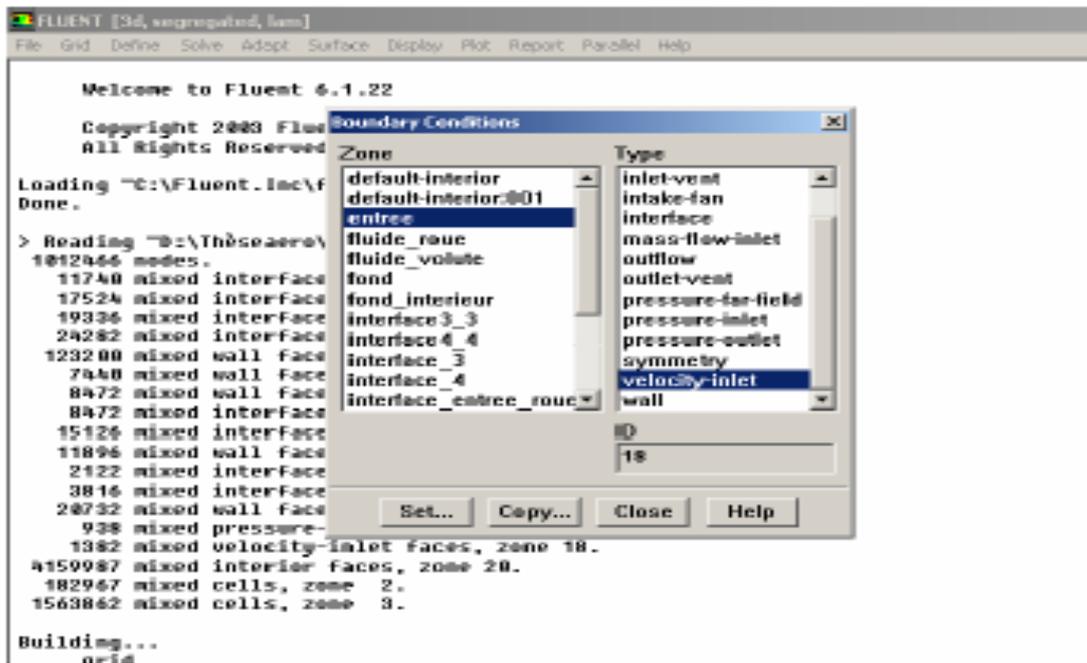


Figure (V-12) : Interface définition conditions opératoires

❖ Les conditions aux limites :

Le sous menu apparaît nous permet de fixer les limites du problème (la vitesse d'entrée, la température d'entrée...)

Define → boundary conditions



Et en cliquant sur **Set** on aura l'apparition de la fenêtre suivante :

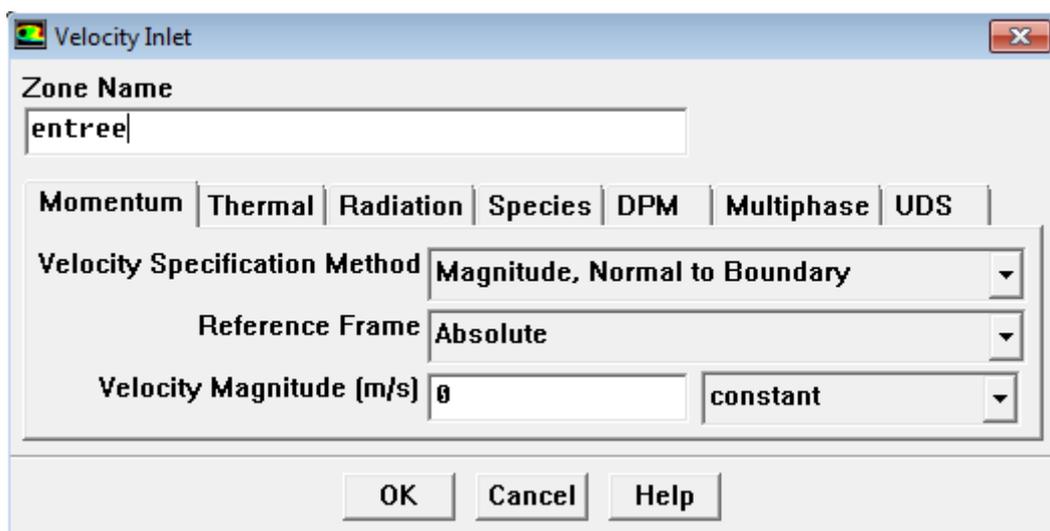


Figure (V-13) : Interface définition conditions aux limites

❖ **Choix des critères de convergence :**

Il s'agit de choisir les critères qui doivent être vérifiés pour que les calculs de la simulation s'arrêtent.

Solve → **Monitors** → **Residual**

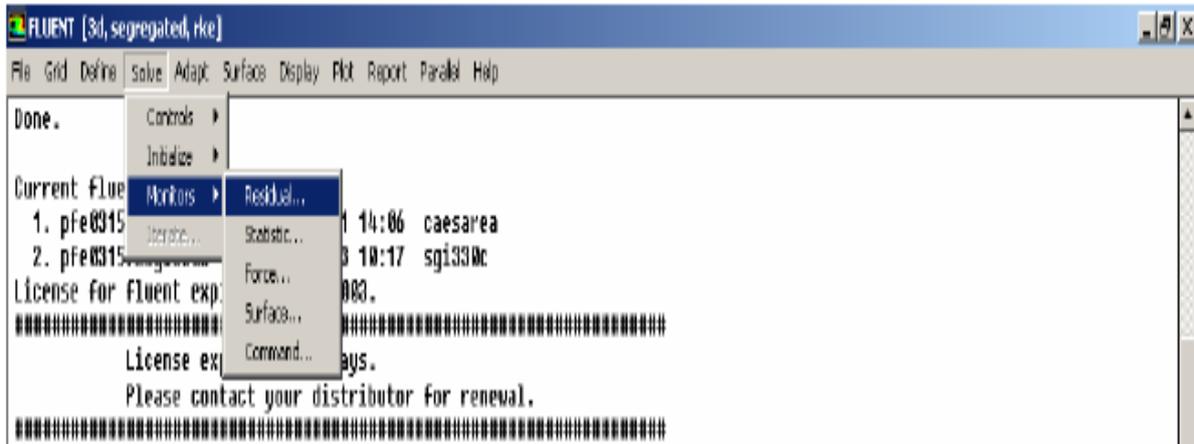


Figure (V-14) : Interface définition conditions aux limites

❖ **Lancement des calculs itératifs :**

Après l'initialisation, le calcul itératif est ensuite actionné par la commande suivante:

Solve → **Iterate**

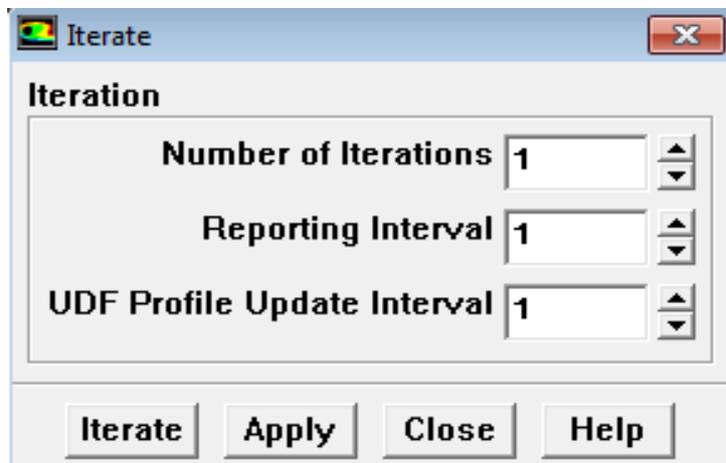


Figure (V-15) : Interface pour la commande Iterate

❖ **Affichage graphique :**

Les outils graphiques disponibles dans Fluent nous permettent de traiter l'information contenue dans notre solution et de visionner facilement les résultats. Les sections suivantes expliquent comment utiliser ces outils pour examiner notre solution :

Display —→ **plot**

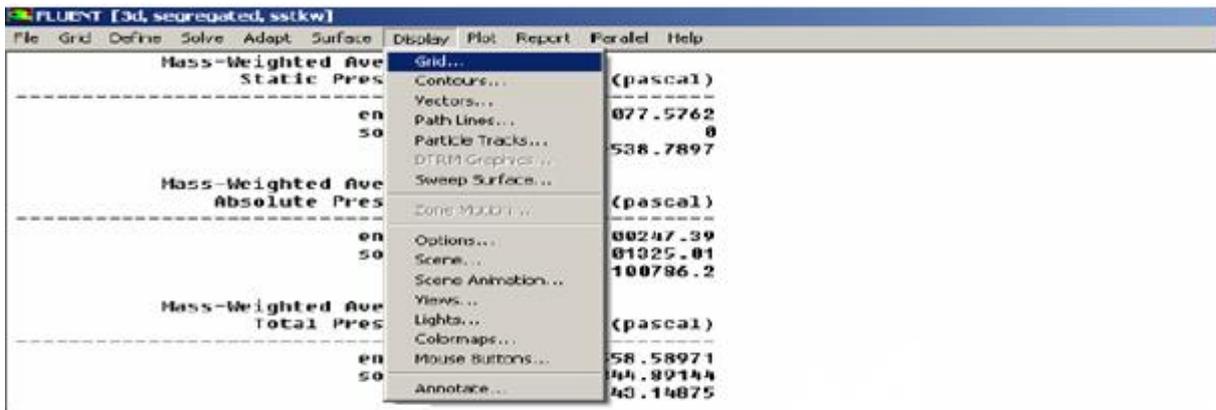


Figure (V-16) : Interface pour l'affichage graphique

Pour l'évolution des vecteurs vitesses :

Display —→ **Vectors**

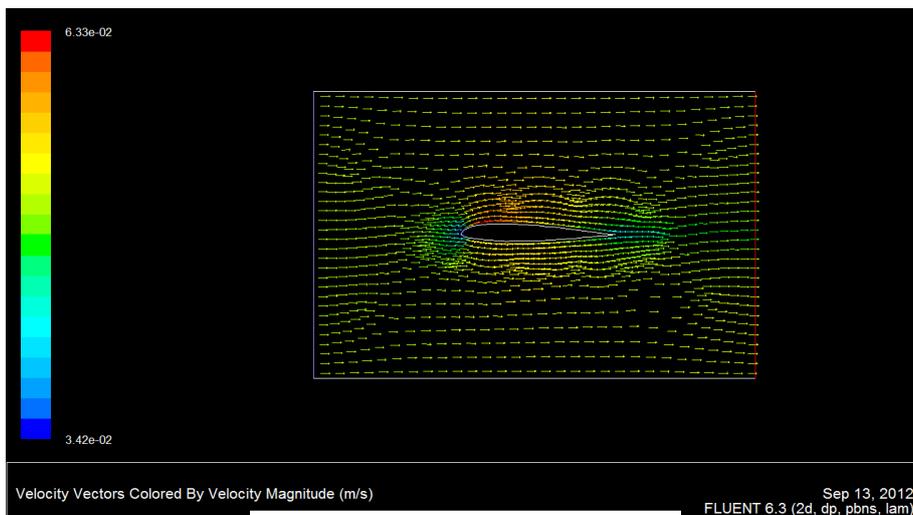


Figure (V-17) : Interface pour l'évolution des vecteurs vitesses

CHAPITRE V

SIMULATIONS NUMERIQUES

Display —————> **Contours**

Pour l'évolution de champ de vitesses :

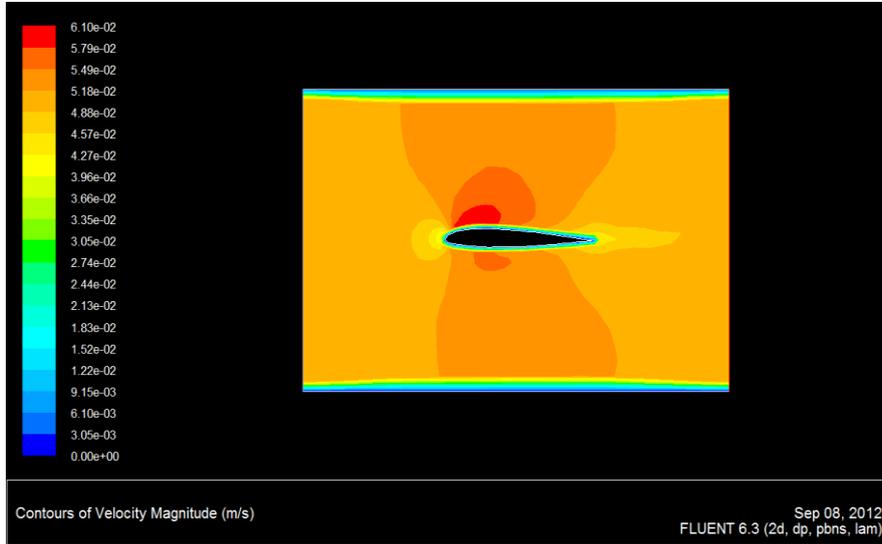


Figure (V-18) : Interface pour l'évolution de champ de vitesses

Pour l'évolution de champ la pression :

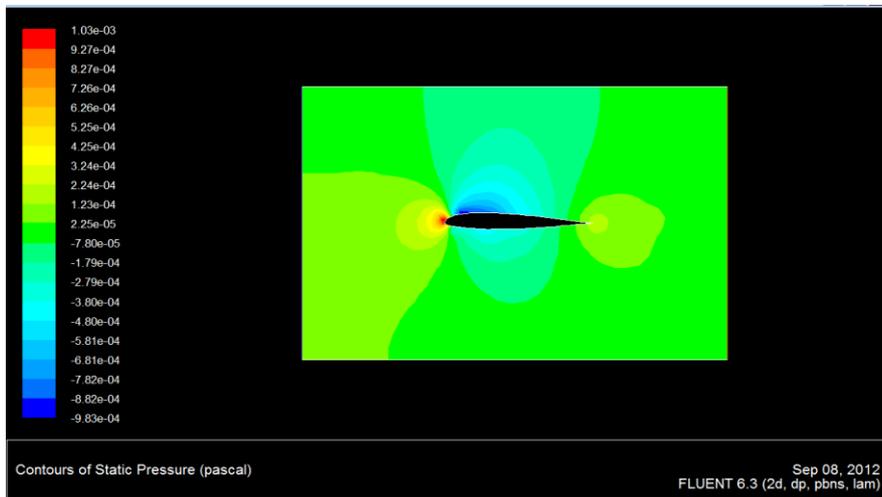


Figure (V-19) : Interface pour l'évolution de champ de pressions

Pour l'évolution des lignes de courant :

Display → Pathlines

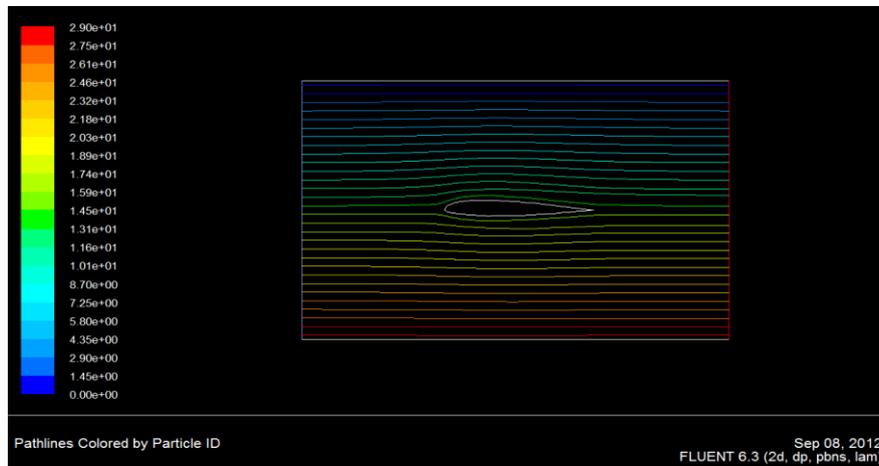


Figure (V-20) : Interface pour l'évolution des lignes de courant

Pour les courbes d'évolution de la vitesse et de la pression et d'autres paramètres on click sur les icônes suivantes:

Display → X Y Plot

3. Résultats de la simulation pour $Re = 153.50$:

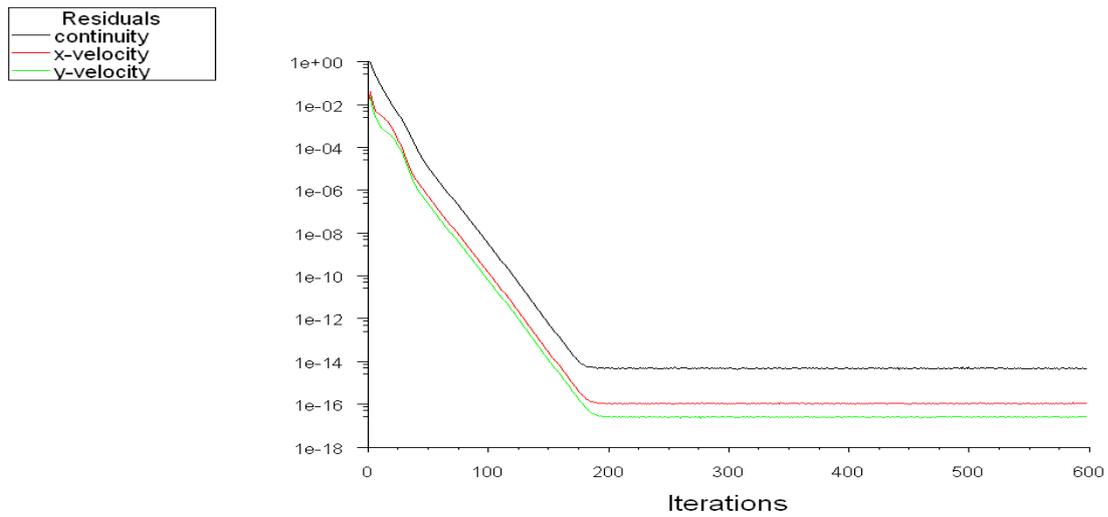
Dans cette partie du travail, nous faisons une simulation de l'écoulement d'un fluide incompressible autour d'un profil symétrique en régime laminaire avec $Re=153.50$.

❖ Courbe de convergence des résidus :

La figure ci-après montre la convergence des résidus pour l'équation de continuité et les composantes de la vitesse suivant x et y.

CHAPITRE V

SIMULATIONS NUMERIQUES

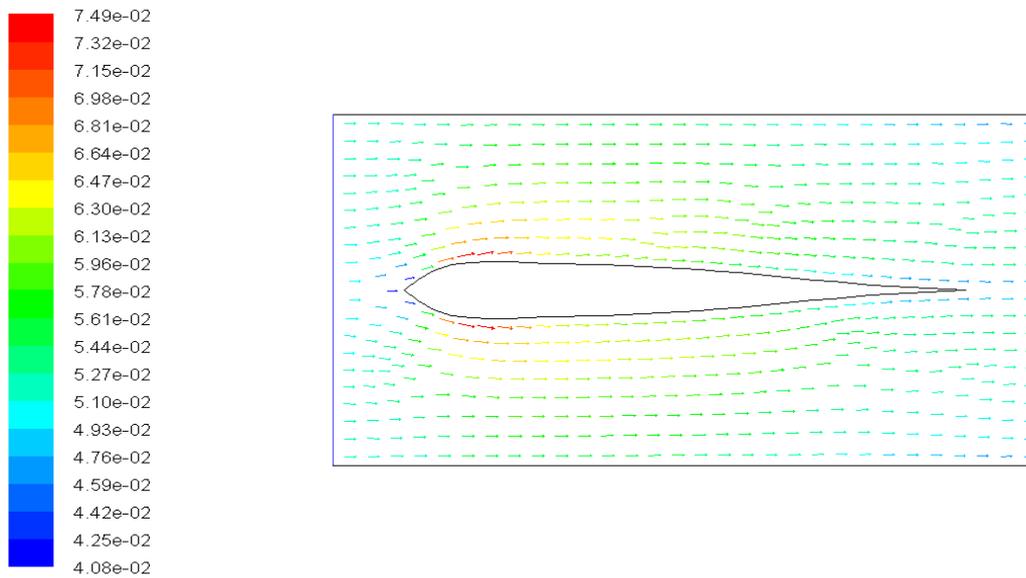


Scaled Residuals

Sep 18, 2012
FLUENT 6.3 (2d, dp, pbns, lam)

Figure (V-21) : Courbe de convergence des résidus

❖ Orientation des vecteurs vitesses autour de profil :



Velocity Vectors Colored By Velocity Magnitude (m/s)

Sep 18, 2012
FLUENT 6.3 (2d, dp, pbns, lam)

Figure (V-22) : Orientation des vecteurs vitesses

❖ **Distribution de la pression autour du profil :**

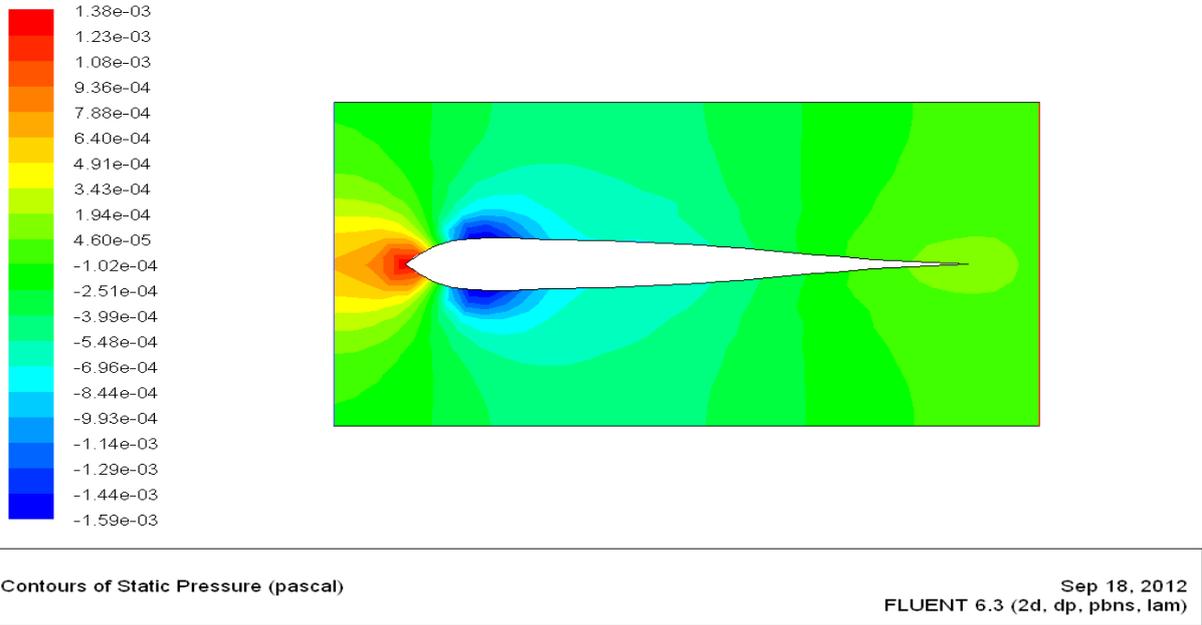


Figure (V-23) : Distribution de la pression autour du profil

❖ **Distribution de vitesses autour du profil :**

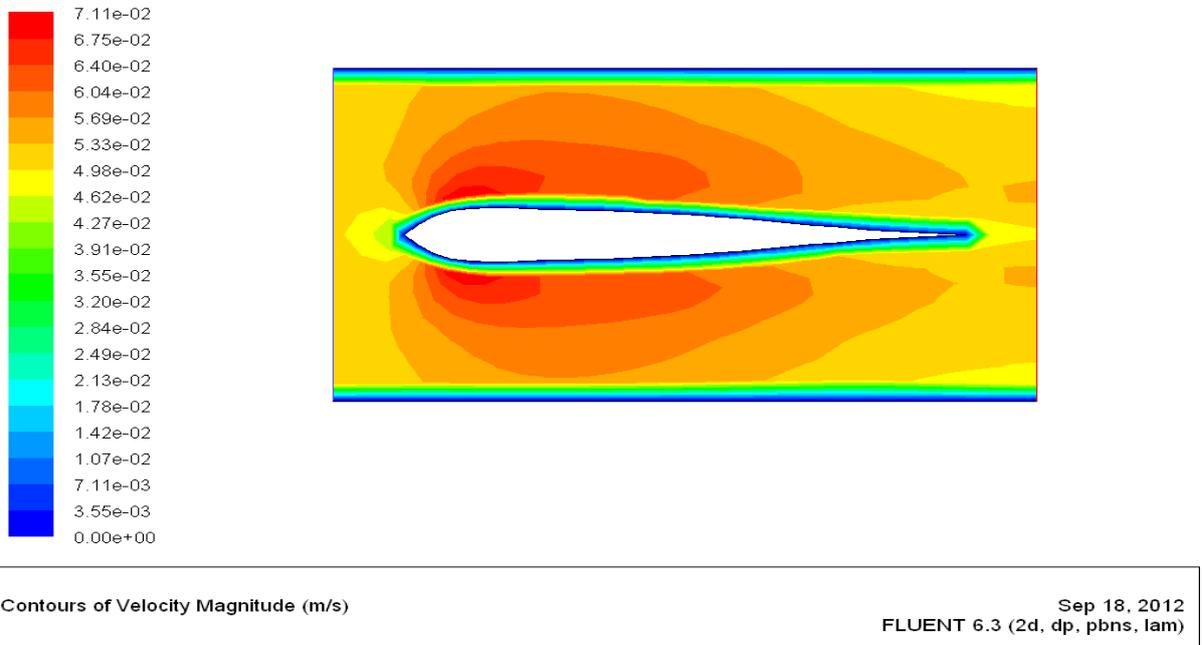
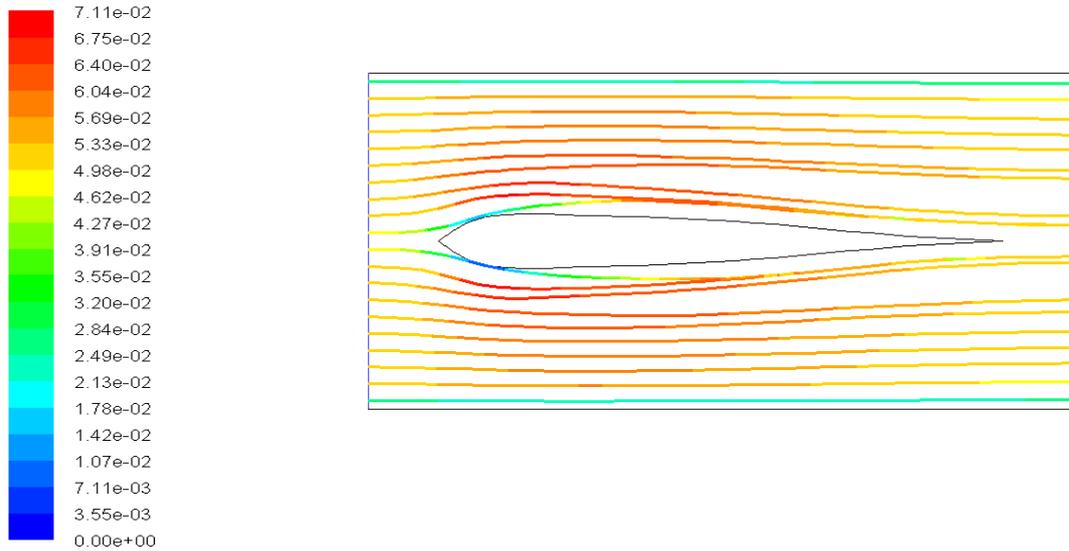


Figure (V-24): Distribution de vitesses autour du profil

❖ Lignes de courant autour du profil :



Pathlines Colored by Velocity Magnitude (m/s)

Sep 18, 2012
FLUENT 6.3 (2d, dp, pbns, lam)

Figure (V-25) : lignes du courant autour du profil

❖ Lignes d'évolution de la vitesse et de la pression :

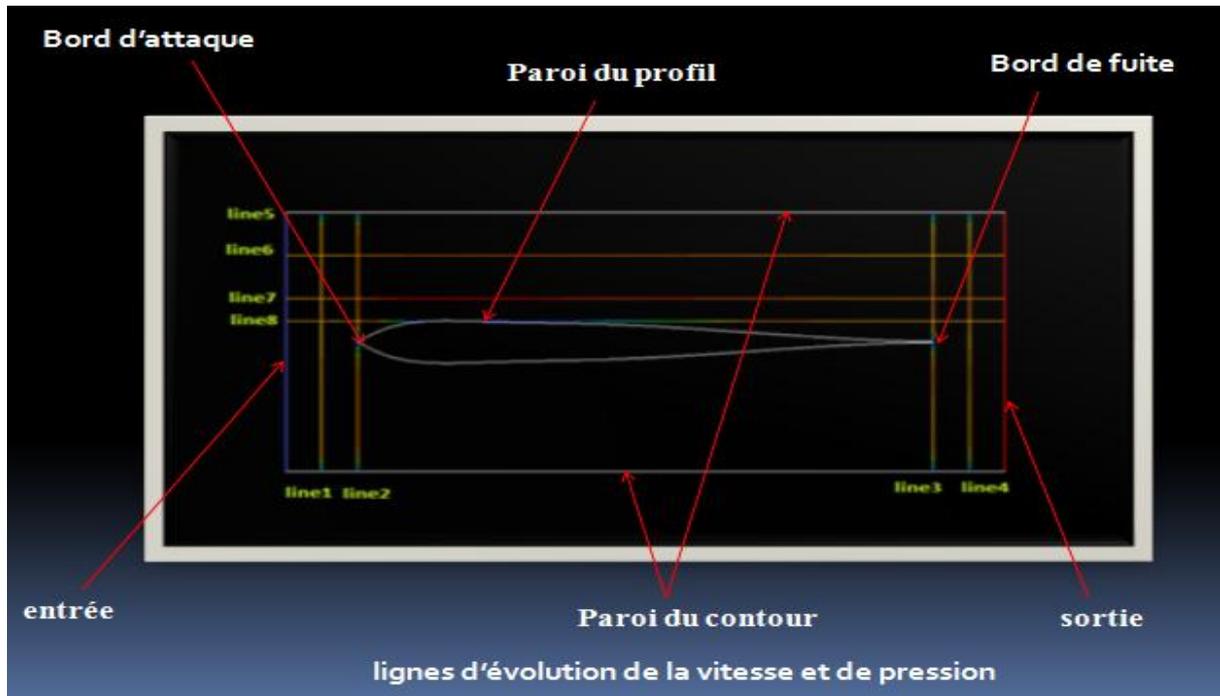


Figure (V-26) : lignes d'évolution de la vitesse et de pression

❖ Evolution de la vitesse :

Suivant la ligne-1 :

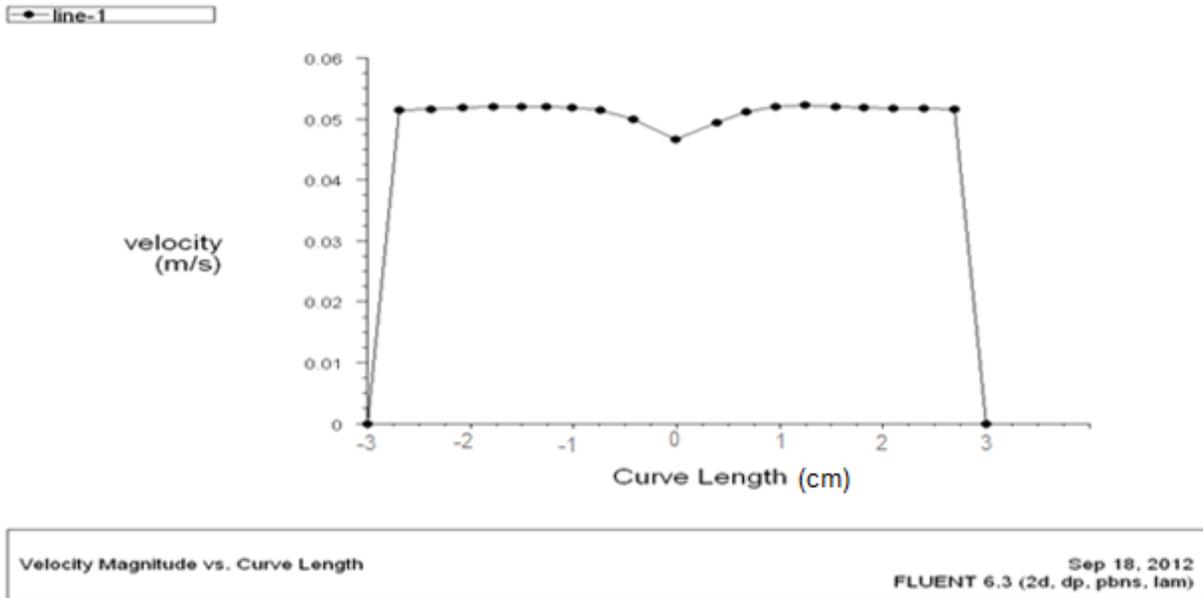


Figure (V-27) : Evolution de la vitesse suivant la ligne-1

Suivant la ligne-2 :

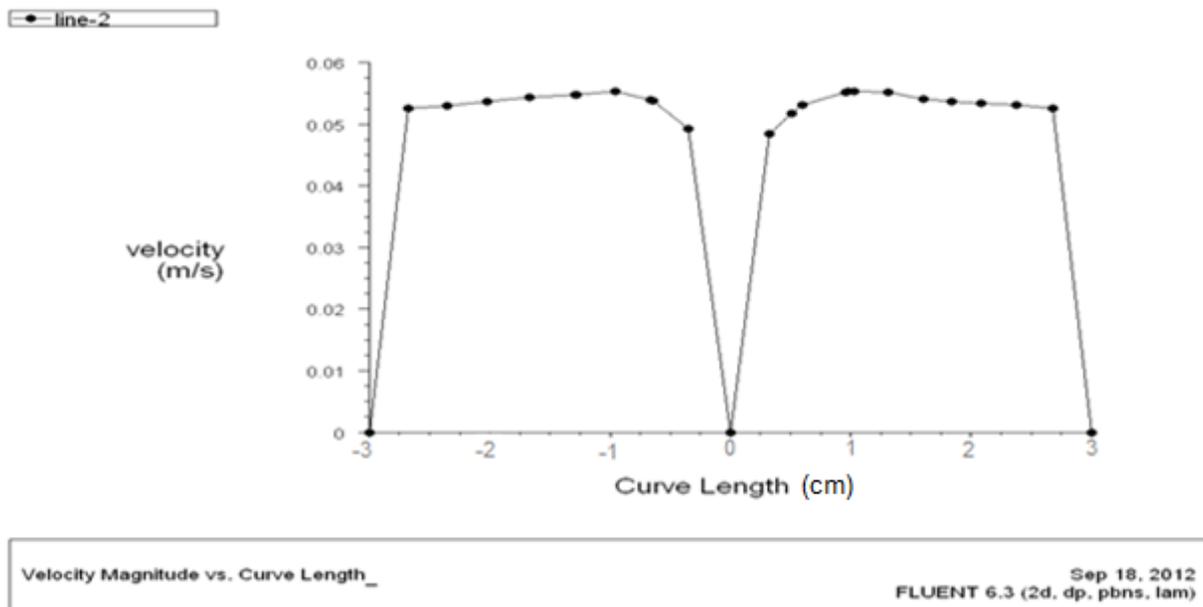


Figure (V-28) : Evolution de la vitesse suivant la ligne-2

Suivant la ligne-3 :

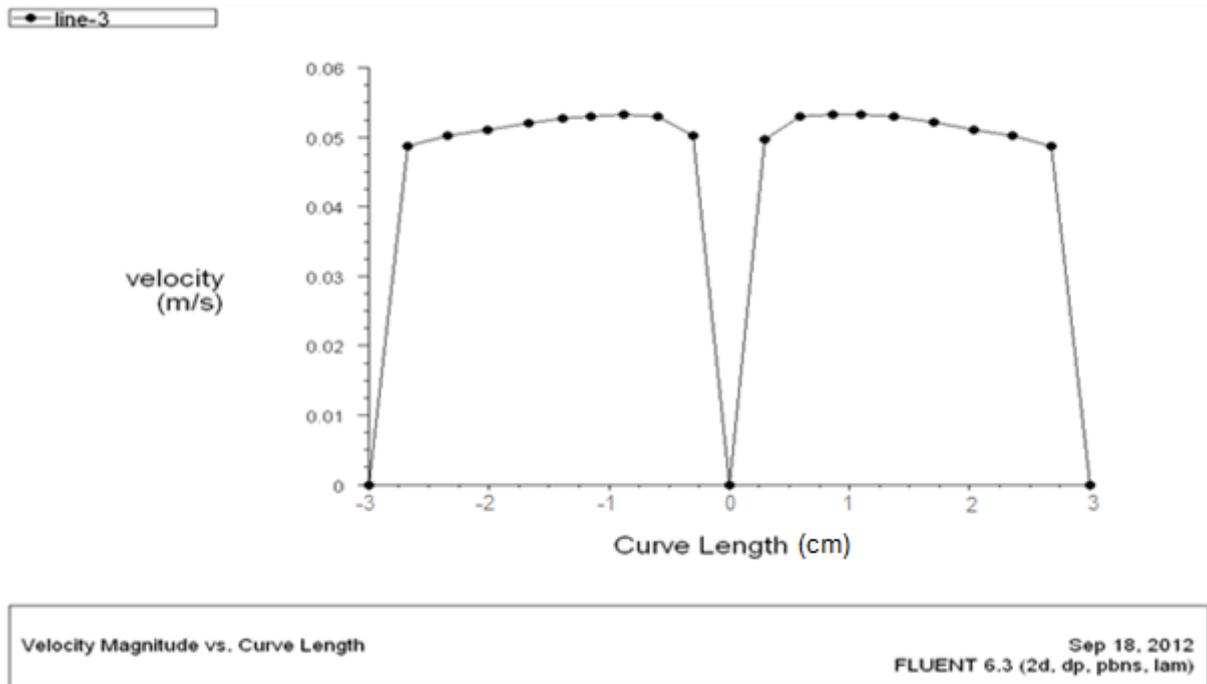


Figure (V-29) : Evolution de la vitesse suivant la ligne-3

Suivant la ligne-4 :

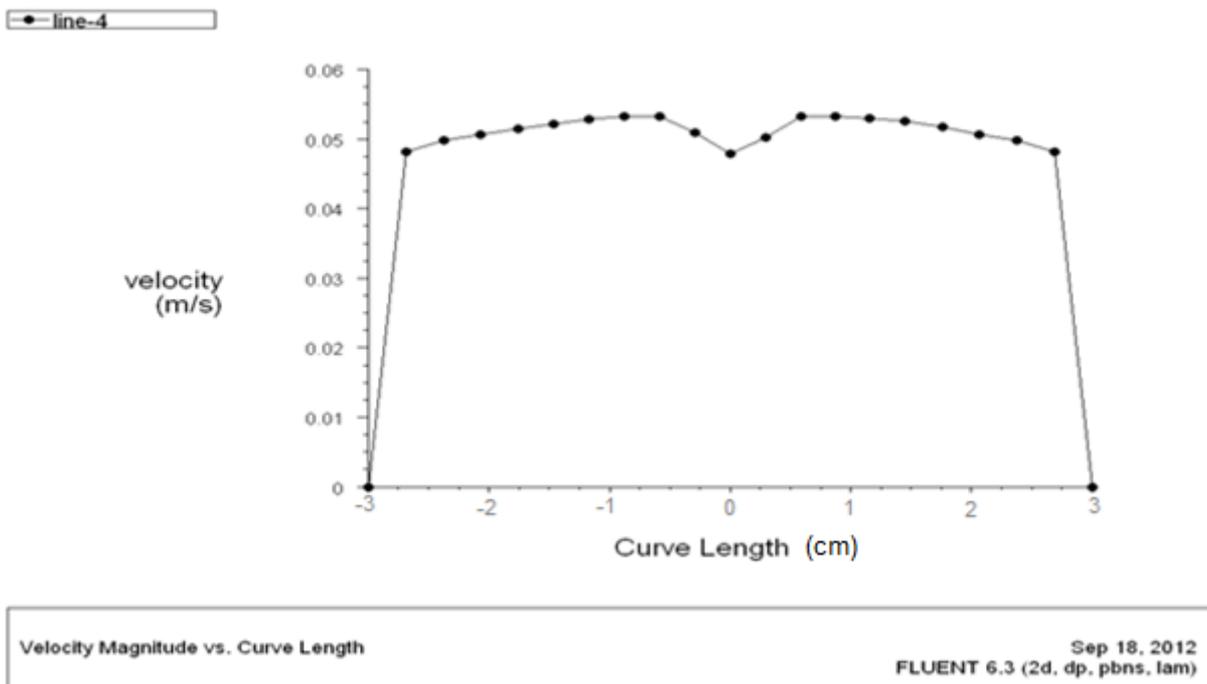


Figure (V-30) : Evolution de la vitesse suivant la ligne-4

Suivant la ligne-6 :

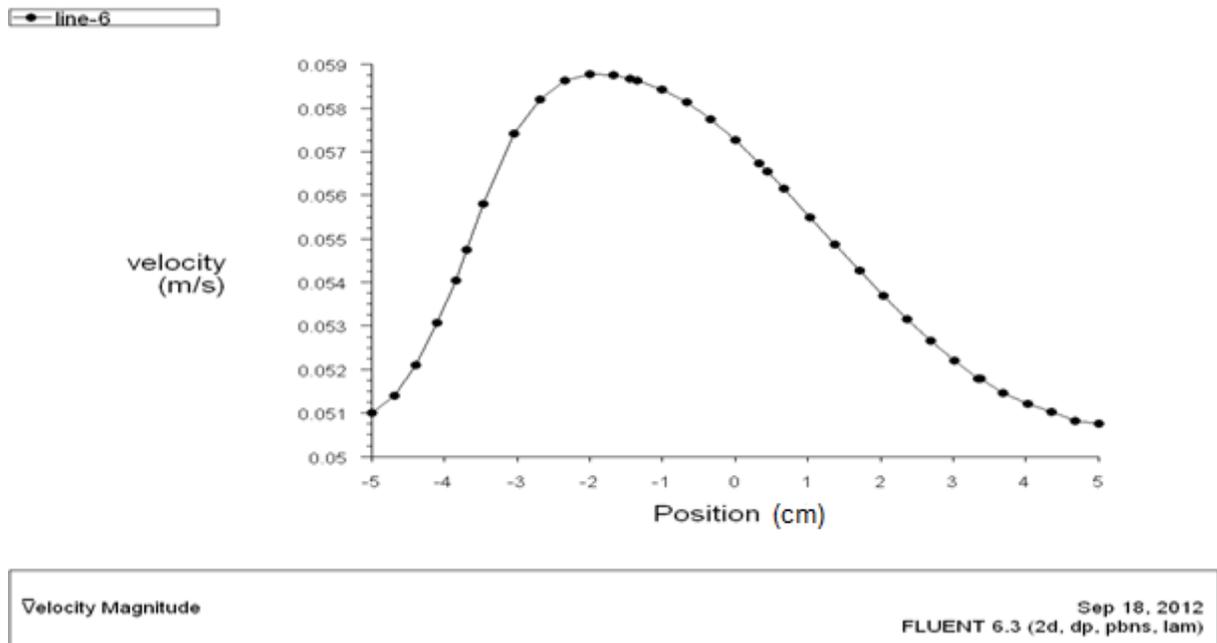


Figure (V-31) : Evolution de la vitesse suivant la ligne-6

Suivant la ligne-7 :

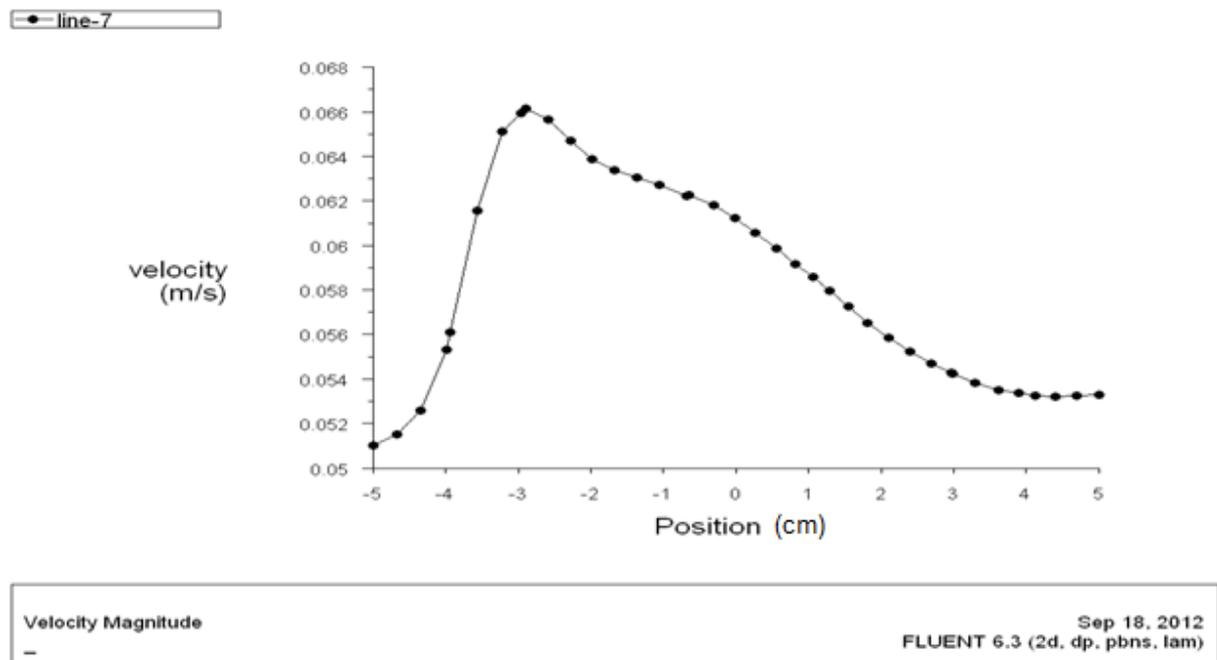
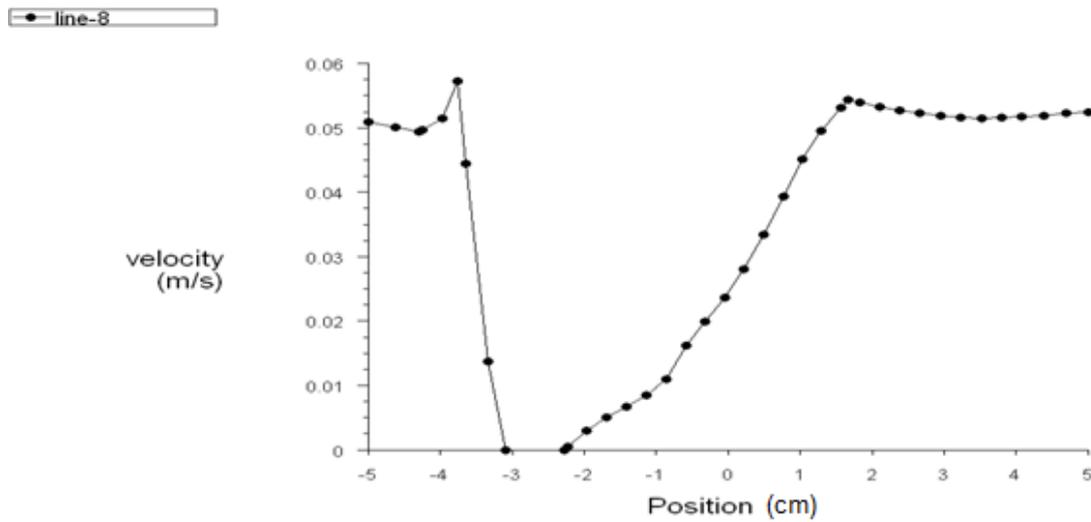


Figure (V-32) : Evolution de la vitesse suivant la ligne-7

Suivant la ligne-8 :



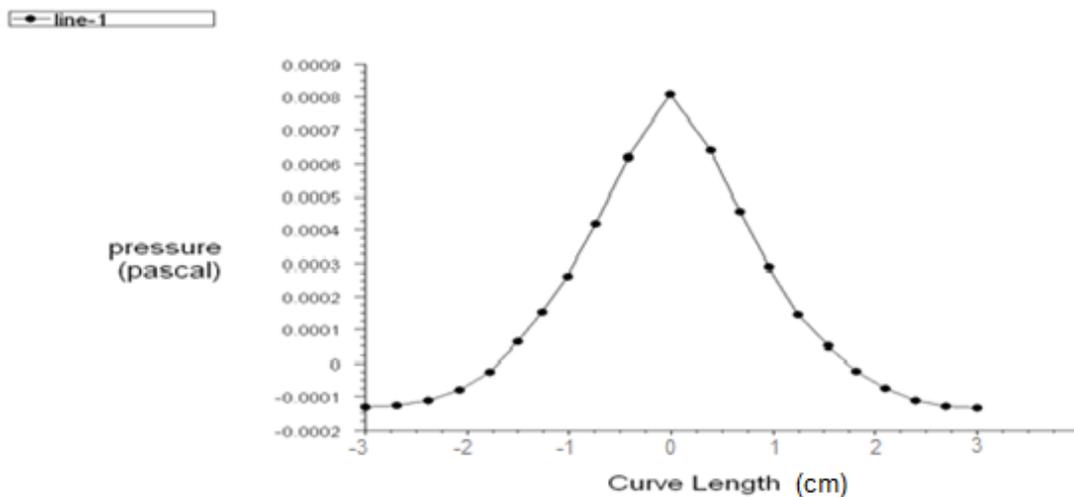
Velocity Magnitude_

Sep 18, 2012
FLUENT 6.3 (2d, dp, pbns, lam)

Figure (V-33) : Evolution de la vitesse suivant la ligne-8

❖ Evolution de la pression :

Suivant la ligne-1 :



Static Pressure vs. Curve Length

Sep 18, 2012
FLUENT 6.3 (2d, dp, pbns, lam)

Figure (V-34) : Evolution de la pression suivant la ligne-1

Suivant la ligne-2 :

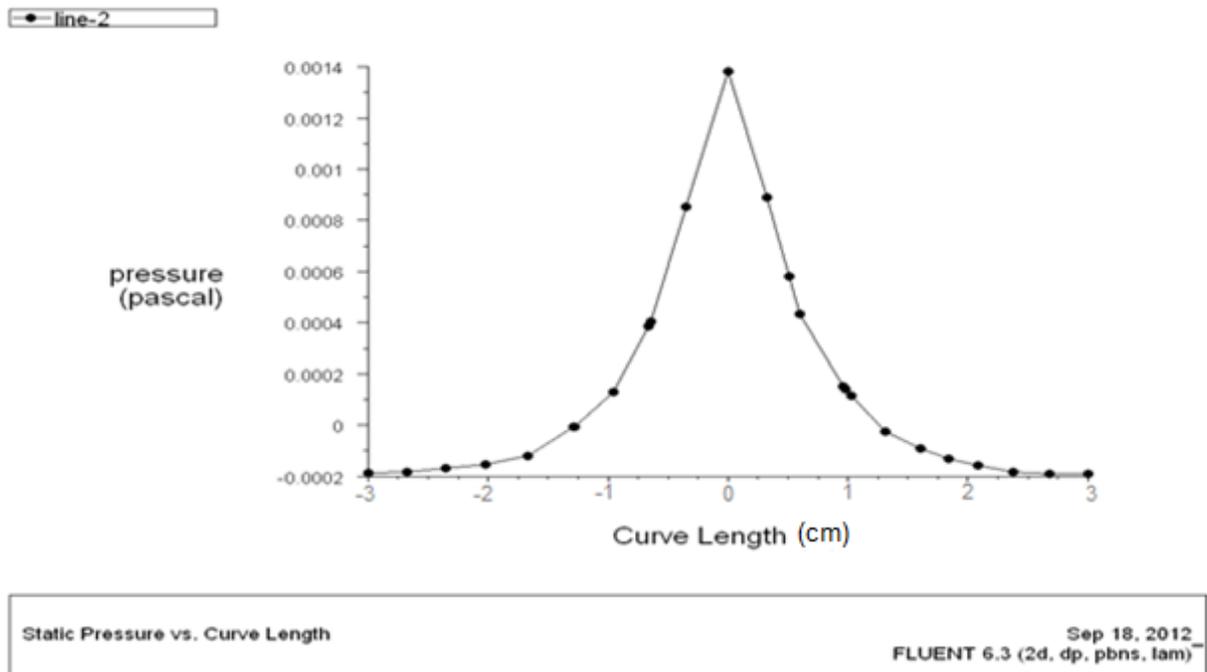


Figure (V-35) : Evolution de la pression suivant la ligne-2

Suivant la ligne-3 :

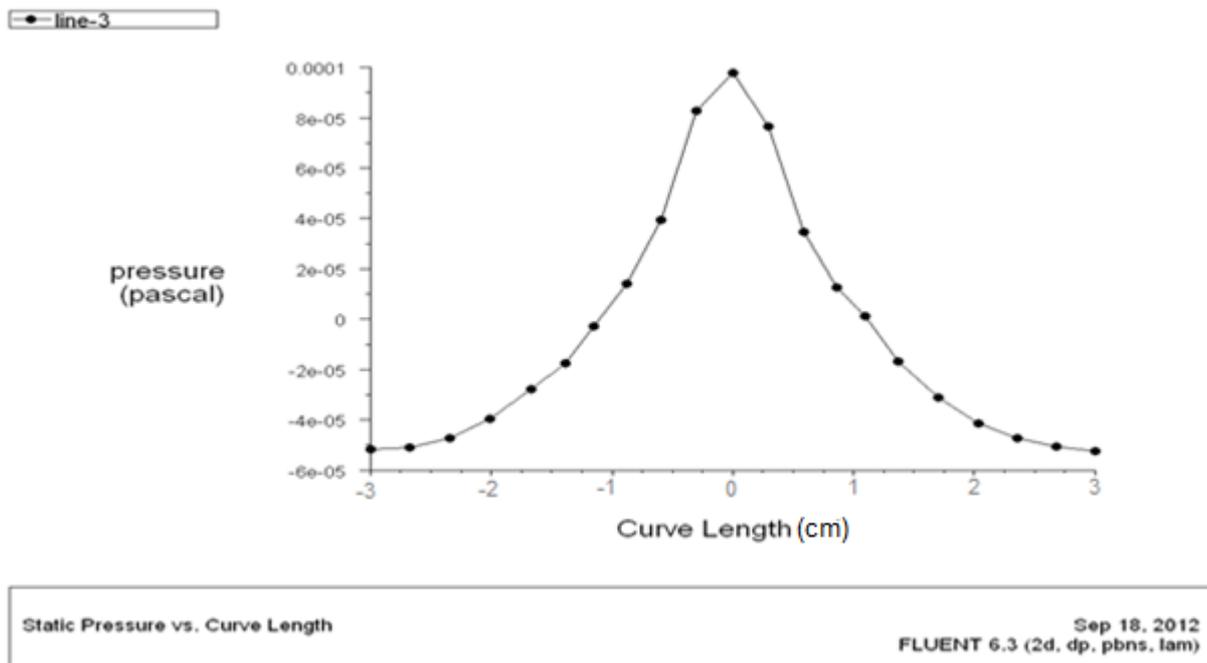


Figure (V-36) : Evolution de la pression suivant la ligne-3

Suivant la ligne-4 :

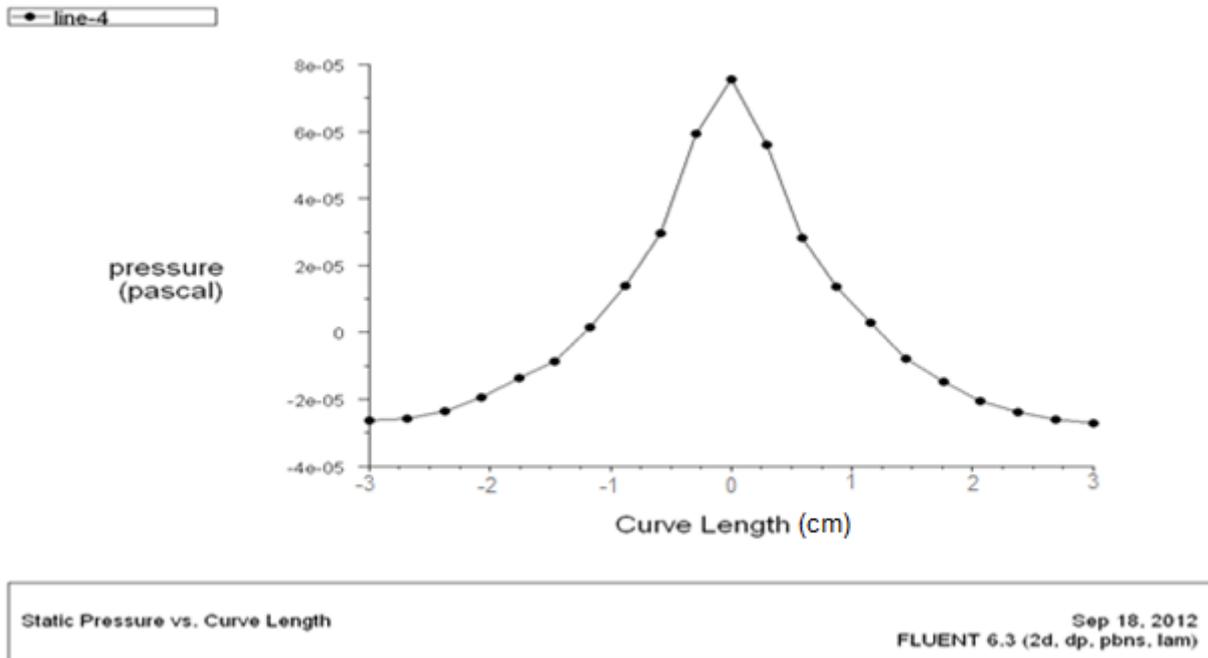


Figure (V-37) : Evolution de la pression suivant la ligne-4

Suivant la ligne-5 :

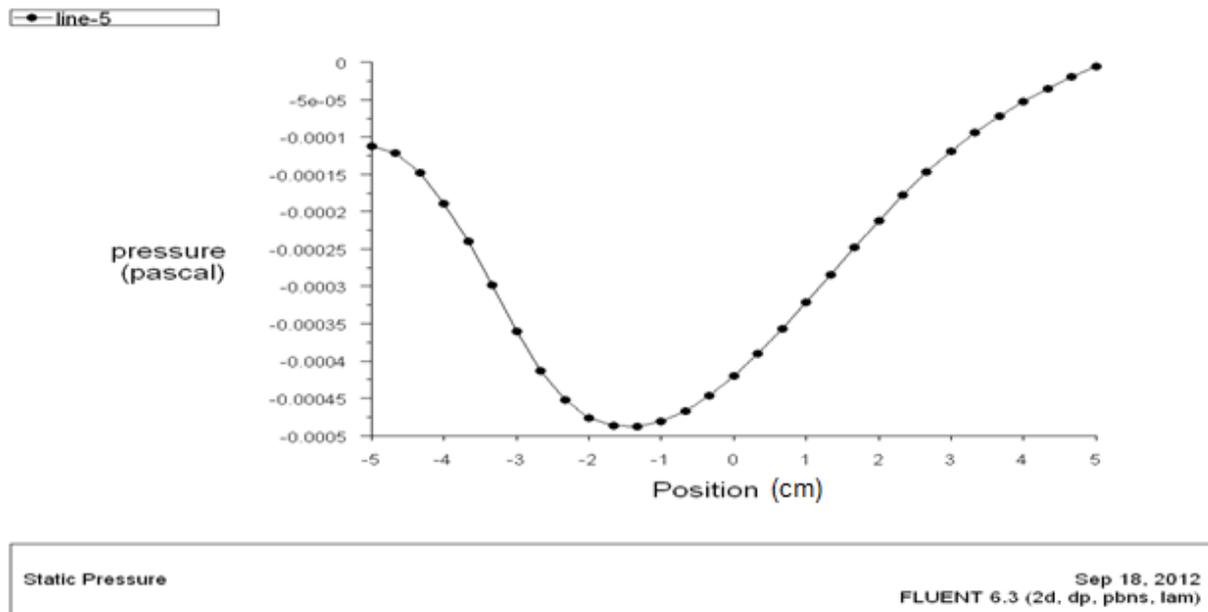


Figure (V-38) : Evolution de la pression suivant la ligne-5

Suivant la ligne-6 :

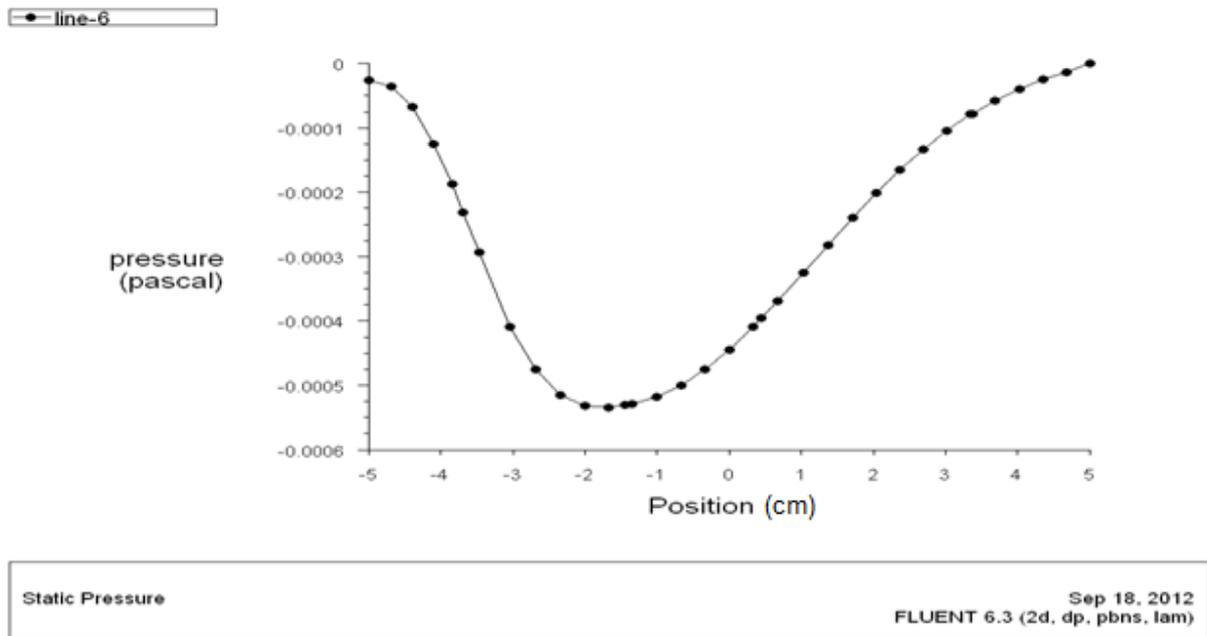


Figure (V-39) : Evolution de la pression suivant la ligne-6

Suivant la ligne-7 :

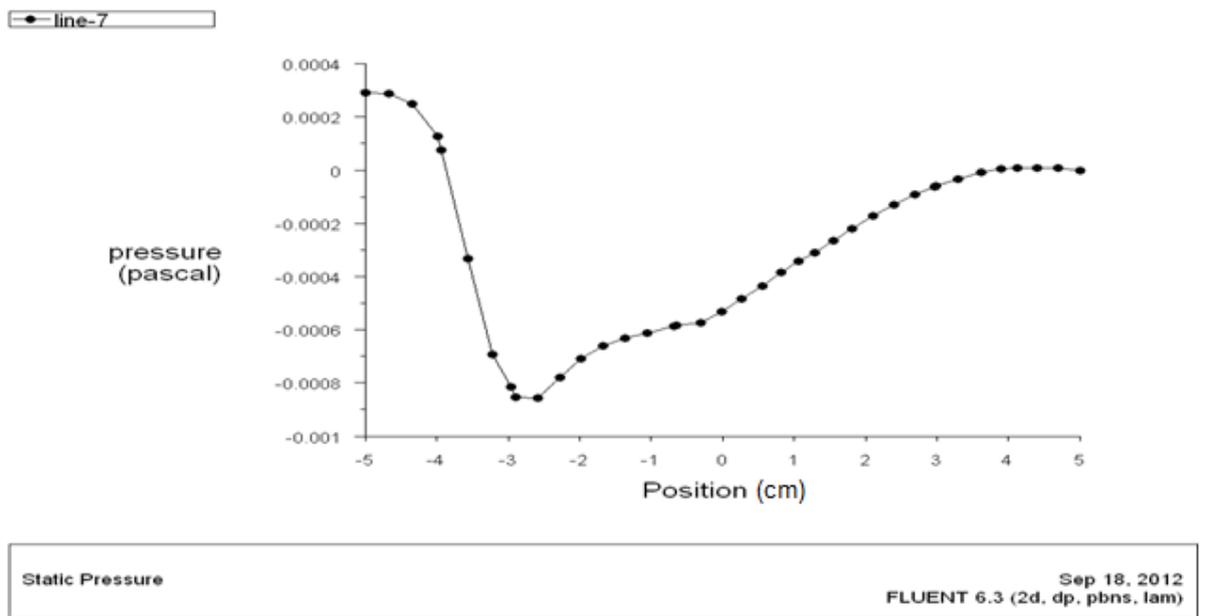
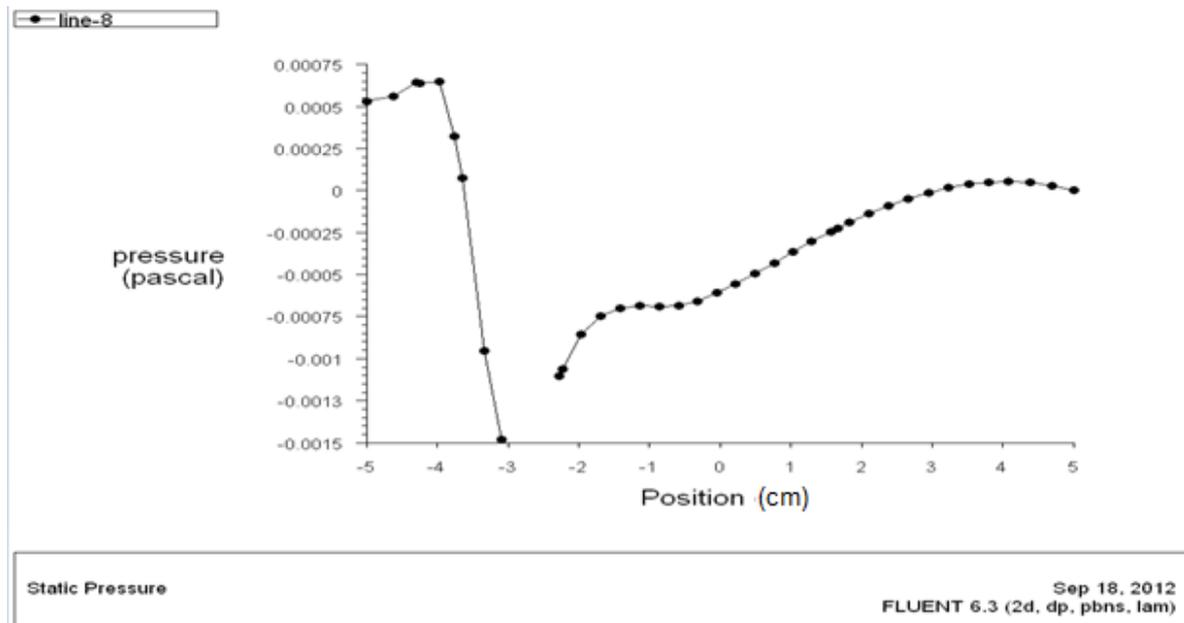


Figure (V-40) : Evolution de la pression suivant la ligne-7

Suivant la ligne-8 :



k,

Figure (V-41) : Evolution de la pression suivant la ligne-8

4. Résultats pour $Re = 477.10$:

Dans cette partie, nous restons toujours dans le même régime d'écoulement mais en faisant augmenter le nombre de Reynolds de 153.50 à 477.10 et on aura presque les mêmes courbes avec des valeurs de vitesse supérieures.

5. Résultats pour $Re = 872.22$:

En faisant augmenter le nombre de Reynolds de 477.10 à 872.22, on aura toujours les mêmes courbes mais avec de valeurs de vitesses plus élevées.

6. Analyse des résultats :

❖ Vitesses :

Suivant les lignes verticales :

On peut constater sur les figures **Figure (V-27)** et **Figure (V-30)** que l'évolution de la vitesse d'écoulement autour du profil symétrique selon les lignes (line-1 et line-4) est constante sauf une légère diminution au voisinage du bord d'attaque.

L'évolution de la vitesse d'écoulement autour du profil selon les lignes (line-2 et line-3) comme nous le montrent les **Figure (V-28)** et **Figure (V-29)** atteint sa valeur nulle au niveau de $y = -3$ m (condition d'adhérence à la paroi) et sa valeur commence d'augmenter en s'éloignant de la paroi pour qu'elle atteigne la valeur nulle au niveau de $y = 0$ m il s'agit de bord d'attaque et de bord de fuite qui présentent le point d'arrêt.

Suivant les lignes horizontales :

Dans ces directions l'évolution de la vitesse est différente :

Suivant les lignes (line-6 et line-7), **Figure (V-31)** **Figure (V-32)** l'évolution de la vitesse est différente et elle atteint une valeur supérieure à celle de l'entrée et cela revient à la forte diminution de la pression dans cette zone d'écoulement.

Dans le cas de la ligne (line-8), **Figure (V-33)** on a la même évolution de la vitesse que celle de la ligne 6 et 7 sauf que cette ligne touche le profil alors la vitesse s'annule dans cette zone.

❖ **Pressions :**

Les courbes de pression évoluent dans le sens opposé de celles des vitesses, c'est ce qu'on peut justifier par la loi de **BERNOULLI** :

Pour un fluide incompressible en régime stationnaire La quantité

$P + \frac{\rho V^2}{2} + \rho g z + P_{erte}$ est constante le long d'une ligne de courant.

❖ **Les lignes de courant :**

Lorsqu'un fluide réel et incompressible s'écoule autour d'un profil d'aile symétrique à faible vitesses (régime laminaire) les lignes de courant traversent ce profil uniformément et symétriquement, comme le montre la **Figure (V-25)**.

On a aussi visualisé les lignes de courant à l'aide du banc d'essai (partie expérimentale) et on a trouvé que les lignes de courant de l'expérience se concorde à celle de la simulation sauf qu'on a quelques petites différences, cela revient à la rugosité des parois du profil réalisé. Cette concordance apparaît clairement dans la **Figure (V-42)**.

CHAPITRE V
SIMULATIONS NUMERIQUES

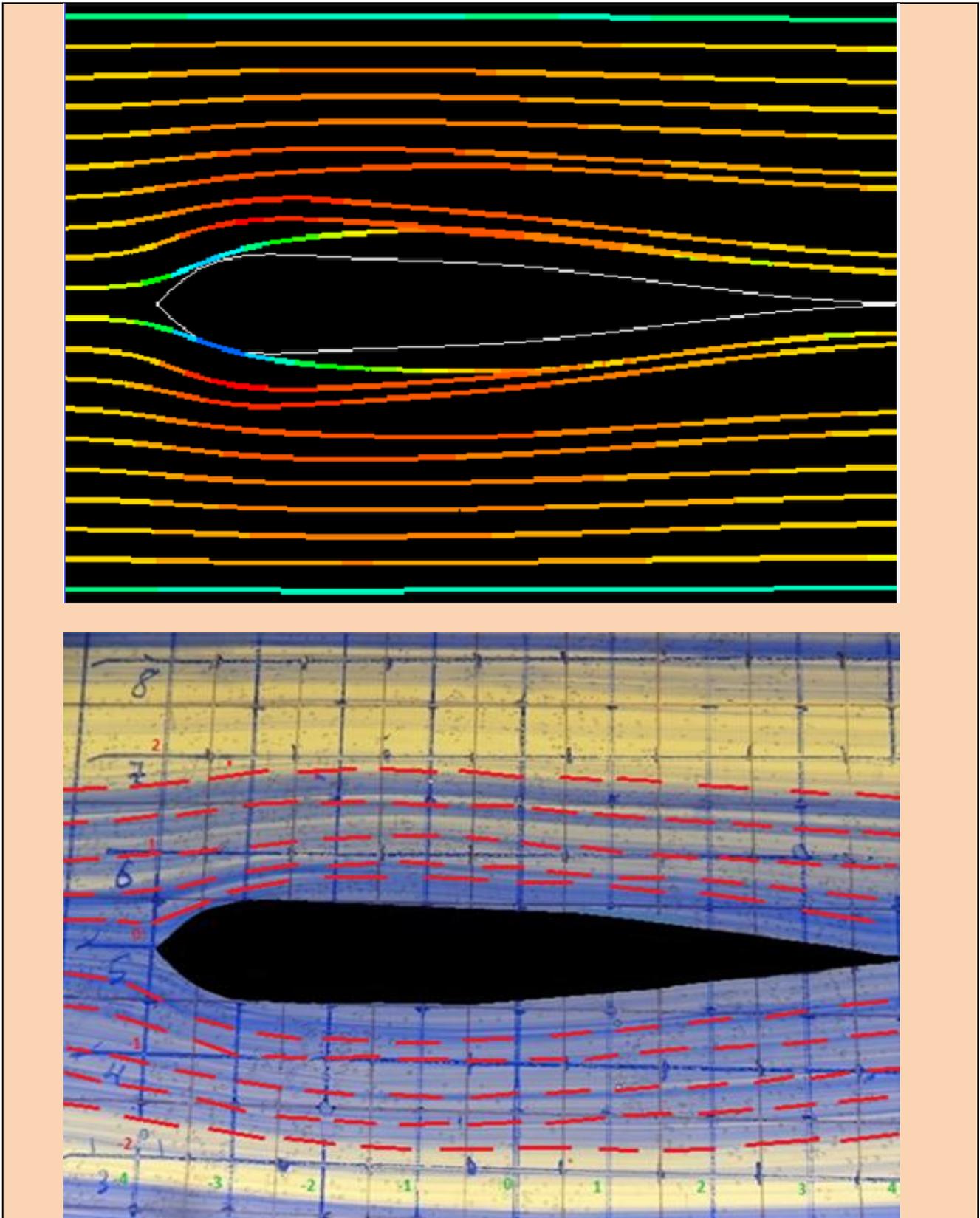


Figure (V-42) : Lignes de courant de la simulation et de d l'expérience pour la même échelle.

CONCLUSION GENERALE

Notre travail porte sur l'étude de l'écoulement d'un fluide incompressible, à faible vitesses, autour d'un profil d'aile symétrique défini à partir de la transformation conforme de **JOUKOWSKI**.

Les simulations réalisées dans ce présent travail montrent l'évolution et la distribution des vitesses et de pression autour de ce profil d'aile en régime laminaire à partir d'une vitesse initiale uniforme, ces simulations nous ont permis aussi de voir les lignes de courant.

La partie expérimentale nous a permis d'appliquer la transformation conforme de **JOUKOWSKI** sur un cercle de **22mm** de rayon et d'avoir un profil d'aile symétrique de **80mm** de longueur et de visualiser les lignes de courant autour de ce profil.

Enfin, pour que notre travail soit complet, il est nécessaire de confronter les lignes de courant de la simulation numérique avec les lignes de courant visualisées dans l'expérience.

Ce travail effectué dans le cadre de ce mémoire m'a également permis de me familiariser avec le code de calcul **Fluent**.

BIBLIOGRAPHIE

[1] : Riadh BEN HAMOUDA. © Centre de Publication Universitaire, Tunis 2008 :

Notion de Mécanique des Fluides.

[2] : Cours PC Brizeux Ch. DF4 : Fluides réels : viscosité 46.

[3] : J. Roussel - E.N.S.C.R - Mars 2010 : Cinématique des fluides.

[4] : Robert REY-professeur : Cinématique et Dynamique des Fluides, TOME 1.

[5] : Initiation à l'Aéromodélisme –Aérodynamique et mécanique du vol. Edité par la

FFAM (Fédération Française d'Aéromodélisme), édition juillet 2009.

[6] : R. COMOLET, Mécanique expérimentale de fluides 4^{ème} édition, Masson 1994