

**République Algérienne Démocratique et Populaire**  
**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la**  
**Recherche Scientifique**

**UNIVERSITE MOULOU D MAMMERI DE TIZI-OUZOU**



**FACULTE DU GENIE DE**  
**CONSTRUCTION**  
**DEPARTEMENT**  
**ELECTROMECHANIQUE**

**Projet de fin d'étude pour l'obtention de**  
**Master Académique**

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Electromécanique

Spécialité : Maintenance Industrielle

Thème :

Etude de l'écoulement autour d'un profil d'aile  
obtenu par transformation conforme de  
Joukowski

***Présenter Par :***

*Mr : Ferdji Abdellah.*

*Mr : Loumi Fayçal.*

***Encadrer Par :***

*Mr : Boussafeur Kaci.*

**Promotion 2023/2024**

## Remerciement

Nous tenons à remercier notre encadreur Mr BOUSSAFEUR Kaci d'avoir accepté de nous encadrer et pour les efforts qu'il a déployés, pour nous aider, conseiller, encourager et guider avec une grande gentillesse durant toute cette période.

Nous remercions tous les membres du jury qui ont accepté de juger notre travail.

Je souhaite aussi présenter un grand remerciement à tout le staff enseignant activant au sein du département de l'Electrotechnique de la faculté de Génie Electrique et d'Informatique de notre université qui ont contribué à notre formation tout le long des années de notre cursus, qu'ils trouvent ici l'expression de mon respect et de ma profonde reconnaissance.

A la fin, je présente ma gratitude pour tout scientifique travaillant pour le bonheur de l'humanité ainsi que tous les enseignants chercheurs et tous mes ami(e)s qui ont contribué à ce travail.

## Dédicace

*Je dédie ce travail*

*A mes chers parents qui m'ont soutenues et encouragé durant ces années d'études.*

*A mes frères, mes grands-parents et ceux qui ont partagé avec moi tous les moments d'émotion lors de la réalisation de ce travail, ils m'ont chaleureusement supporté et encouragé tout au long de mon parcours.*

*A ma famille, mes proches et à tous mes amis qui m'ont toujours encouragé.*

*Faycel Loumi.*

# Dédicace

**Je dédie ce travail**

**À mes parents, dont le soutien inconditionnel et les encouragements m'ont toujours porté.**

**À mes frères, pour leur encouragement constant et nos échanges enrichissants.**

**Et enfin, à mes amis, pour leur patience et leur compréhension tout au long de ce parcours.**

**Ferdji abd ellah**

# Sommaire

Remerciement

Dédicace

Introduction générale..... 1

## **Chapitre I : Notions fondamentales des mécaniques des fluides et d'aérodynamique**

1. Introduction ..... 3

2. Fluide..... 3

1.1. Fluide parfait..... 3

1.2. Fluide réel ..... 4

3. Statique des fluides..... 5

4. Dynamique des fluides ..... 5

5. Définition de la viscosité..... 5

5.1. Viscosité dynamique et la viscosité cinématique..... 7

5.2. Variation de la viscosité avec la pression ..... 8

5.3. Variation de la viscosité avec la température..... 9

5.4. Mesurage de la viscosité ..... 9

6. Notion de la couche limite..... 10

7. Nombre de Reynolds ..... 10

8. Régime d'écoulement..... 11

9. Analyse de mouvement d'une particule de fluide ..... 12

10. Aérodynamique ..... 14

11. Profil d'une aile d'avion..... 16

12. Caractéristiques géométriques d'un profil ..... 17

13. Caractéristiques aérodynamiques d'un profil..... 18

## **Chapitre II : Ecoulement potentiel**

1. Introduction ..... 20

2. Écoulement potentiel..... 20

# Sommaire

2.1.	Potentiel des vitesses- Ecoulement irrotationnels .....	20
2.2.	Fonction de courant .....	21
2.3.	Potentiel complexe .....	21
2.4.	Equations de continuité .....	21
3.	Ecoulements élémentaires .....	22
3.1.	Ecoulement uniforme .....	22
3.2.	Sources et Puits $D > 0$ ; $D < 0$ .....	24
4.	Superposition des écoulements potentiels.....	25
4.1.	Résumé des flux potentiels de base plans .....	25

## Chapitre III: Transformation conforme

1.	Introduction .....	27
2.	Transformation d'un cercle en un plan .....	27
3.	Transformation d'un cercle en un profil symétrique.....	29
4.	Transformation d'un cercle en un arc .....	29
5.	Transformation d'un cercle en un profil cambré.....	30

## Chapitre IV : Partie Expérimentale

Travail réalisé.....	35
----------------------	----

## Chapitre V : Partie numérique

1.	Introduction .....	44
2.	Logiciel utilisé.....	44
2.1.	Création de la géométrie sous le logiciel Design Modeler .....	45
2.2.	Création du maillage.....	45
2.3.	Définition du problème sous le logiciel ANSYS FLUENT .....	46
2.4.	Calcul avec ANSYS FLUENT pour les différents cas retenus .....	47
2.5.	Analyse des résultats obtenus .....	48
Conclusion générale .....	53	

# Liste des figures

## **Chapitre I : Notions fondamentales des mécaniques des fluides et d'aérodynamiques**

Figure 1. 1: Forces agissants sur un fluide parfait.....	4
Figure 1. 2::la viscosité .....	6
Figure 1. 3:Déférentes forme d'aile d'Avion .....	16
Figure 1. 4:Profil d'aile .....	16
Figure 1. 5:Profil d'aile cambré .....	17
Figure 1. 6:composantes de la résultante aérodynamique.....	18

## **Chapitre II : Ecoulement potentiel**

Figure 2. 1:Écoulement uniforme.....	23
Figure 2. 2:Écoulement de type doublet placé à l'origine.....	23
Figure 2. 3:Écoulement de type source. ....	24

## **Chapitre III: Transformation conforme**

Figure 3. 1:transformation d'un cercle en un plan. ....	27
Figure 3. 2:Transformation d'un cercle en un profil symétrique. ....	29
Figure 3. 3/Transformation d'un cercle en un arc de cercle.....	30
Figure 3. 4:Transformation d'un cercle en un profil cambré .....	30
Figure 3. 5:Visualisation des lignes d'écoulement.....	31
Figure 3. 6:Filet et tube de courant. ....	32

## **Chapitre IV : Partie Expérimentale**

Figure 4. 1:L'aile cambrai .....	36
Figure 4. 2:Le banc d'essai .....	37
Figure 4. 3:Visualisation des lignes de courant autour d'un cercle. ....	38
Figure 4. 4:Visualisation des lignes de courant autour d'un profil cambrai .....	40

## **Chapitre V : Simulations numérique**

Figure 5. 1: la partie géométrie sur la plateforme ANSYS .....	45
Figure 5. 2 : partie du maillage sur la plateforme .....	46
Figure 5. 3 : la partie de configuration sur la plateforme ANSYS.....	47
Figure 5. 4 : la partie solution sur la plateforme ANSYS .....	47

## Liste d'abréviation

### Lettres latines :

$e$	Epaisseur (m)
$\vec{F}_r$	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)
$Q_v$	Débit volumique
$S$	Surface ( $m^2$ )
$t$	Temps (s)
$U_\infty$	Vitesse à l'infini amont (m/s)

## Liste d'abréviation

$u ; v ; w$	Composantes de la vitesse dans le plan (x,y) (m/s)
$V_l$	Volume (m <sup>3</sup> )
$V$	Vitesse (m/s)
x, y, z	Coordonnées cartésiennes (m)

### Lettres grecques :

$\varepsilon$	Taux de déformation
$\vec{\gamma}$	Accélération du fluide.
$\mu$	Viscosité dynamique (Kg/m.s)
$\nu$	Viscosité cinématique (m <sup>2</sup> /s)
$\rho$	Masse volumique (Kg/m <sup>3</sup> )
$\beta$	Angle de cambrure (°)
$\Phi$	Potentiel complexe vitesses
$\Psi$	Fonction de courant

### Nombres sans dimension :

$C_x$	Coefficient de traînée du profil
$C_y$	Coefficient de portance du profil surpression
$R_e$	Nombre de Reynolds
$R_{e_c}$	Nombre de Reynolds critique

# Introduction générale

## **Introduction générale**

La simulation numérique des écoulements de fluides est essentielle dans le domaine de la recherche hydraulique, car elle permet de mieux comprendre et prédire le comportement des fluides dans diverses conditions. Les écoulements, souvent tridimensionnels et instationnaires, obéissent aux équations complexes de Navier-Stokes. Ces équations, bien que fondamentales en mécanique des fluides, posent des défis considérables en raison de leur nature non linéaire et de la complexité des phénomènes qu'elles décrivent. À ce jour, aucune méthode numérique standard n'allie à la fois fiabilité et rapidité, et il est courant de devoir recourir à des approximations ou d'ignorer certains phénomènes pour rendre les simulations réalisables.

Ce mémoire s'articule autour de cinq chapitres. Le premier chapitre introduit les concepts fondamentaux de la mécanique des fluides et de l'aérodynamique. Il commence par une présentation générale des types de fluides et de leurs états, ainsi que des différentes viscosités et des régimes d'écoulement. Ce chapitre se conclut par une discussion sur les caractéristiques géométriques et aérodynamiques des profils d'aile, essentielles pour comprendre le comportement des fluides en interaction avec des surfaces solides.

Le deuxième chapitre se concentre sur les écoulements potentiels et élémentaires. Il aborde les concepts de base liés à ces écoulements, ainsi que la notion de superposition, qui permet de combiner des solutions simples pour obtenir des résultats plus complexes. Cette approche est cruciale pour l'analyse des écoulements dans divers contextes.

Dans le troisième chapitre, nous étudions les transformations conformes, un outil mathématique puissant permettant d'analyser et de simplifier des problèmes d'écoulement. Les différents types de transformations sont présentés, mettant en lumière leur utilité dans la résolution des problèmes de flux autour de profils complexes.

Le quatrième chapitre est dédié à une partie expérimentale, où nous présentons la visualisation des lignes de courant autour d'un profil d'aile cambrée. Cette visualisation est réalisée grâce à la transformation conforme de Joukowski, à l'aide d'un banc d'essai conçu pour observer les comportements des fluides dans un cadre contrôlé.

## Introduction générale

Enfin, le dernier chapitre propose une simulation numérique bidimensionnelle de l'écoulement laminaire et visqueux d'un fluide incompressible autour d'un profil d'aile, en utilisant le logiciel ANSYS Fluent. Cette simulation illustre l'application des concepts théoriques abordés précédemment et permet de valider les résultats numériques.

En somme, ce mémoire vise à offrir une compréhension approfondie des écoulements de fluides, tant sur le plan théorique qu'expérimental, tout en soulignant l'importance des méthodes numériques dans l'analyse et la simulation de ces phénomènes complexes.

## Chapitre I :

Notions fondamentales de mécanique des fluides et  
d'aérodynamique

# Chapitre I : Notion fondamentales de mécanique des fluides et d'aérodynamique

## 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. Ce chapitre présente les concepts clés de la mécanique des fluides et de l'aérodynamique, pour comprendre les interactions entre fluides et corps solides. Il aborde la définition des types de fluides, leurs propriétés, ainsi que les caractéristiques des profils d'aile, essentielles pour la portance et la traînée.

## 2. Fluide

Un fluide est un milieu matériel continu, entièrement déformable et non rigide, qui s'adapte à la forme du récipient qui le contient. Les fluides se classent en deux catégories : les liquides et les gaz. Les gaz sont des fluides compressibles, tandis que les liquides sont presque incompressibles. [1]

### Fluide incompressible :

Un fluide est dit incompressible, si la pression extérieure n'a aucun effet sur son volume.  
 $\rho = \text{cste.}$

### Fluide compressible :

Un fluide est dit compressible si son volume s'influe de la variation de la pression extérieure

### 2.1. Fluide parfait

Un fluide parfait est un modèle simplifié utilisé en mécanique des fluides pour décrire le comportement d'un fluide. Dans ce modèle, on considère que le fluide est non visqueux, incompressible et que les forces de frottements sont négligeables.

# Chapitre I : Notion fondamentales de mécanique des fluides et d'aérodynamique

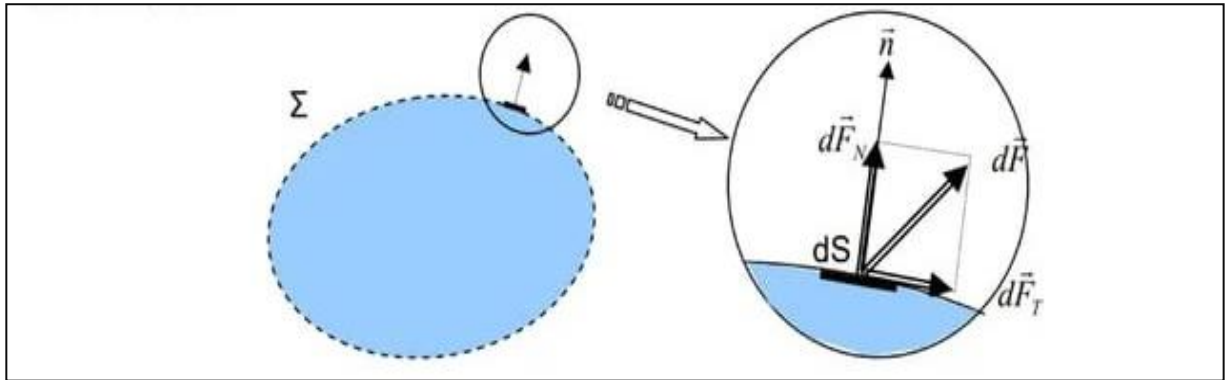


Figure 1. 1: Forces agissants sur un fluide parfait

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 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  $d\vec{F}_T$  est nul. 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 apparait lors du mouvement du fluide. [5]

# **Chapitre I : Notion fondamentales de mécanique des fluides et d'aérodynamique**

## **3. Statique des fluides**

La statique des fluides est la branche de la mécanique des fluides qui étudie les fluides (liquides et gaz) au repos et les forces qui agissent sur eux. Elle analyse comment la pression varie en fonction de la profondeur et comment les forces de poussée et de gravité interagissent dans des systèmes où le fluide n'est pas en mouvement.

## **4. Dynamique des fluides**

La dynamique des fluides est l'étude du mouvement des liquides et des gaz ainsi que des forces qui les influencent. Elle repose sur les lois de conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie. Les équations de Navier-Stokes sont utilisées pour décrire mathématiquement le comportement des fluides. Cette discipline a des applications dans de nombreux domaines, notamment l'aéronautique, l'ingénierie des procédés, la météorologie et la médecine. Elle est cruciale pour la conception et l'optimisation de systèmes impliquant des fluides, tels que les avions, les voitures et les turbines.

## **5. Définition de la viscosité**

La viscosité est cette propriété du fluide qui lui permet de résister aux contraintes de cisaillement. Considérons l'expérience qui consiste à placer une substance entre deux plaques séparées par une petite distance  $e$ . La plaque inférieure est fixe et la plaque supérieure est soumise à une force  $\mathbf{F}$  parallèle à la plaque engendrant une contrainte tangentielle en chaque point de la substance entre [5]

# Chapitre I : Notion fondamentales de mécanique des fluides et d'aérodynamique

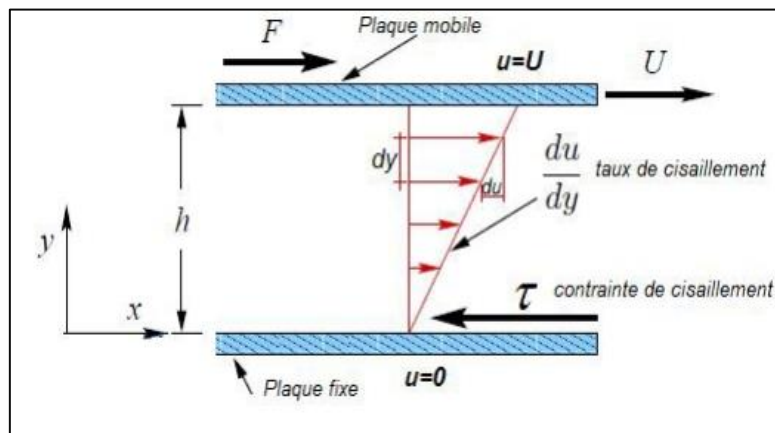


Figure 1. 2.: la viscosité

Sous l'action de la force de cisaillement  $\mathbf{F}$ , il s'établit dans le fluide un état de mouvement tel que les couches qui se trouvent en contact direct avec les plaques ont la même vitesse qu'elle (adhérence aux plaques), tandis que les couches intermédiaires glissent les unes sur les autres avec la vitesse  $\mathbf{U}$  proportionnelle à leur distance  $\mathbf{Y}$  de la plaque fixe. [3]

La force de cisaillement est donnée par :

$$\mathbf{F} = \mu \frac{su}{e} \quad (\text{I.1})$$

Le facteur de proportionnalité  $\mu$  est appelé la viscosité absolue ou viscosité dynamique du fluide.

La contrainte de cisaillement est donnée par :

$$\tau_0 = \mathbf{F}/s = \mu \frac{U}{e} \quad (\text{I.2})$$

Le rapport  $\frac{U}{e}$  est appelé le taux de déformation angulaire du fluide.

L'équation (I.2) peut être écrite sous une forme plus générale :

# Chapitre I : Notion fondamentales de mécanique des fluides et d'aérodynamique

$$\tau_0 = \mu \frac{dU}{dy} \quad (\text{I.3})$$

L'équation (I.3) est appelée la loi de Newton de la viscosité.

Tirons de (I.3)  $\mu$ , nous obtenus :

$$\mu = \frac{\tau_0}{\frac{dU}{dy}} \quad (\text{I.4})$$

$\mu$  se mesure en [N.sec /m<sup>2</sup>] ou en [Kg/m.sec].

On définit aussi la viscosité cinématique qui se mesure en [m<sup>2</sup>/sec] par :

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (\text{I.5})$$

## 5.1. Viscosité dynamique et la viscosité cinématique

La viscosité est une propriété fondamentale des fluides qui mesure leur résistance à l'écoulement. Elle se divise en deux catégories principales : la viscosité dynamique et la viscosité cinématique

### 5.1.1. Viscosité dynamique

La viscosité dynamique, souvent désignée simplement par viscosité, est la mesure de la résistance d'un fluide à l'écoulement sous l'effet d'une force de cisaillement. Elle est généralement représenté par la lettre ( $\mu$ ) et s'exprime en Pascal-seconde (Pa- s) dans le système internationale d'unités (SI). Elle est proportionnelle à la différence de vitesse des couches soit ( $dv$ ), à leur surface ( $S$ ) et inversement proportionnelle à ( $dz$ ). [2]

# Chapitre I : Notion fondamentales de mécanique des fluides et d'aérodynamique

$$F_g = \mu S \frac{dv}{dz}$$

$F_g$  : Force de glissement entre les couches en (N),

$\mu$ : viscosité dynamique en (Kg/m. s),

$S$  : surface de contact entre deux couches en (m<sup>2</sup>),

$dv$ : écart de vitesse entre deux couches en (m/s),

$dz$  : distance entre deux couches en (m).

## 5.1.2. Viscosité cinématique

La viscosité cinématique, symbolisée par la lettre grecque nu ( $\nu$ ) est définie comme le rapport entre la viscosité dynamique la masse volumique du fluide. Elle représente essentiellement la capacité d'un fluide à s'écouler par rapport à sa densité. L'unité (SI) de viscosité cinématique est le mètre carré par seconde (m<sup>2</sup>/s).

## 5.1.3. Relation entre la viscosité dynamique et la viscosité cinématique

La viscosité cinématique ( $\nu$ ) est définie comme le quotient entre la viscosité dynamique ( $\mu$ ) et la masse volumique ( $\rho$ ) du fluide.

## 5.2. Variation de la viscosité avec la pression

La relation entre la viscosité et la pression dépend du type de fluide (liquide ou gaz) est des conditions spécifiques dans lesquelles il se trouve.

# **Chapitre I : Notion fondamentales de mécanique des fluides et d'aérodynamique**

- **Liquide :**

Lorsqu'un liquide est soumis à une pression accrue, les molécules sont généralement rapprochées, ce qui réduit les espaces entre elles. Cela peut entraîner une diminution de la viscosité car les molécules sont plus étroitement alignées et ont moins de mouvement relatif les unes par rapport aux autres.

- **Gaz :**

La viscosité dynamique des gaz est pratiquement indépendante de la pression.

### **5.3. Variation de la viscosité avec la température**

La variation de la viscosité avec la température est un phénomène important pour comprendre le comportement des liquides et des gaz.

- **Liquide :**

En générale, l'augmentation de la température entraîne une diminution de la viscosité des liquides. Cela est dû à une augmentation de l'agitation thermique des molécules, ce qui diminue les forces d'attraction intermoléculaires et permet aux molécules de se déplacer plus librement.

- **Gaz :**

Contrairement aux liquides, l'augmentation de température peut augmenter la viscosité des gaz, cela est dû à une augmentation de l'agitation moléculaire, ce qui augmente le nombre de collisions entre les molécules.

### **5.4. Mesurage de la viscosité**

Le mesurage de la viscosité est une procédure importante de nombreux domaines, notamment l'industrie.

# **Chapitre I : Notion fondamentales de mécanique des fluides et d'aérodynamique**

## **5.4.1. Viscosimètre à chute de bille**

Un viscosimètre à chute de bille est un appareil utilisé pour mesurer la viscosité d'un fluide en observant la vitesse de chute d'une bille dans ce fluide. La viscosité est déterminée en fonction du temps nécessaire à la bille pour parcourir une distance donnée, en tenant compte des propriétés du fluide et des dimensions de la bille. Cette méthode est simple et efficace pour des fluides newtoniens, permettant d'obtenir une évaluation précise de leur viscosité[2]

## **5.4.2. Viscosimètre rotatif ou viscosimètre de couette**

Un viscosimètre rotatif, ou viscosimètre de Couette, est un appareil qui mesure la viscosité des fluides en évaluant leur résistance à l'écoulement lorsqu'un cylindre interne tourne dans un fluide confiné entre deux cylindres. La viscosité est déterminée en analysant le couple résistant au mouvement, permettant d'obtenir des mesures précises même pour des fluides non-newtoniens.

## **6. Notion de la couche limite**

La couche limite est une notion fondamentale en mécanique des fluides qui se réfère à la région près d'une surface solide où les effets de viscosité du fluide sont significatifs. Elle se forme lorsque les molécules de fluide en contact avec une surface solide subissent des forces de frottement, cela ralentit ces molécules et crée une zone où les effets visqueux dominent. L'épaisseur de la couche limite varie en fonction de nombreux facteurs, notamment la vitesse du fluide, la viscosité du fluide et la rugosité de la surface solide. Elle peut être très mince à proximité de la surface et s'épaissir à mesure que l'on s'éloigne de celle-ci. Est-elle se distingue du reste du fluide par des gradients rapides de vitesse et de propriétés, à l'extérieur de la couche limite le fluide est considéré comme "influence libre" et les effets visqueux sont négligeables.

## **7. Nombre de Reynolds**

Le nombre de Reynolds est une grandeur sans dimension utilisée en mécanique des fluides pour caractériser l'écoulement d'un fluide, qu'il s'agisse d'un liquide ou d'un gaz, autour

# Chapitre I : Notion fondamentales de mécanique des fluides et d'aérodynamique

d'un objet. Il est calculé comme le rapport entre la force inertielle et la force visqueuse du fluide et s'exprime mathématiquement comme :

$$\text{Re} = \frac{(V*L)}{\mu}$$

- $V$  = est la vitesse du fluide,
- $L$  = est la longueur caractéristique de l'écoulement,
- $\mu$  = est la viscosité cinématique,

Le nombre de Reynolds aide à déterminer si l'écoulement est laminaire ou turbulent. Quand  $Re$  est faible, l'écoulement tend à être laminaire, tandis que  $Re$  est élevé, l'écoulement tend à être turbulent.

## 8. Régime d'écoulement

Le régime d'écoulement fait référence à la manière dont un fluide se déplace autour d'un objet ou à travers un conduit. Il peut être classé en trois principaux types de régimes :

### 8.1. Régime laminaire

Dans ce régime, le fluide se déplace de manière ordonnée et en couches parallèles, les particules fluides suivent des trajectoires régulières et prévisibles, ce qui donne un écoulement fluide stable. Ce type d'écoulement est généralement observé à des faibles nombres de Reynolds. [2]

### 8.2. Régime turbulent

À des nombres de Reynolds plus élevés, le mouvement du fluide devient chaotique et irrégulier. Des tourbillons se forment, les particules fluides se mélangent de manière aléatoire et l'écoulement devient turbulent. Ce régime est souvent associé à une plus grande perte d'énergie.

# Chapitre I : Notion fondamentales de mécanique des fluides et d'aérodynamique

## 8.3. Régime stationnaire

La vitesse d'une particule du fluide, représentée par le vecteur  $\mathbf{v}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}, \mathbf{t})$ , ne dépend pas explicitement du temps ( $\frac{\partial v}{\partial t} = 0$ ). En réalité, cela indique simplement que les lignes de courant, qui représentent le mouvement du fluide, ne changent pas au fil du temps

## 9. Analyse de mouvement d'une particule de fluide

L'analyse du mouvement d'une particule de fluide est un aspect fondamental de la mécanique des fluides. Elle implique généralement la description du déplacement d'une particule de fluide à travers un champ de vitesses, qui peut être généré par différents facteurs tels que des gradients de pression, des forces externes ou des interactions avec d'autres particules.

### 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 les mêmes propriétés à chaque instant. [2]

### 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 ( $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ ) :

$$\vec{V} = \vec{u}\vec{i} + \vec{v}\vec{j} + \vec{w}\vec{k}$$

$\vec{V}$  = Vecteur vitesse absolue.

# Chapitre I : Notion fondamentales de mécanique des fluides et d'aérodynamique

## 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 :

$$\Omega_x = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} \right)$$

$$\Omega_y = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} \right)$$

$$\Omega_z = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right)$$

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

## 9.4. Déformation linéaire

La déformation linéaire d'une particule de fluide se produit lorsque des forces externes ou des gradients de vitesse induisent un changement dans sa forme qui est linéaire par rapport à la distance dans une direction spécifique. Cette déformation peut être compressive ou extensive.

$$\text{div} \vec{v} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = \theta$$

$\theta$ : est appelée taux de dilatation.

$\vec{v}$  = vecteur vitesse absolue.

## 9.5. Déformation angulaire

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

$$\epsilon_x = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right)$$

# Chapitre I : Notion fondamentales de mécanique des fluides et d'aérodynamique

$$\varepsilon_y = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)$$

$$\varepsilon_z = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)$$

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

## 10. Aérodynamique

L'aérodynamique (du grec aer=air et dunamis=force) est la science qui étudie les phénomènes accompagnant un mouvement relatif entre un corps et l'air qui l'entoure le corps peut se déplacer dans le fluide immobile ou être fixe dans le fluide en mouvement comme dans le cas d'une maquette dans une soufflerie. Les principales études en aérodynamique portent sur les profils d'ailes, les voiture, le décrochage, l'hypersustentation, la réduction de la traînée...etc. Le premier objectif est de déterminer les forces et les moments, sur un corps se déplaçant dans un fluide, généralement de l'air (par exemple, la génération de la portance, de la traînée et des moments sur les profils les ailes d'avion, le fuselage, les hélices, les nacelles...). On peut aussi calculer les forces qui s'exercent sur les pales d'hélicoptère et sur les éoliennes. Le second objectif a pour but de déterminer les écoulements internes des gaz. [2]

Et de mesuré leurs propriétés dans un l'écoulement.

### 10.1. Différents régimes d'écoulement

L'aérodynamique couvre différents régimes d'écoulement, en fonction du nombre de Mach  $M$  qui est définie par :

$$M = \frac{V}{a}$$

# Chapitre I : Notion fondamentales de mécanique des fluides et d'aérodynamique

Où :

V : la vitesse de l'écoulement.

a : la célérité du son.

- Subsonique le nombre de Mach ( $M < 1$ ) les perturbations de l'écoulement se propagent en amont et en aval de ce dernier.
- Transsonique ( $0,8 < M < 1,2$ ) qui présente des zones d'écoulement situe entre le régime subsonique et le régime supersonique.
- Supersonique ( $1 < M < 5$ ) dans ce cas les perturbations de l'écoulement ne peuvent pas se propager en amont. cet écoulement est aussi marqué par des zones de discontinuité (qui correspond aux ondes de choc).
- Hypersonique ( $M > 5$ ) : des ondes de choc très intenses et de très hautes températures près des parois.

# Chapitre I : Notion fondamentales de mécanique des fluides et d'aérodynamique

## 10.2. Formes géométriques des ailes

Plusieurs formes d'aile existent, comme les ailes droites, ailes elliptiques, ailes trapézoïdales pour le régime subsonique, ailes en flèche et en delta pour le régime supersonique, etc..... [2]

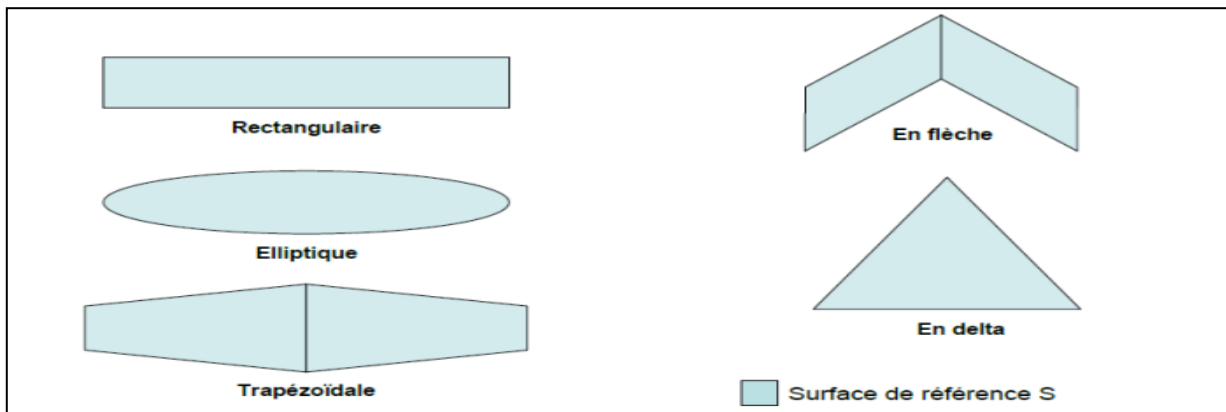
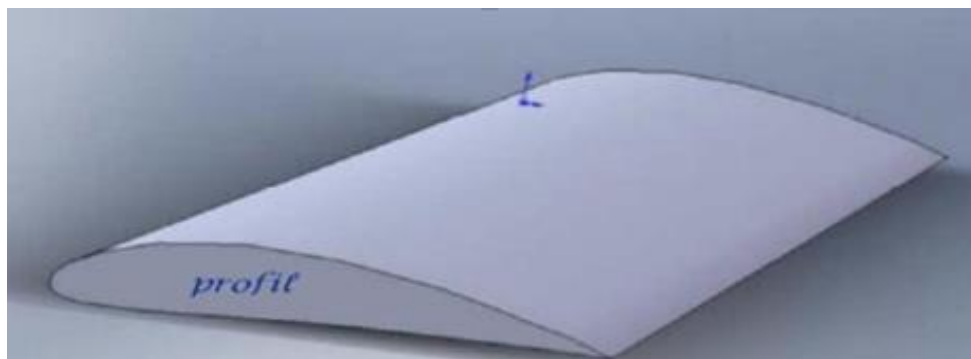


Figure 1. 3: Différentes formes d'aile d'Avion

## 11. Profil d'une aile d'avion

On peut définir un profil d'aile d'avion comme étant un obstacle profilé qui possède une faible traînée lorsque l'incidence n'est pas trop élevée mais par contre une portance notable.

Le profil d'une aile d'avion est conçu de telle sorte que l'écoulement d'air autour de l'aile engendre une force de portance, qui compense le poids de l'avion et lui permettra ainsi de voler.



Figure

1.

4: Profil d'aile

# Chapitre I : Notion fondamentales de mécanique des fluides et d'aérodynamique

## 12. Caractéristiques géométriques d'un profil

Un profil d'aile se caractérise en général par :

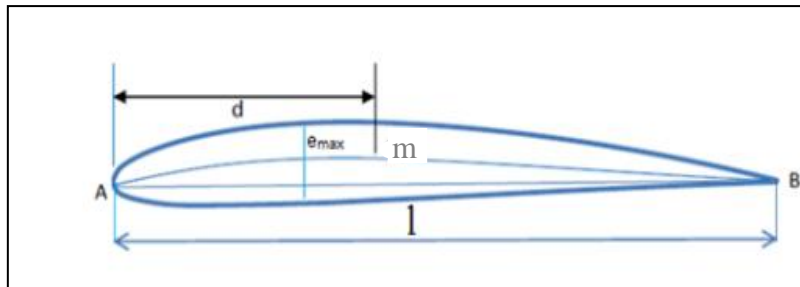


Figure 1. 5: Profil d'aile cambré

**A** : Bord d'attaque.

**B** : Bord de fuite.

**AB** : Corde de référence (c'est le segment joignant le bord de fuite au bord d'attaque).

**$l = AB$**  : Longueur de la corde ou profondeur du profil.

**e** : épaisseur maximale.

**$e/l$**  : épaisseur relative, c'est le rapport de l'épaisseur maximale et la corde.

**f** : flèche maximale qui caractérise la plus grande ordonnée de la ligne moyenne AMB par rapport à la corde AB.

**Squelette** : c'est le lieu géométrique des points équidistants de l'intrados et extrados.

**$d/l$**  : représente la position de la flèche.

**$f/l$**  : Cambrure relative ; c'est le rapport de la flèche maximale sur la longueur de la corde.

# Chapitre I : Notion fondamentales de mécanique des fluides et d'aérodynamique

$\lambda = b/l$ : Allongement relatif du profil ; le rapport de l'envergure sur la longueur de la corde.

## 13. Caractéristiques aérodynamiques d'un profil

Chaque corps plongé dans un fluide en mouvement reçoit de la part de ce dernier à des forces de viscosité d'une part, et des forces de pression d'autre part, l'ensemble de ces forces s'applique au centre de gravité du corps (l'aile).

### 12.1. Résultante Aérodynamique

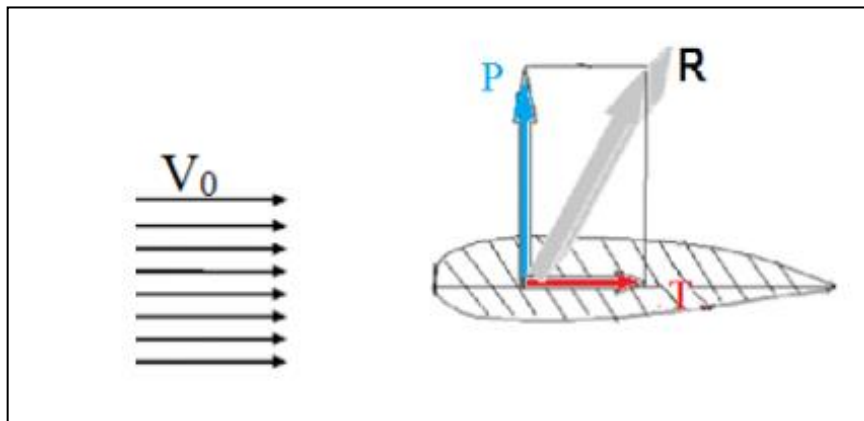


Figure 1.

*6:composantes de la résultante aérodynamique*

Avec :

P= la force de portance.

T= la force de traînée.

L'origine de cette force résultante est tout simplement La somme des forces de surpression intrados et de dépression extrados.[7]

## **Chapitre II : Ecoulement potentiel**

## Chapitre II : Écoulement potentiel

### 1. Introduction

Dans ce chapitre, nous rappelons l'essentiel sur les écoulements potentiels que nous utilisons par la suite dans notre étude théorique menant à la détermination d'un profil d'aile cambré de type Joukovski ainsi que ses différentes caractéristiques aérodynamiques.

### 2. Écoulement potentiel

Les écoulements irrotationnels et incompressibles caractérisent les écoulements potentiels. Autrement dit, un écoulement est appelé écoulement potentiel si son champ de vitesse dérive d'un potentiel. Ce champ de vitesse vérifie à la fois l'équation de continuité et l'irrotationnalité de l'écoulement.[8]

#### 2.3. Potentiel des vitesses- Écoulements irrotationnels

On dit qu'un champ de vitesse  $V(x, y)$  de composantes  $u(x, y)$  et  $v(x, y)$  dérive d'une fonction  $\phi(x, y)$ , appelée potentiel des vitesses, si ;

$$\vec{v} = \overrightarrow{\text{grad}} \phi \quad (\text{II.1})$$

D'où ;

$$u = \frac{\partial \phi}{\partial x} \text{ et } v = \frac{\partial \phi}{\partial y} \quad (\text{II.2})$$

$$\text{L'écoulement est irrotationnel si ; } \text{rot } \vec{V} = 0 \quad (\text{II.3})$$

Qui s'exprime par l'équation suivante ;

$$\frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial x} = 0 \quad (\text{II.4})$$

Tenant compte de la relation (II.1) dans (II.3), on en déduit ;

$$\text{rot } (\overrightarrow{\text{grad}} \phi) = 0 \quad (\text{II.5})$$

Qui vérifie bien l'équation (II.3), c'est-à-dire que l'écoulement est bien irrotationnel

## Chapitre II : Ecoulement potentiel

### 2.4. Fonction de courant

Considérons la fonction  $\Psi(x, y)$  définie dans un repère cartésien des composantes  $u(x, y)$  et  $v(x, y)$

$$\begin{cases} u = \frac{\partial \Psi}{\partial y} \\ v = -\frac{\partial \Psi}{\partial x} \end{cases} \quad (\text{II.6})$$

Cette fonction est appelée fonction de courant car elle vérifie l'équation de Laplace  $\Delta \Psi = 0$ .

### 2.5. Potentiel complexe

Soit :  $z \in \mathbb{C} : z = x + iy$

On définit le potentiel complexe  $f(z)$  de l'écoulement ;

$$f(z) = \phi(x, y) + i\Psi(x, y) \quad (\text{II.7})$$

### 2.6. Equations de continuité

On considère l'équation de conservation de la masse définie pour un fluide compressible par :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div } \rho \vec{v} = 0 \quad (\text{II.8})$$

Pour le cas d'un fluide incompressible pour lequel la masse volumique  $\rho$  est constante, l'équation (II.8) se réduit à l'équation de continuité définie par :

$$\text{div } \vec{v} = 0 \quad (\text{II.9})$$

Autrement dit :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (\text{II.10})$$

Par ailleurs, tenant compte de l'expression (I.1) du champ de vitesse dans la relation (1.9), on obtient :

## Chapitre II : Ecoulement potentiel

Qui signifie que le potentiel des vitesses  $\phi(x, y)$  vérifie l'équation de Laplace.

Ceci implique alors  $\exists \Psi(x, y, t)$  tel que :

$$\frac{\partial \Psi}{\partial x} dx + \frac{\partial \Psi}{\partial y} dy = u dy - v dx = d\Psi \quad (\text{II.12})$$

Les composantes  $u$  et  $v$  du champ de vitesse sont alors définie par :

$$\begin{cases} u = \frac{\partial \phi}{\partial x} = \frac{\partial \Psi}{\partial y} \\ v = \frac{\partial \phi}{\partial y} = -\frac{\partial \Psi}{\partial x} \end{cases} \quad (\text{II.13})$$

### 3. Ecoulement élémentaires

Nous nous limiterons ici aux quelques écoulement singulier (ou écoulement élémentaires) que nous sommes appelés à utiliser.

#### 3.1. Ecoulements uniforme

Si,  $a$  et  $b$  étant des constantes quelconques, on a :

$$f(z) = az + b \quad (\text{II.14})$$

$$\text{Avec : } \frac{df}{dz} = a$$

On pose  $a = v_0$  représente l'amplitude d'une vitesse uniforme.

## Chapitre II : Écoulement potentiel

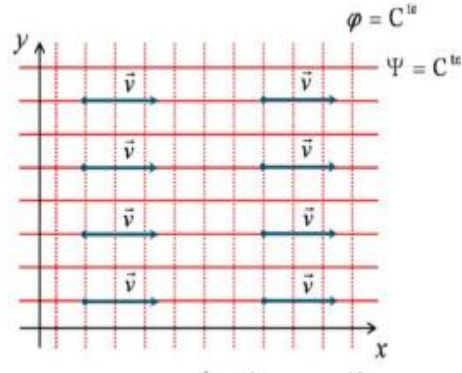


Figure 2. 1:Écoulement uniforme.

- **Doublet**

On pose :  $z = r e^{i\theta}$

$$f(z) = -\frac{k}{2\pi z} = -\frac{k}{2\pi r} e^{-i\theta} \quad (\text{II.17})$$

$$f(z) = -\frac{k}{2\pi r} (\cos\theta - i \sin\theta)$$

$$f(z) = \Phi(r, \theta) + i\Psi(r, \theta)$$

$$\begin{cases} \Phi(r, \theta) = -\frac{k}{2\pi r} \cos\theta \\ \Psi(r, \theta) = \frac{k}{2\pi r} \sin\theta \end{cases}$$

Où  $k$  représente l'intensité du doublet :

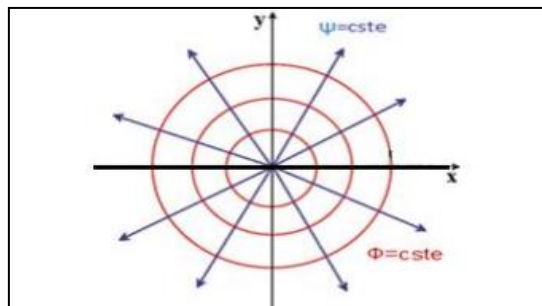


Figure 2. 2:Écoulement de type doublet placé à l'origine.

## Chapitre II : Écoulement potentiel

### 3.2. Sources et Puits ( $D > 0$ ; $D < 0$ )

$$f(z) = \frac{D}{2\pi} \log(z) \quad (\text{II.15})$$

Avec :  $z = re^{i\theta}$

$D$  : est le débit par unité de longueur.

$$\begin{aligned} f(z) &= \frac{D}{2\pi} \log(r) + i \frac{D}{2\pi} \theta \\ &= \phi(r, \theta) + i \Psi(r, \theta) \\ &= \begin{cases} \phi(r, \theta) = \frac{D \log r}{2\pi} \\ \Psi(r, \theta) = \frac{D}{2\pi} \theta \end{cases} \end{aligned} \quad (\text{I.16})$$

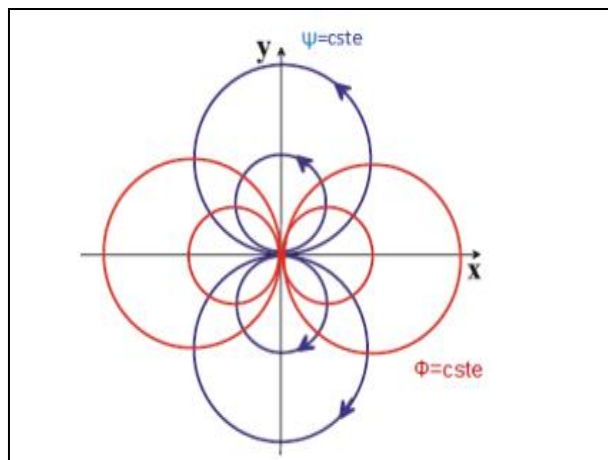


Figure 2. 3: Écoulement de type source.

Par la superposition de ces deux écoulements potentiels « source et puits » on obtient un autre.

## Chapitre II : Ecoulement potentiel

### 4. Superposition des écoulements potentiels

La superposition d'écoulements potentiels est une méthode pour construire des écoulements complexes à partir d'écoulements élémentaire simples. Elle consiste à additionner les potentiels complexes des vitesses des différents écoulements pour obtenir un nouveau potentiel complexe décrivant un écoulement résultant [8]

#### 4.1. Résumé des flux potentiels de base plans

Type d'écoulement	Vitesse	Fonction potentiel	Fonction de courant
Écoulement uniforme, $ox$	$u = U_{\infty}$ $v = 0$	$\Phi(x, y) = u_{\infty}x$	$\Psi(x, y) = u_{\infty}y$
Écoulement autour d'une source	$v_r = \frac{q_v}{2\pi r}$ $v_{\theta} = 0$	$\Phi(r, \theta) = \frac{q_v}{2\pi} \ln r$	$\Psi(r, \theta) = \frac{q_v}{2\pi} \theta$
Écoulement autour d'un puits	$v_r = \frac{-q_v}{2\pi r}$ $v_{\theta} = 0$	$\Phi(r, \theta) = -\frac{q_v}{2\pi} \ln r$	$\Psi(r, \theta) = -\frac{q_v}{2\pi} \theta$
Écoulement avec circulation	$V_r = 0$ $v_{\theta} = \frac{\Gamma}{2\pi r}$	$\Phi(r, \theta) = -\frac{\Gamma}{2\pi} \theta$	$\Psi(r, \theta) = \frac{\Gamma}{2\pi} \ln r$

## **Chapitre III : Transformation conforme**

# Chapitre III : Transformation conforme

## 1. Introduction

Les transformations conformes permettent de passer d'un domaine géométrique complexe à un domaine plus simple, tout en préservant les angles et les relations de similitude. Cela facilite l'application de méthodes analytiques et numériques pour résoudre des équations différentielles, notamment celles liées à la mécanique des fluides et à la mécanique des solides. Dans ce chapitre on va étudier les transformations d'un cercle.

## 2. Transformation d'un cercle en un plan

Avec la transformation de Joukowski on peut transformer un cercle en un plan et pour cela on utilise l'écoulement connu autour d'un cercle.

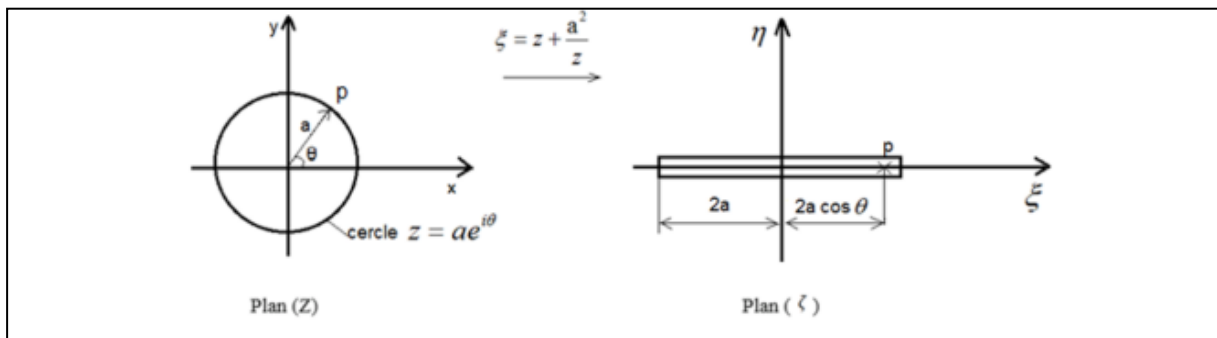


Figure 3. 1: transformation d'un cercle en un plan.

Pour  $r=a$ ,  $\xi = 2a$  et  $\eta = 0$ ,  $\theta$  varie de  $0$  à  $\pi$  et le point  $p$  (dans le plan  $\xi$ ) se déplace de  $+2a$ ,  $-2a$ . La corde de ligne droite a la valeur  $4a$ . Calculons la vitesse complexe dans le plan  $\zeta$  d'après l'équation suivante : [4]

$$w_{\zeta} = \frac{df}{dz} \frac{dz}{d} = \frac{W(Z)}{\zeta'(Z)} \quad (\text{III.1})$$

$$w_{\zeta} = \frac{W(Z)}{\zeta'(Z)} \quad (\text{III.2})$$

### Chapitre III : Transformation conforme

Ou

$$\zeta'(z) = 1 - \frac{a^2}{z^2} \quad (\text{III.3})$$

Dans le cas du cylindre sans circulation, l'équation du potentiel complexe correspond à :

$$f_0(z) = v_0 \left( z + \frac{a^2}{z} \right) \quad (\text{III.4})$$

Pour étudier l'écoulement autour d'une plaque plane placée à un angle d'incidence  $\alpha$ , on utilise l'expression suivante :

$$f(z) = v_0 \left( z e^{-i\alpha} + \frac{a^2}{z} e^{i\alpha} \right) \quad (\text{III.5})$$

À la surface du cylindre à  $z = a e^{i\theta}$ , on a alors :

$$w(z) = v_0 (e^{-i\theta} - e^{i\theta - 2i\theta}) \quad (\text{III.6})$$

Donc :

$$w_\zeta = (e^{-i\theta} - e^{i\theta - 2i\theta}) \frac{v_0}{1 - e^{-2i\theta}} \quad (\text{III.7})$$

En faisant appel à l'identité :

Et à des relations trigonométriques élémentaires, on a :

$$w_\zeta = \frac{v_0}{2 \sin^2 \theta} [\cos \alpha - \cos (\alpha - 2\theta)] \quad (\text{III.9})$$

Si on utilise la relation :

$$\cos \alpha - \cos (\alpha - 2\theta) = 2 \sin^2 \theta \cos \alpha - 2 \sin \alpha \sin \theta \cos \theta \quad (\text{III.10})$$

Donc la vitesse complexe devient :

## Chapitre III : Transformation conforme

$$w_{\zeta}(\zeta) = v_0 \cos \alpha + \frac{v_0}{2 \sin \alpha} [-2 \sin \alpha \cos \alpha] \quad (\text{III.11})$$

Avec :

$$\begin{cases} \zeta = 2a \cos \theta \\ \eta = 0 \end{cases} \quad (\text{III.12})$$

### 3. Transformation d'un cercle en un profil symétrique

Un déplacement du centre du cercle sur l'axe des réels négatifs engendre un profil symétrique dont le bord d'attaque est arrondi et d'épaisseur finie grandissant lorsque le centre du cercle s'éloigne de l'origine.

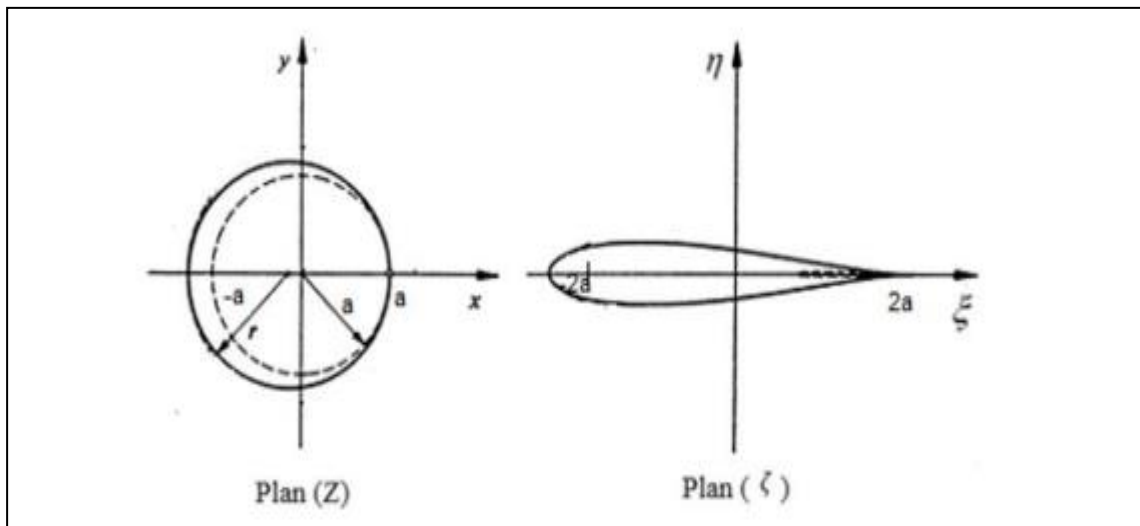


Figure 3. 2: Transformation d'un cercle en un profil symétrique.

### 4. Transformation d'un cercle en un arc

Un déplacement du centre du cercle sur l'axe des ordonnées permet d'introduire un effet de cambrure d'autant plus grand que le centre s'éloigne de l'origine, on obtient alors un profil sous forme d'un arc de cercle d'épaisseur nulle.[4]

### Chapitre III : Transformation conforme

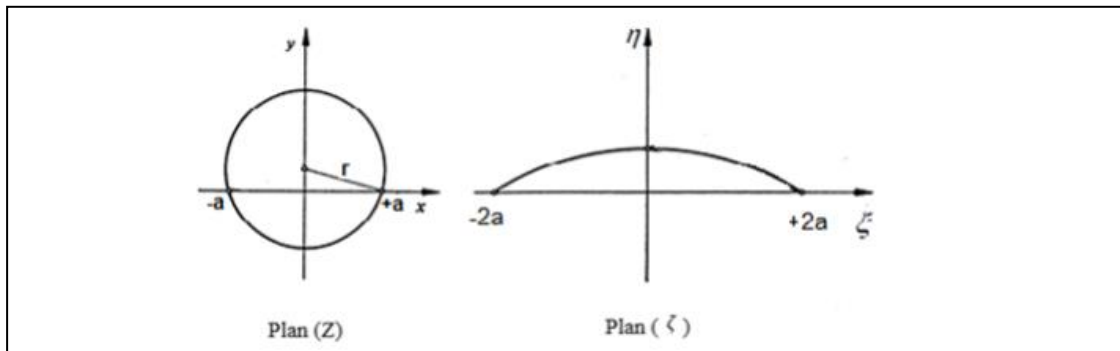


Figure 3. 3/Transformation d'un cercle en un arc de cercle.

#### 5. Transformation d'un cercle en un profil cambré

Pour obtenir un profil cambré on utilise les deux transformations obtenues précédemment (Un profil symétrique et un arc de cercle).

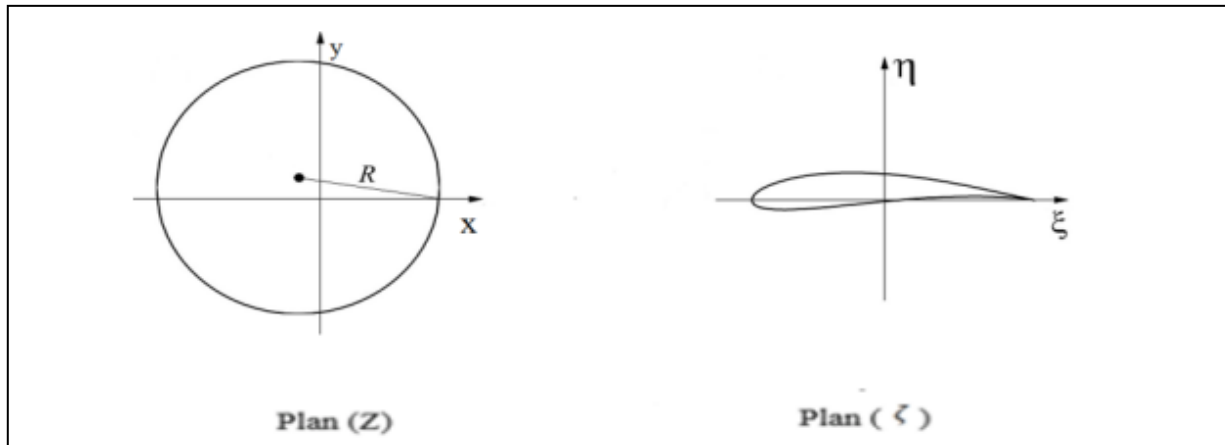


Figure 3. 4:Transformation d'un cercle en un profil cambré

#### Lignes de courant :

Une ligne de courant 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  $V(x, y, z, t)$  à l'instant  $t$ . L'ensemble des

## Chapitre III : Transformation conforme

lignes de courant peut évoluer au cours du temps. L'équation de la ligne de courant s'obtient en résolvant les équations différentielles suivantes :

$$\frac{dx}{v_x} = \frac{dy}{v_y} = \frac{dz}{v_z} \quad (\text{III.13})$$

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

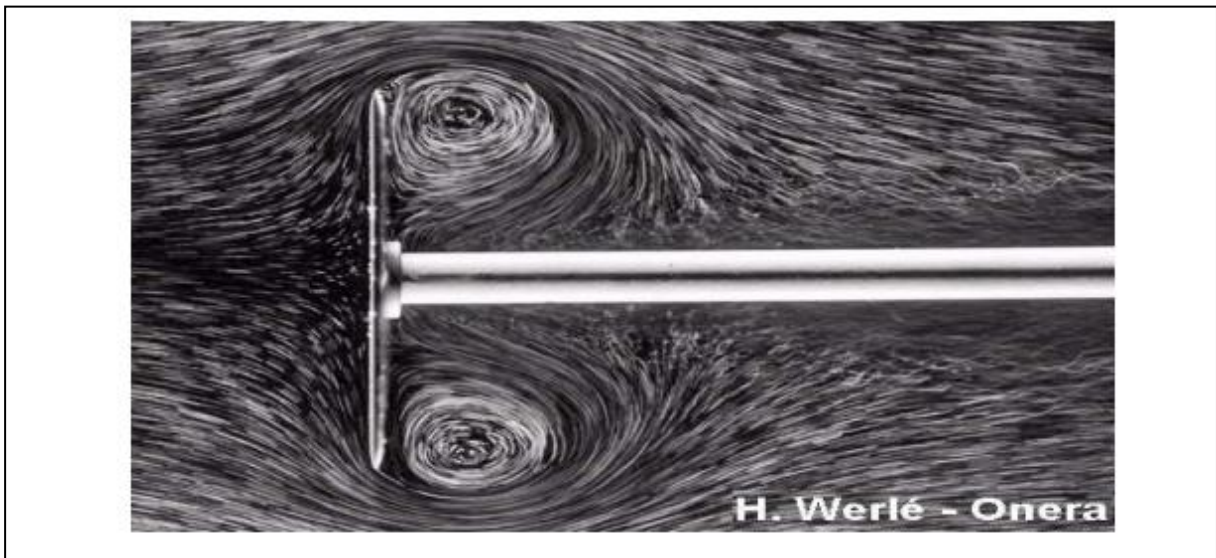


Figure 3. 5: Visualisation des lignes d'écoulement.

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  $\Delta S$ .

## Chapitre III : Transformation conforme

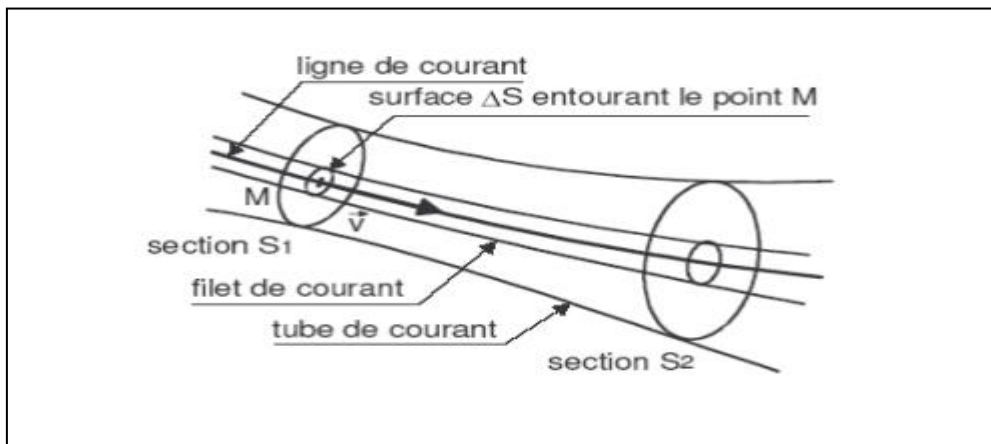


Figure 3. 6: Filet et tube de courant.

### Équation de continuité :

On considère l'équation de conservation de la compressible par :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div} \rho \vec{V} = 0 \quad (\text{III.14})$$

Pour le cas d'un fluide incompressible pour lequel la masse volumique  $\rho$  est constante, l'équation (I.1) se réduit à l'équation de continuité définie par :

$$\text{div} \vec{V} = 0 \quad (\text{III.15})$$

Autrement dit :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (\text{III.16})$$

Par ailleurs, tenant compte de l'expression  $\vec{V} = \overrightarrow{\text{grad}} \phi$  du champ de vitesse dans la relation (I.15) on obtient :

$$\text{div} \vec{V} = \Delta \phi = 0 \quad (\text{III.17})$$

Qui signifie que le potentiel des vitesses  $\phi(x, y)$  vérifie l'équation de Laplace. Ceci implique alors  $\exists \Psi(x, y, t)$  tel que :

### Chapitre III : Transformation conforme

$$\frac{\partial \Psi}{\partial x} dx + \frac{\partial \Psi}{\partial y} dy = u dy - v dx = d\Psi \quad (\text{III.18})$$

Les composantes  $u$  et  $v$  du champ de vitesse sont alors définies par :

$$\begin{cases} u = \frac{\partial \phi}{\partial x} = \frac{\partial \Psi}{\partial y} \\ v = \frac{\partial \phi}{\partial y} = -\frac{\partial \Psi}{\partial x} \end{cases} \quad (\text{III.19})$$

$\phi$  et  $\Psi$  vérifient les relations de Cauchy

## **Chapitre IV : Partie Expérimentale**

## Chapitre IV : Partie Expérimentale

### Travail réalisé

Notre travail consiste à appliquer la transformation conforme sur un cercle de rayon **R =20mm** en vue à obtenir un profil d'aile.

Ce profil est cambré d'épaisseur **e=2mm** et de longueur **a=160mm**. Le type de transformation utilisé dans ce travail est celle de **JOUKOWSKI**.

Avec :  **$x_0=1mm, y_0=0mm$**

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

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

En faisant varier  $\alpha$  de 0 rad à 6,28rad on aura le tableau suivant

$\alpha$ (rad)	$x$ (cm)	$Y$ (cm)
0,1	79,9847	-0,2049
0,6	66,2981	-0,1117
1,2	29,3461	0,0896
1,8	-17,7972	0,2980
2	-32,9732	-0,3846
2,6	-68,6105	-0,4833
3,6	-72,1813	0,2130

## Chapitre IV : Partie Expérimentale

4,5	-16,6461	0,6581
5,1	30,8743	0,3712
6	77,3358	-0,1615
6,25	102,0445	-0,0472

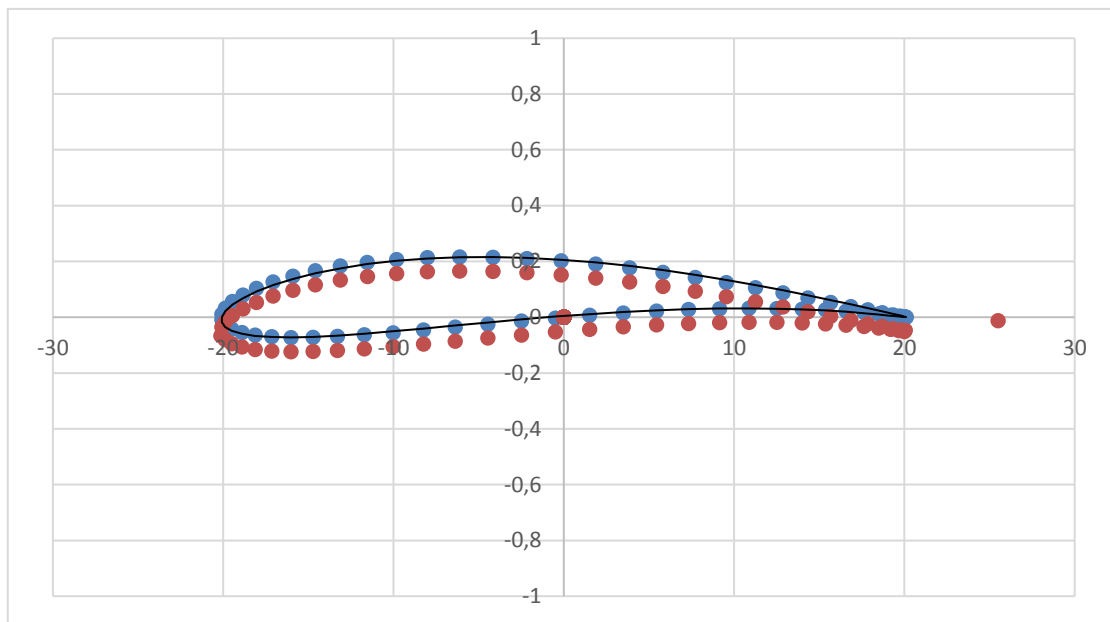


Figure 4. 1:L'aile cambré

Ensuite on place ce profil dans un appareil de visualisation des lignes de courant :

## Chapitre IV : Partie Expérimentale

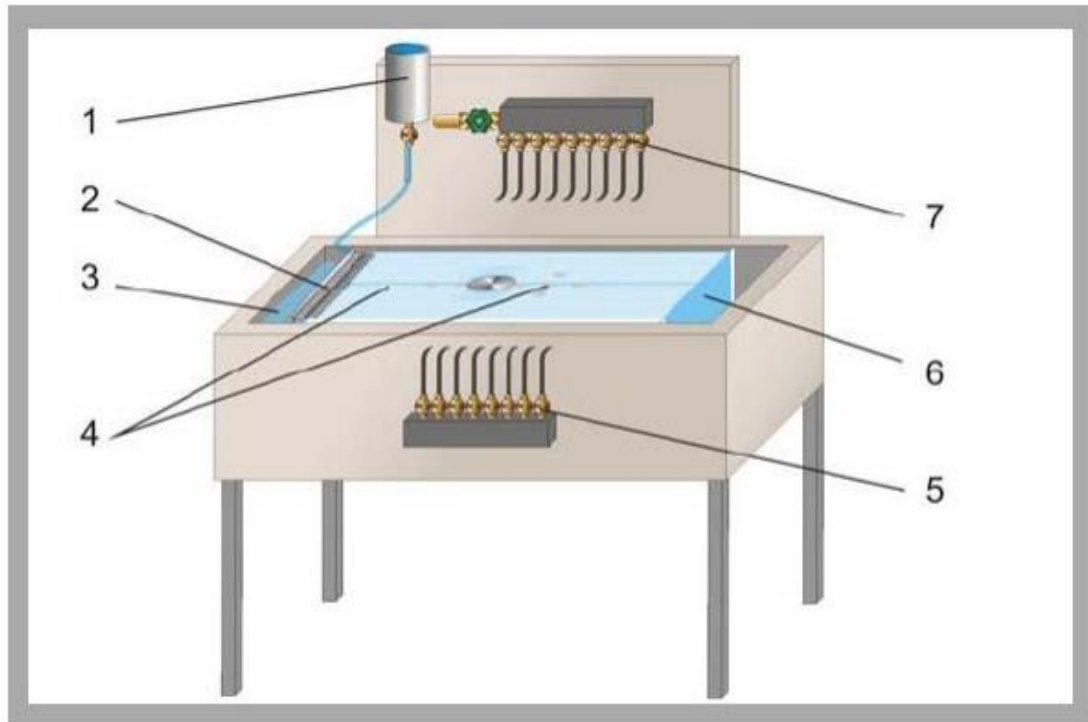


Figure 4. 2:Le banc d'essai

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

2 : Tubes d'injection de l'encre.

3 : Arrivée d'eau.

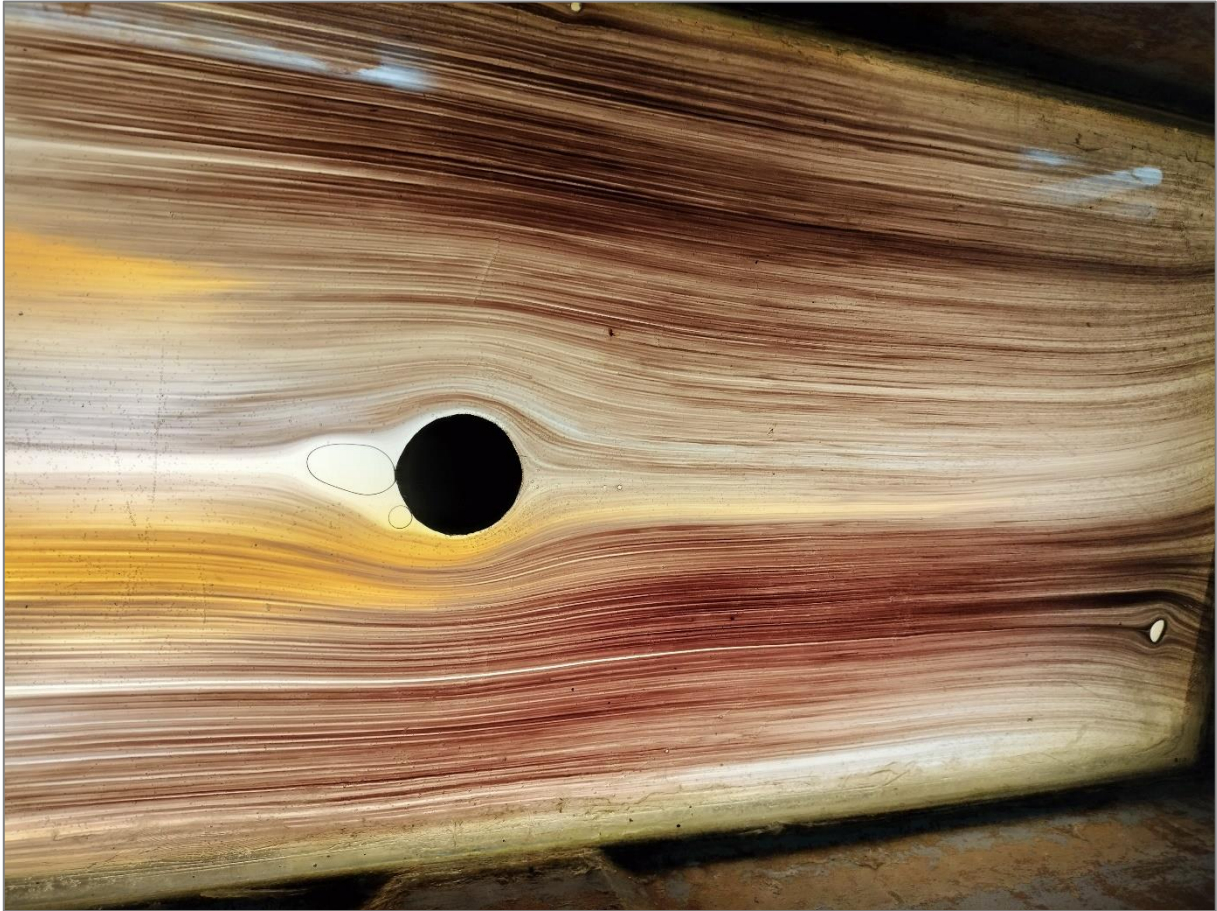
4 : Deux plaques en verre de 5mm d'épaisseur

5 : Soupapes pour puits

6 : Sortie d'eau.

7 : Soupapes pour sources

## Chapitre IV : Partie Expérimentale



*Figure 4. 3: Visualisation des lignes de courant autour d'un cercle.*

La visualisation des lignes de courant autour d'un cercle est une manière d'étudier le comportement d'un fluide en mouvement autour d'un objet. Dans un fluide idéal, les lignes de courant représentent les trajectoires suivies par les particules de fluide.

### **Explication :**

**Concept des lignes de courant :** Les lignes de courant sont des courbes qui montrent la direction du mouvement du fluide à chaque point. À un instant donné, elles ne se croisent pas, ce qui signifie qu'un fluide ne peut pas avoir deux vitesses différentes au même endroit.

**Cercle et écoulement :** Lorsque le fluide s'écoule autour d'un cercle (par exemple, un obstacle circulaire dans un fluide), les lignes de courant vont se courber autour de l'objet. Avant

## Chapitre IV : Partie Expérimentale

d'atteindre le cercle, les lignes de courant sont généralement parallèles. À l'approche du cercle, elles commencent à se déformer, créant des courbures.

**Effet de l'obstacle** : En raison de la présence du cercle, les lignes de courant se rapprochent et s'accélèrent sur le dessus de l'objet, créant une zone de faible pression. À l'arrière du cercle, les lignes de courant s'écartent, ce qui peut mener à des turbulences.

**Importance** : Cette visualisation est essentielle en mécanique des fluides, notamment pour comprendre des phénomènes comme la traînée, la portance et l'écoulement Spalart-Allmaras versus turbulent. Elle est aussi utilisée dans de nombreux domaines d'ingénierie, comme l'aérodynamique et l'hydrodynamique.

-8En résumé, les lignes de courant autour d'un cercle illustrent comment le fluide s'adapte à la présence d'un obstacle, ce qui aide à prédire son comportement et à optimiser la conception d'objets dans un fluide.



## Chapitre IV : Partie Expérimentale



Figure 4. 4: Visualisation des lignes de courant autour d'un profil cambrai

La visualisation des lignes de courant autour d'un ail de Cambrai (ou "ail" en général, qui fait référence à une forme d'obstacle en mécanique des fluides) peut être intéressante pour observer comment le fluide interagit avec cet obstacle.

### **Explication :**

➤ **Définition de l'aile de Cambrai :** Dans ce contexte, un aile de Cambrai peut être vu comme un obstacle en forme de forme arrondie ou de profil allongé. Cela influence la manière dont le fluide s'écoule autour de lui.

➤ **Lignes de courant :** Comme avec le cercle, les lignes de courant autour de l'aile de Cambrai vont montrer comment le fluide s'écoule. Avant d'atteindre l'ail, les lignes de courant sont généralement parallèles. À l'approche de l'aile, elles vont se déformer.

➤ **Effets d'écoulement :**

- **À l'avant de l'aile :** Les lignes de courant se rapprochent, indiquant une augmentation de la vitesse du fluide à mesure qu'il s'approche de l'aile.
- **Sur les côtés :** Les lignes de courant s'écartent, et on peut observer une zone de recirculation à l'arrière, où le fluide peut devenir turbulent.

## Chapitre IV : Partie Expérimentale

- **Visualisation des pressions** : Cette configuration crée des différences de pression. À l'avant, il y a une pression plus élevée, tandis qu'à l'arrière, elle est plus basse, ce qui peut influencer la traînée sur l'objet.
- **Applications pratiques** : Cette visualisation est utile dans l'étude de la dynamique des fluides, par exemple, pour concevoir des éléments en ingénierie (comme des voitures ou des avions) qui minimisent la résistance à l'air ou à l'eau.

En résumé, en observant les lignes de courant autour d'un ail de Cambrai, on peut mieux comprendre comment le fluide se déplace et interagit avec des formes particulières, ce qui est essentiel pour optimiser le design d'objets dans un environnement fluide.

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

$$T=25C^{\circ}$$

$$\mu = 0.893 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

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

$$S = 5.7 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$Re = \frac{\rho LV}{\mu}$$

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

$$v = \frac{Q}{\rho * S}$$

On a aussi

**Q** : Le débit massique.

**V** : Vitesse d'écoulement.

**S** : La section de passage.

**L** : Longueur caractéristique (de référence)

## Chapitre IV : Partie Expérimentale

$\rho$  : Masse volumique

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

$Q_m$ (Kg/S)	$V$ (m/s)	Re
0,093	0,1631	29204,92
0,067	0,1175	21052,63
0,134	0,2350	42105,26

Tableau IV. 1 : Valeurs de la vitesse en fonction de Nombre de Reynolds

## Chapitre V : Partie numérique

# Chapitre V : Partie numérique

## 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 obtenu par la transformation de **JOUKOWSKI** qui est fixe et non symétrique. Nous nous intéresserons à l'évolution de la vitesse et de la pression ainsi qu'aux 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 meilleur comme **ANSYS FLUENT**.

**ANSYS** : Le Workbench permet la gestion des fichiers et le lancement de nombreuses applications logicielles à partir d'une seule fenêtre. La fenêtre principale de Workbench est l'endroit où les fichiers sont créés, les programmes sont lancés et les interactions entre les différents programmes utilisés pour la géométrie, le maillage, la simulation précise et le post-traitement sont gérés.[9]

Les étapes citées ci-dessous ont été suivies pour faire notre simulation numérique en utilisant ANSYS Fluent :

- Création de la géométrie sous le logiciel Design Modeler.
- Création du maillage avec le logiciel ANSYS Meshing.
- Définition du problème sous le logiciel ANSYS FLUENT.
- Calcul avec ANSYS FLUENT pour les différents cas retenus.
- Analyse des résultats obtenus.

### 2.1. Création de la géométrie sous le logiciel Design Modeler

La partie géométrie sur la plateforme ANSYS est essentielle pour la modélisation précise des composants et des systèmes. Elle permet de créer, importer et manipuler des formes géométriques complexes pour les simulations. En définissant correctement la géométrie, on établit les bases nécessaires pour des analyses précises et fiables dans ANSYS

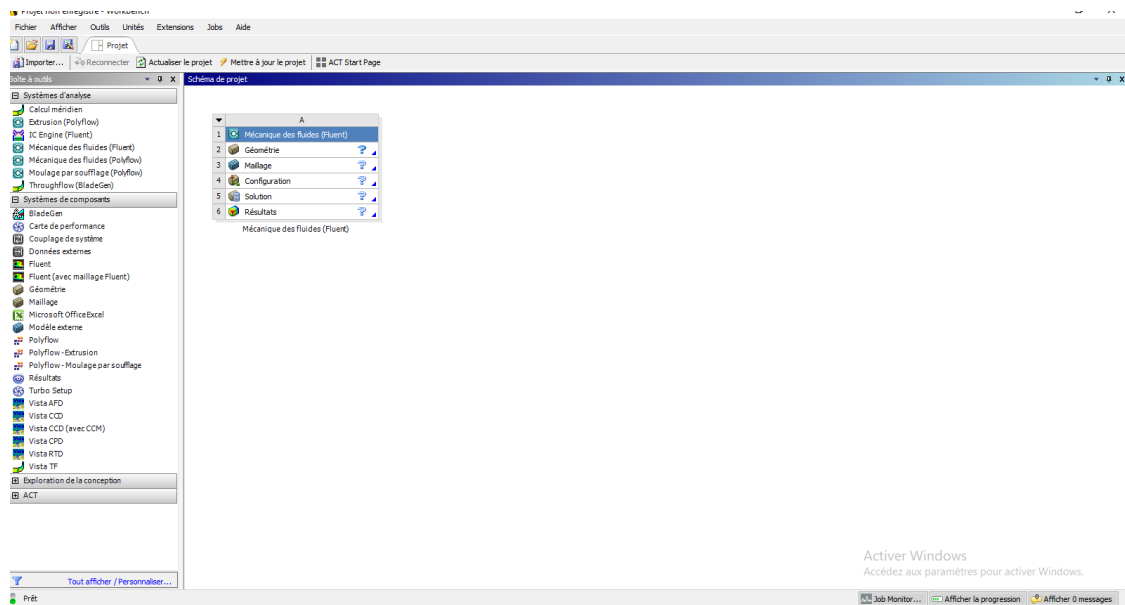


Figure 5. 1: la partie géométrie sur la plateforme ANSYS

### 2.2. Création du maillage

La partie de maillage sur la plateforme ANSYS est cruciale pour préparer la géométrie à la simulation en divisant le domaine en éléments plus petits. Un maillage de haute qualité est essentiel pour obtenir des résultats précis lors de l'analyse. En définissant un maillage adéquat, on assure une représentation fidèle de la géométrie pour des simulations efficaces et fiables dans ANSYS.[9]

## Chapitre V : Partie numérique

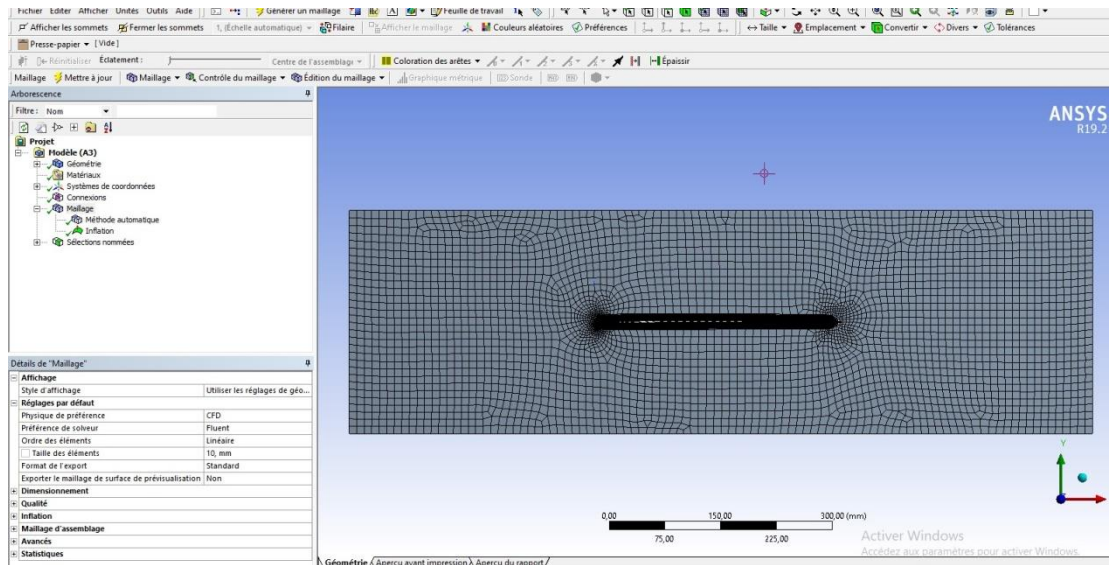


Figure 5. 2 : partie du maillage sur la plateforme

### 2.3. Définition du problème sous le logiciel ANSYS

#### FLUENT

Définition de problème sur la plateforme ANSYS est importante pour paramétrer correctement les simulations. En définissant les conditions aux limites, les modèles d'écoulement et les options de calcul, on s'assure d'obtenir des résultats précis et significatifs. La configuration joue un rôle clé dans la qualité et la pertinence des analyses réalisées dans ANSYS.[9]

# Chapitre V : Partie numérique

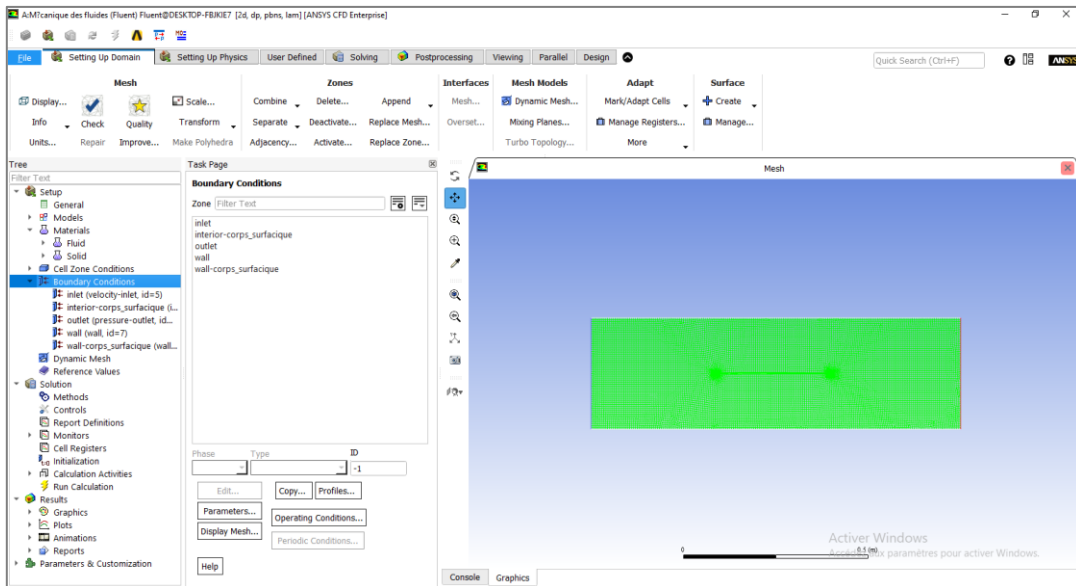


Figure 5. 3 : la partie de configuration sur la plateforme ANSYS

## 2.4. Calcul avec ANSYS FLUENT pour les différents cas retenus

La partie solution sur la plateforme ANSYS est cruciale pour résoudre numériquement les équations liées à la simulation. En lançant la solution, ANSYS calcule les résultats de l'analyse en fonction des paramètres configurés. Cette étape permet d'obtenir des données précieuses pour interpréter et comprendre le comportement des systèmes modélisés.

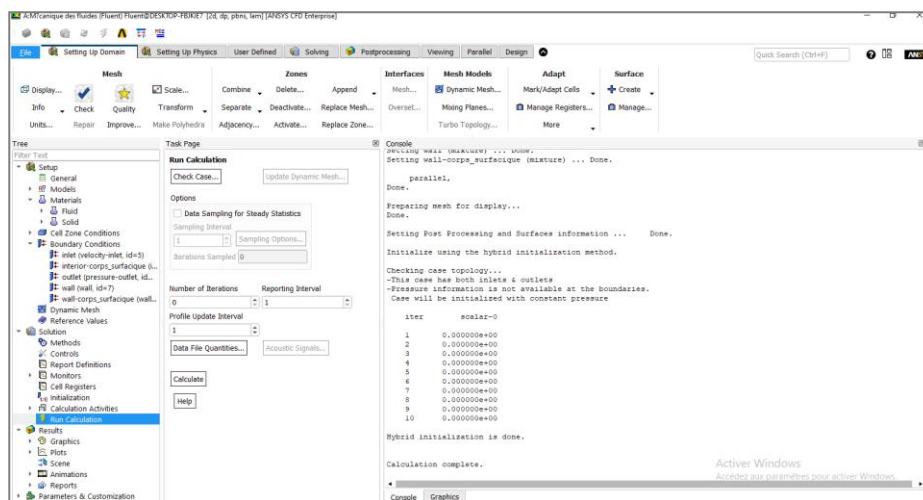


Figure 5. 4 : la partie solution sur la plateforme ANSYS

## 2.5. Analyse des résultats obtenus

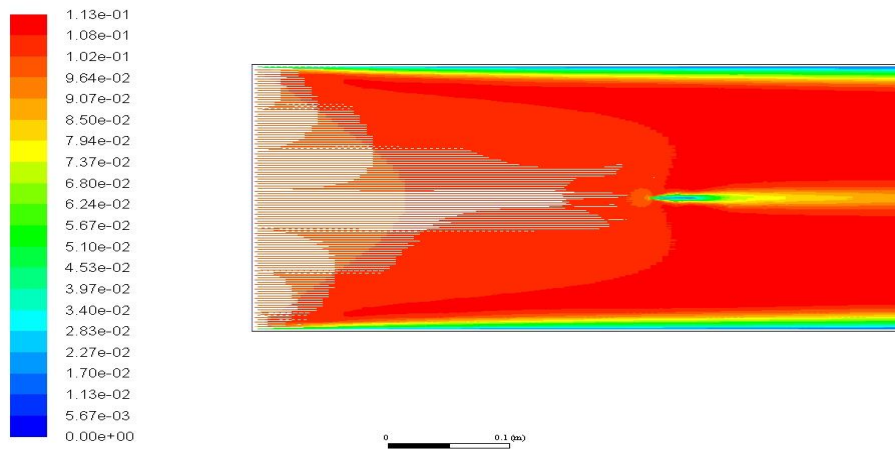


Figure 5. 5 : résultat des lignes de courant dans la plateforme ANSYS

### ❖ 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.

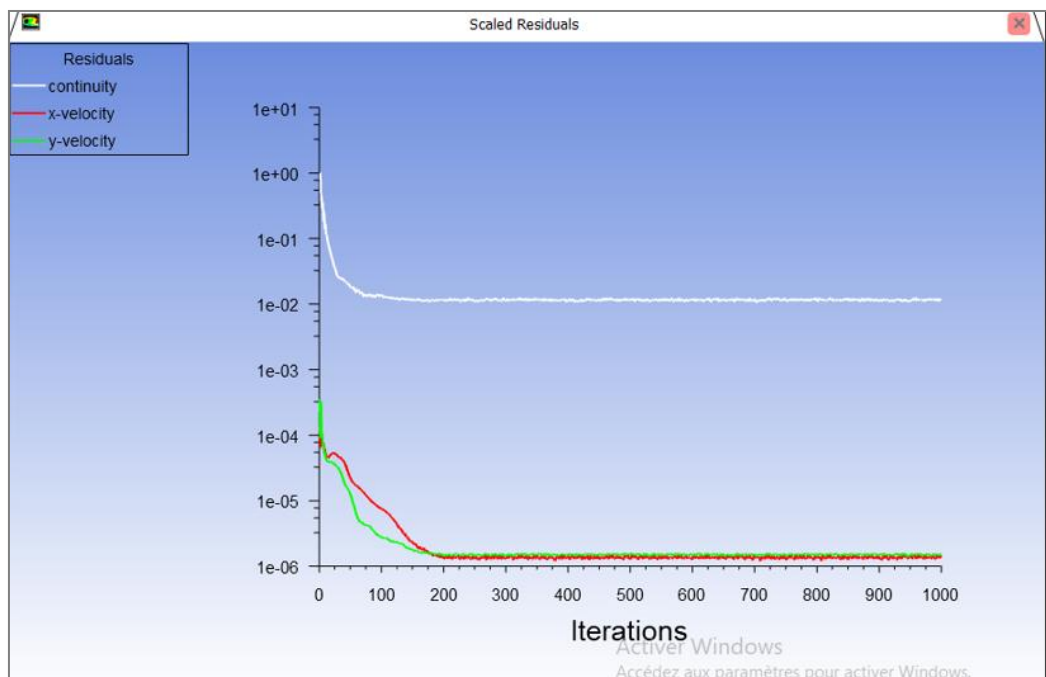


Figure 5. 6: courbe de convergence des résidus

## Chapitre V : Partie numérique

### ❖ Orientation des vecteurs vitesses autour de profil

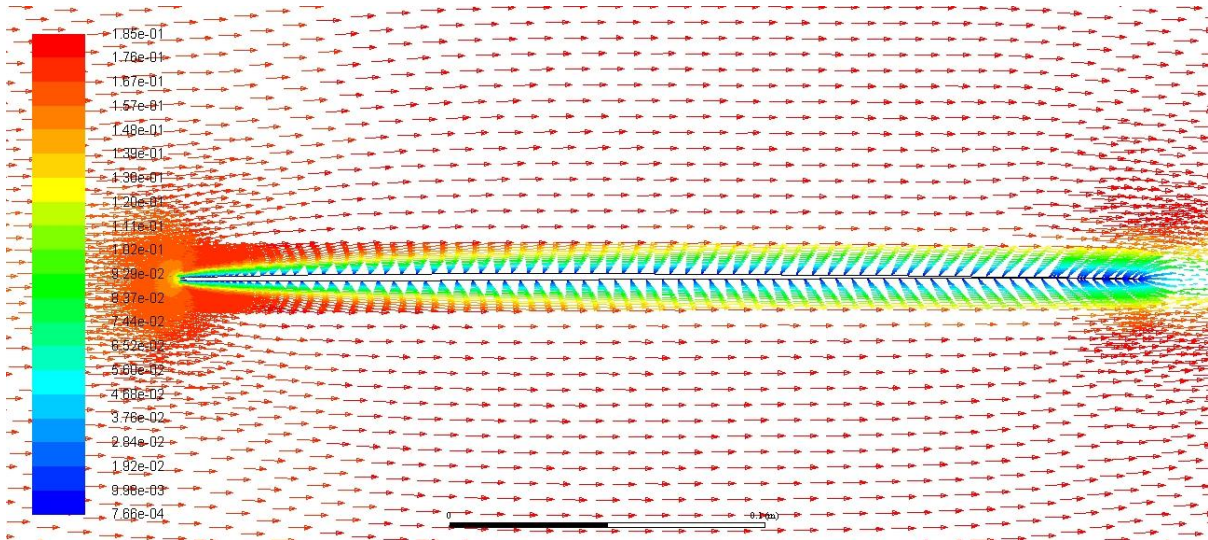


Figure 5.7: orientations des vecteurs vitesse

### ❖ Distribution de la pression autour du profil

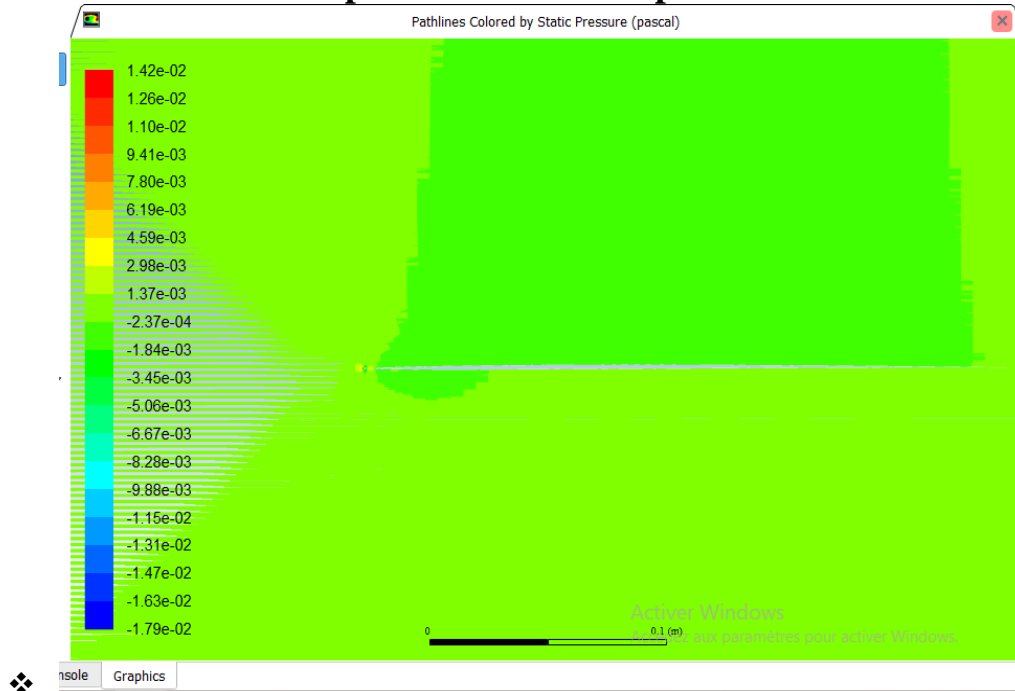


Figure 5.8 : distribution de la pression autour du profil

## Chapitre V : Partie numérique

### ❖ Distribution de vitesse autour du profil

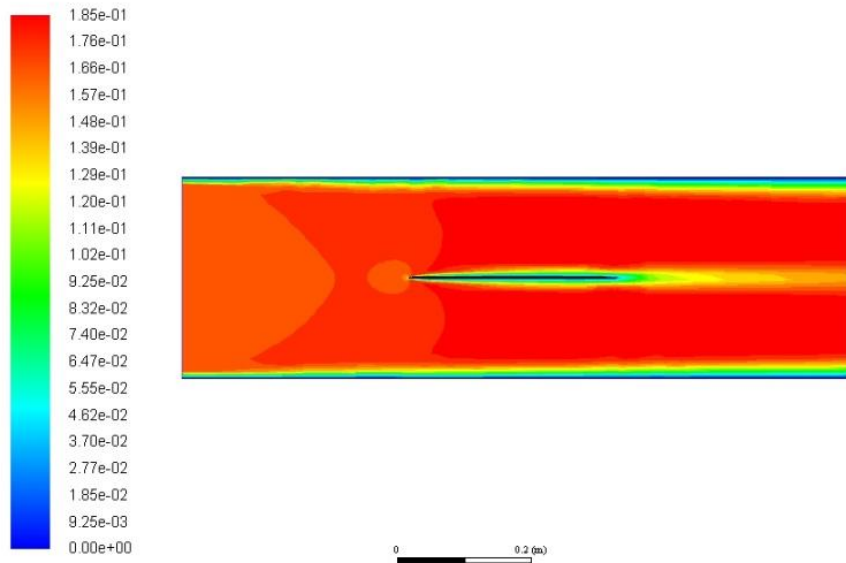


Figure 5. 9: distribution de vitesse autour du profil

### ❖ Ligne de courant autour du profil

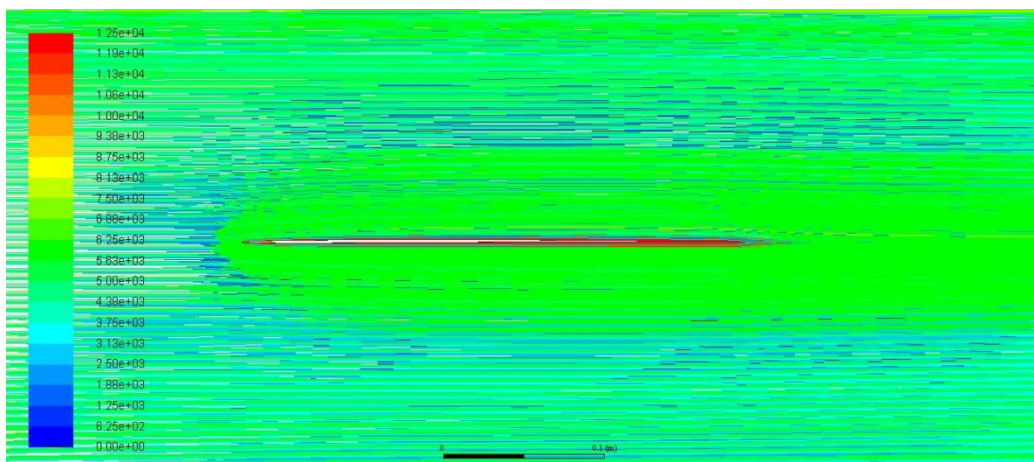


Figure 5. 10 : ligne de courant autour du profil

## Chapitre V : Partie numérique

### ❖ Evolution de la vitesse

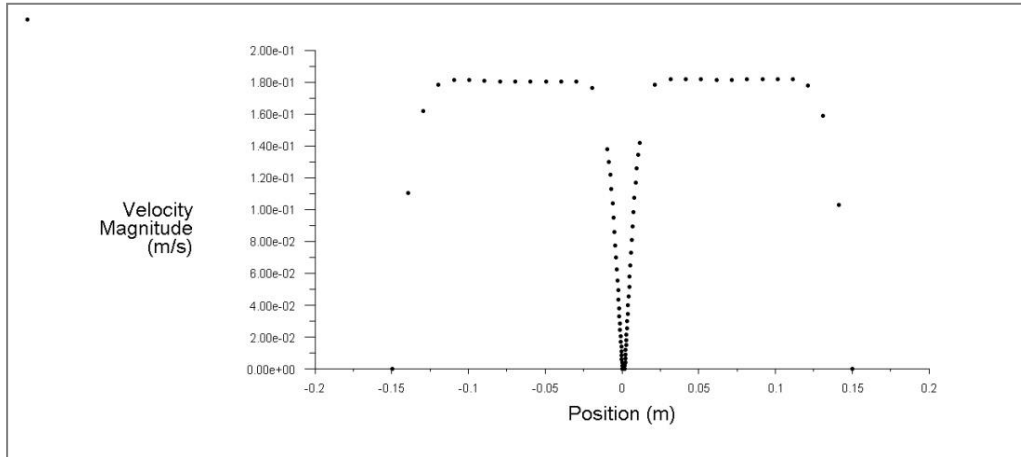
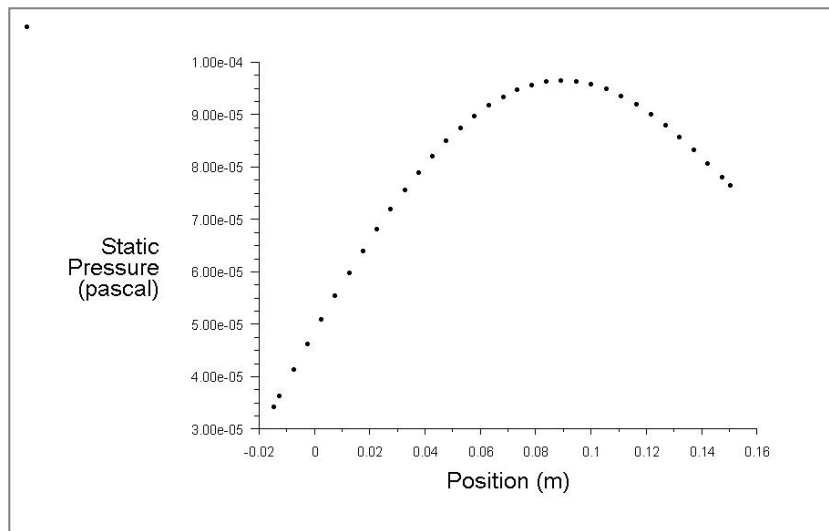


Figure 5.11 : évolution de la vitesse

La figure 5.11 montre que la variation de la pression statique dans la couche limite est relativement faible ce qui justifie  $\frac{\partial p}{\partial y} = 0$  .y étant l'axe perpendiculaire à la face de l'aile.

### ❖ Evolution de la Pression



*Figure 5.12 : évolution de la pression*

La figure 5.12 montre l'évolution de la vitesse suivant la direction orthogonale par rapport à un élément du profil de l'aile. On constate que tout proche du profil celle-ci est nulle à cause de l'adhérence de fluide. En revanche plus loin, elle est égale à la vitesse du fluide.

# Conclusion générale

## Conclusion générale

Le travail effectué dans le cadre de ce mémoire est à la fois empirique et numérique. La partie expérimentale a pour objectif d'observer les lignes de courant autour de l'aile plane. Le profil de cette aile est obtenu par la transformation conforme de Joukowski, à partir d'un cercle de rayon  $r$  centré en dehors du centre du repère du plan primitif. Pour retrouver la forme du profil de l'aile, un programme a été développé à cet effet.

Un modèle en matière plastique a ensuite été réalisé, conformément aux dimensions géométriques obtenues par la transformation mentionnée ci-dessus. Ce modèle a été placé dans un écoulement permettant de visualiser les lignes de courant.

Sur le plan numérique, la géométrie de l'aile a été introduite dans le logiciel de calcul Fluent, grâce à son module de modélisation géométrique. Le maillage a été effectué avec soin afin de capturer les détails de l'écoulement.

Les résultats obtenus par la simulation et l'expérience semblent être identiques. Toutefois, les résultats numériques révèlent davantage de détails. Très près du profil de l'aile, la couche limite est bien visible, et on y observe une diminution de la vitesse, qui tend à s'annuler au contact. En revanche, la pression reste quasiment constante le long de la transversale de la couche limite, ce qui justifie la seconde hypothèse de Blasius,  $\frac{\partial P}{\partial y} = 0$ . Cette couche limite, qui joue un rôle important en aérodynamique, ne peut pas être visualisée avec les moyens dont dispose notre laboratoire. Des techniques comme l'anémométrie à film chaud ou le laser sont nécessaires pour cela.

## Références

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

[2] : Didane .L mémoire master « simulation numérique de l'écoulement d'un fluide réel incompressible autour d'un profil d'aile »

[3] : Hamide Arastoopour, and al livre « Transport Phenomena par Bird, Stewart et Lightfoot ».

[4] : J.Bouttier, Transformations Conforme Et Hydrodynamique, (08/11/2010).

[5] : Riadh BEN HAMOUDA. © Centre de Publication Universitaire, Tunis 2008 :Notion de Mécanique des Fluides.

[6] : RIADH Ben Hamouda, « Notions de mécanique des fluides», Centre de publication universitaire, Tunis, 2008.

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

[8] : SAMIR Khene, « Mécanique des fluides»,publications de l'université Badji Mokhtar, Annaba, 2000

[9] :S.candel "mécanique des fluides" code 042585 ISBN 2-10-002585-6.