



ÉCOLE CENTRALE LYON

UE FLE  
FLUIDES ET ENERGIE  
RAPPORT

---

## Etude d'un Jet Libre

---

***Élèves :***

Pedro MAIA DA SILVA  
Ilyane BECHIKH  
Matthieu FOUQUET

***Enseignant :***  
Michel GERON

2 décembre 2022

# Table des matières

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Rappels théoriques et phénoménologiques</b>	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>Objectifs</b>	<b>3</b>
<b>4</b>	<b>Protocole Expérimental</b>	<b>3</b>
4.1	Installation Expérimentale . . . . .	3
4.2	Protocole Experimental . . . . .	3
4.2.1	Obtention du profil longitudinal . . . . .	4
4.2.2	Obtention des profils transversaux . . . . .	4
4.3	Mesures Effectuées . . . . .	5
<b>5</b>	<b>Etude Numérique</b>	<b>6</b>
5.1	Problématique . . . . .	6
5.2	Mises en données du problème . . . . .	6
5.3	Calcul de l'état stationnaire . . . . .	7
5.4	Analyse des résultats de la simulation . . . . .	7
<b>6</b>	<b>Comparaison des résultats expérimentaux avec la simulation numérique</b>	<b>8</b>
<b>7</b>	<b>Conclusion</b>	<b>10</b>
<b>8</b>	<b>Annexes</b>	<b>11</b>
8.1	Le Tube de Pitot . . . . .	11
8.2	L'anémomètre à fil chaud . . . . .	11
8.3	Compléments expérimentaux . . . . .	12
8.4	Compléments simulation . . . . .	13
<b>9</b>	<b>Bibliographie</b>	<b>13</b>

# 1 Introduction

L'objectif de ce TP est l'étude des caractéristiques d'un jet d'air libre. Cette étude sera réalisée en comparant une modélisation physique expérimentale réalisée avec une caisson et un convergent circulaire, et une simulation numérique réalisée avec le software de CFD, Ansys Fluent. En comparant les résultats obtenus par les différentes méthodes, il sera possible de tirer des conclusions générales sur notre objet d'étude, le jet libre.

Dans ce premier rapport, nous aborderons l'extraction et l'analyse des données par la méthode expérimentale, réalisée en laboratoire.

# 2 Rappels théoriques et phénoménologiques

Un jet est le flux produit par l'injection d'un flux de fluide dans un fluide au repos par un orifice (dans le cas d'un orifice circulaire, on a un jet axisymétrique ou circulaire). Le fluide ambiant est considéré au repos à l'extérieur du jet, et peut être caractérisé par sa densité  $\rho$  et sa viscosité  $\nu$ . Ici on suppose que le fluide est incompressible pour pouvoir appliquer les équations étudiées en classe.

On peut caractériser un jet circulaire par la vitesse de sortie du fluide  $U_0$  et le diamètre de l'orifice  $D$ . Ce courant-jet est divisé en 3 zones, comme le montre la figure ci-dessous :

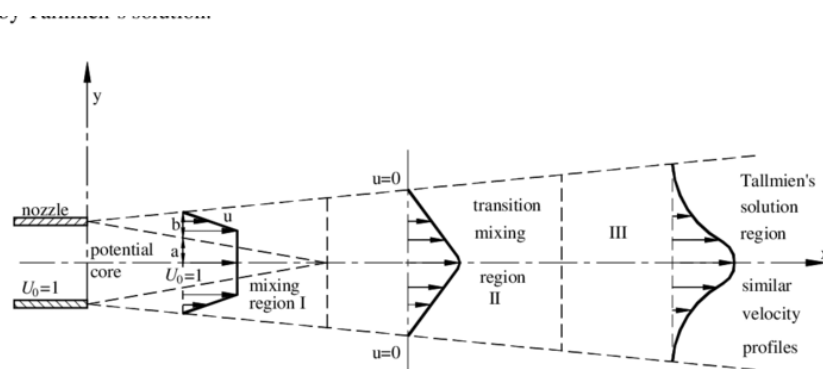


FIGURE 1 – Schéma d'un Jet Axisymétrique

Juste à la sortie de l'orifice se trouve la zone de potentiel, formée par un cône potentiel, dans laquelle la vitesse est pratiquement uniforme et la turbulence (exprimée par le nombre de Reynolds) est très faible. La zone de potentiel s'étend sur une distance d'environ 10 fois le diamètre du convergent.

En dehors du cône de potentiel, se produit la zone dite de mélange, où la turbulence n'est plus négligeable. Ces turbulences sont présentes dans une épaisseur de plus en plus importante appelée longueur de pénétration.

On a ensuite la zone de transition, qui fait entre 50 et 60 fois le diamètre du convergent et où le mélange est global. Et enfin, la zone auto-similaire, dans laquelle l'écoulement s'établit et la vitesse ne dépend plus de l'abscisse du point de mesure, cela se produit entre 50 et 60 fois le diamètre.

### 3 Objectifs

Les objectifs de ce TP sont :

- Comparer le comportement de deux appareils de mesure ;
- Comprendre comment étalonner une sonde avec une réponse non-linéaire ;
- Définir un protocole expérimental afin de pouvoir comparer les mesures avec les résultats d'une simulation numérique ;
- Mesurer plusieurs profils de vitesse.
- Apprendre à mettre en forme des résultats scientifiques (représentation sur un graphique, adimensionnement, comparaison de plusieurs résultats, etc.)

## 4 Protocole Expérimental

### 4.1 Installation Expérimentale

Durant ce TP, l'étude du caractère turbulent du jet d'air est l'élément principal, le but étant d'obtenir des profils de vitesse de l'écoulement, à la fois transversaux et longitudinaux. Le protocole consiste donc à déplacer un fil métallique chaud dont la tension aux bornes est reliée à la vitesse de l'écoulement.

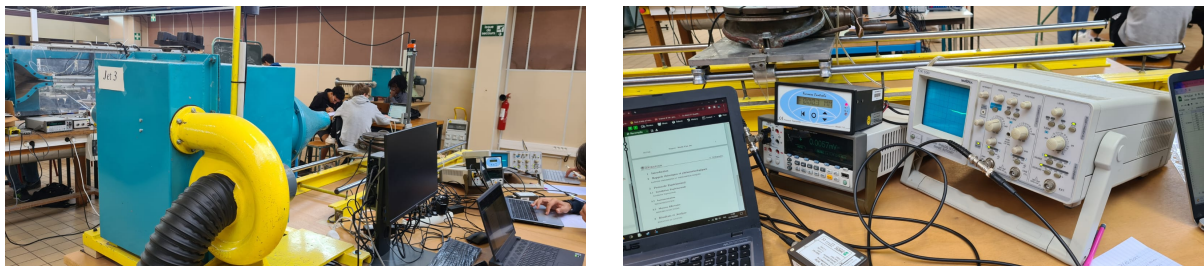


FIGURE 2 – Photographies de la paillasse

La première étape du TP consiste à étalonner ce dit fil, afin d'être en mesure d'exploiter les résultats obtenus ultérieurement. Pour cela, on relève la tension aux bornes du fil pour différentes vitesses de l'écoulement. La vitesse est quant à elle mesurée à l'aide d'un tube de Pitot, nous donnant sa valeur moyenne.

Afin de réaliser les mesures expérimentalement, les appareils suivants ont été utilisés :

- Caisson contenant de l'air et convergent circulaire pour réaliser un jet circulaire.
- Rail parallèle pour fixer des appareils de mesure sur la trajectoire du jet.
- Tube de Pitot relié à un micromanomètre.
- Fil chaud relié à un conditionneur électronique.
- Oscilloscope.
- Voltmètre
- Ordinateur

La configuration de l'expérience peut être vue sur la figure 2.

### 4.2 Protocole Experimental

Nous cherchons à étudier les caractéristiques du jet à travers des profils de vitesse. Pour cela, nous allons effectuer plusieurs mesures afin de tracer de tels profils de vitesse,

soit un profil longitudinal et une dizaine de profils transversaux d'abscisse différente seront représentés en fonction du diamètre du convergent pour caractériser et représenter chacune des régions de l'écoulement évoquées ci-dessus.

Pour effectuer les mesures et tracer de tels profils nous disposons d'un tube de Pitot, qui nous donne la valeur moyenne de la vitesse en mesurant une différence de pression et un fil chaud qui nous permet de mesurer la vitesse instantanée, à travers lequel nous pouvons accéder à la valeur moyenne et au RMS (Root Mean Square) de la vitesse et, par conséquent, à ses variations, nous permettant de tracer les profils de vitesse et d'identifier les différentes zones d'écoulement. Ce fil fonctionne en maintenant la même température grâce à l'apport d'énergie électrique, qui est mesurée par la tension sur le voltmètre qui nous permet d'observer l'énergie perdue en raison du débit et par le coefficient de Newton, nous permet de calculer la vitesse de l'air.

Un détail plus précis du fonctionnement de ces instruments se trouve en annexe de ce rapport.

#### 4.2.1 Obtention du profil longitudinal

Pour transférer le profil longitudinal, on utilisera le fil chaud préalablement calibré et fixé à hauteur du centre du convergent, en faisant varier sa position en centimètres, dans le but d'identifier les 3 zones de l'écoulement décrites précédemment à travers différentes mesures de la valeur moyenne de la vitesse et de sa valeur RMS, à travers le voltmètre. Il est à noter que les régions où il y a de grandes fluctuations de la vitesse RMS sont des régions de transition entre les zones.

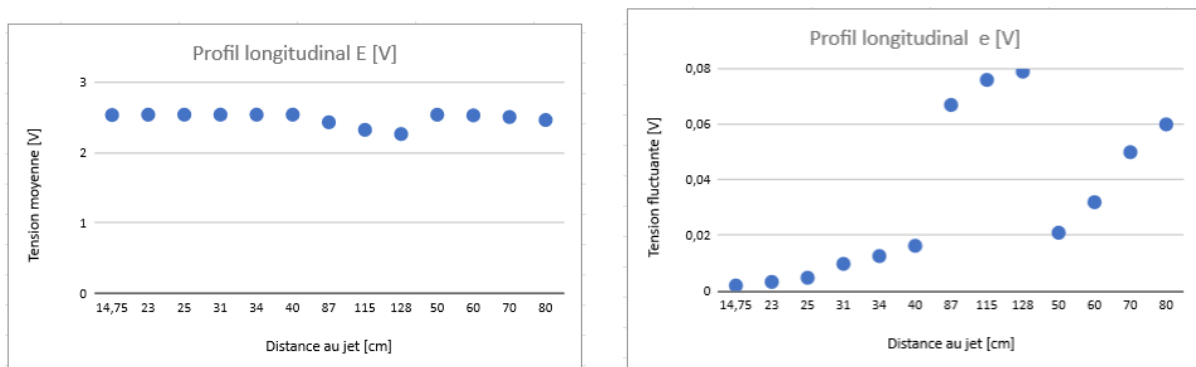


FIGURE 3 – Graphiques de tension moyenne et tension fluctuante profil horizontal

#### 4.2.2 Obtention des profils transversaux

Pour former un profil transversal, nous avons défini une abscisse fixe pour le chariot anémomètre et effectué une série de mesures faisant varier la hauteur du compteur. Grâce à cette variation de hauteur à certaines hauteurs, nous pouvons utiliser la symétrie axiale du jet pour esquisser le profil de vitesse.

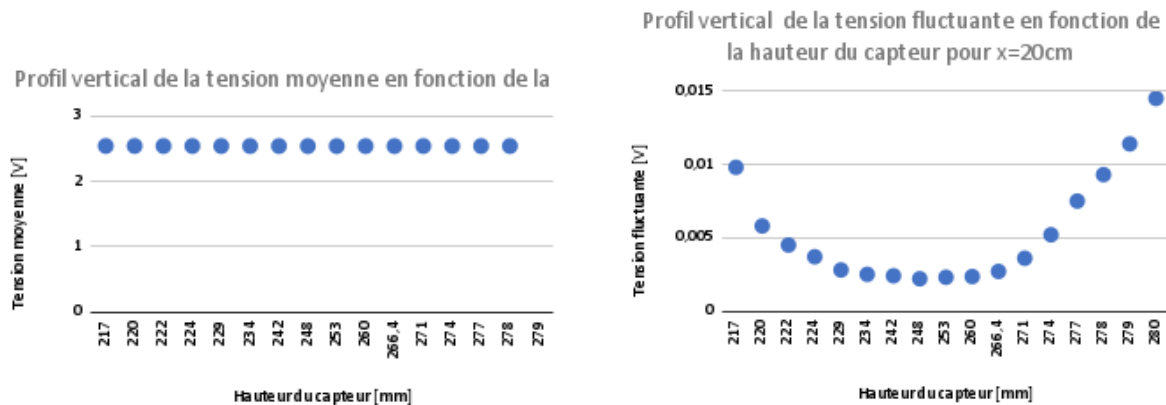


FIGURE 4 – Graphiques de tension moyenne et tension fluctuante première profil vertical

### 4.3 Mesures Effectuées

Grâce au logiciel d'acquisition utilisé pour la collecte des données, nous avons pu mesurer les données suivantes pour l'étalonnage :

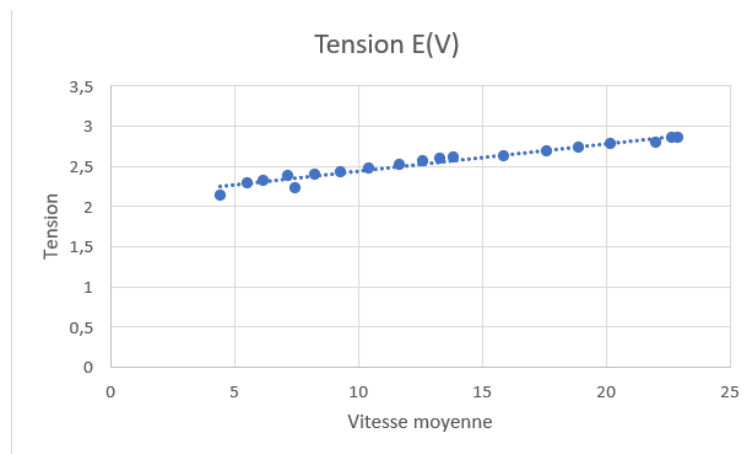


FIGURE 5 – Etalonnage capteur : lien entre tension et vitesse

Après avoir étalonné notre système, on souhaite mesurer la vitesse instantanée de l'écoulement pour différentes attitudes et hauteurs du fil, dans le but d'obtenir un profil de vitesse précis. Pour cela, on mesure la charge en mètres au niveau du fil à l'aide d'un manomètre. En particulier, la distance à laquelle on place le fil de l'entrée du souffleur correspond à des multiples entiers du diamètre du col du souffleur, et on fait varier l'altitude du fil en surveillant les variations de vitesses afin d'obtenir des mesures les plus fines possibles. La vitesse est ensuite calculée à l'aide de la pression de l'air à l'endroit du fil, elle-même étant calculée grâce à la charge. Ces relations, tirées du théorème de Bernoulli appliqué à cet écoulement parfait stationnaire et incompressible, sont résumées par l'égalité suivante :

$$P = \rho_1 g h \quad (1)$$

$$\rho_2 v^2 = 2P \quad (2)$$

Où  $g$  est le pesanteur terrestre,  $h$  est la charge au niveau du fil chaud,  $v$  est la vitesse de l'écoulement,  $\rho_1$  est la masse volumique de l'eau, prise à  $1000\text{kg}/\text{m}^3$ ,  $\rho_2$  est la masse volumique de l'air, prise à  $1.3\text{kg}/\text{m}^3$ . Les données et courbes obtenues à l'aide des mesures sont données ci-après.

## 5 Etude Numérique

### 5.1 Problématique

Après le TP, nous avons voulu modéliser numériquement le comportement du jet. Pour cela, nous avons simulé sur le logiciel Fluent notre jet en y précisant les conditions réelles d'experimentation. Notre simulation a pour but d'obtenir le profil de répartition des vitesses selon l'axe horizontal ainsi que dans une direction transversale. De plus, nous souhaitons nous approprier plus précisément le comportement de la turbulence le long de l'axe et en dehors de l'axe.

La buse qui permet la création du jet a une forme cylindrique, de diamètre 80mm. Elle est précédée d'un convergent de diamètre initial 240mm. C'est alors cette géométrie que nous implanterons dans la simulation.

### 5.2 Mises en données du problème

La simulation a été réalisée en 2D axisymétrique et régime stationnaire pour simplifier le problème. La sortie de la buse a été prise en  $x=0$ , avec  $x$  l'axe horizontal et  $y$  l'axe vertical. Le comportement du jet en lui-même est régi par les équations de Navier-Stokes moyennées. La modélisation de la turbulence choisie est de type  $k-\epsilon$ . Le mesh mis utilisé ici est assez vaste pour éviter les problèmes de conditions aux limites sur la prédiction numérique. Le maillage est quant à lui assez raffiné pour discrétiser en espace les forts gradients au niveau de la sortie de la buse tout en minimisant l'erreur.

Nous avons modifié la densité de l'air et sa viscosité en fonction de la température à laquelle l'expérience a été réalisée ( $20^\circ\text{C}$ ).

La frontière latérale en amont du convergent est prise de type Pressure Inlet, en précisant la valeur de turbulence estimée à 5% ainsi qu'une valeur de pression totale de jauge nulle.

Les parois du caisson sont quant à elles logiquement de type wall avec une condition d'adhérence de type no slip pour la vitesse moyenne. Les parois sont prises lisses.

Au niveau de la sortie du jet, la frontière est prise de type Velocity Inlet, avec une valeur imposée de vitesse de  $19.4\text{ m/s}$ , valeur mesurée durant le TP. La vitesse est en effet considérée ici comme quasi-uniforme et l'hypothèse d'écoulement uniforme et donc de conservation du débit nous permettent de modéliser la distribution de vitesse en sortie de la buse. Connaissant le diamètre de la sortie de la buse et celui du caisson en amont du convergent, on peut ainsi retrouver la valeur de la vitesse en amont du convergent :

$$U_{entree} = \left(\frac{D_0}{D_e}\right)^2 \cdot U_o = \left(\frac{0.08}{0.24}\right)^2 \cdot 19,4 = 2.16\text{m/s} \quad (3)$$

La turbulence est quant à elle encore une fois considérée comme modérée avec une intensité de 5%, et l'échelle caractéristique de la turbulence est prise à 80mm, diamètre de la sortie de la buse.

### 5.3 Calcul de l'état stationnaire

On lance alors les calculs en initialisant avec les valeurs précisées précédemment. Pour savoir quand l'état stationnaire est atteint, on suit l'indicateur physique que représente la valeur maximale de la vitesse axiale en sortie. Lorsque cette valeur atteint une valeur stable, on sait que le champ de vitesse moyenne a convergé.

On décide de plus d'arrêter les calculs lorsque tous les résidus ont été réduits d'au moins 3 ordres de grandeur.

### 5.4 Analyse des résultats de la simulation

On observe bien une réduction des résidus machine suffisamment importante pour obtenir une convergence du modèle, constat qui est également validé par une convergence de la valeur maximale de la vitesse le long de la frontière de sortie. Les données de la simulation sont ainsi exploitables pour notre étude.

Concernant la vitesse axiale, on constate une valeur très importante en sortie de jet (près de 21m/s) et une diminution assez faible avec la distance (la valeur de la vitesse est divisée par deux au bout d'environ 65cm), ce qui concorde avec nos résultats expérimentaux. Le comportement de la vitesse radial est également semblable à celui observé lors de la manipulation car il y a une diminution très brusque de la vitesse dès lors que l'on change d'altitude. La présence d'un cône de vitesse ainsi que l'évasement de celle-ci est alors confirmée.

Il y a de plus apparition d'une zone où l'énergie cinétique turbulente devient importante, juste à la sortie de la buse, et qui s'étend en diminuant progressivement en amplitude jusqu'à réatteindre les valeurs environnantes. La simulation valide donc alors l'apparition d'une turbulence dans l'écoulement et nous permet également de la localiser. Cette turbulence s'explique par la différence de vitesse entre l'écoulement en sortie de jet et l'air extérieur.

L'évolution de la pression est quant à elle très différente : si on observe une pression importante à l'entrée de la buse ( $+2.5e2$  Pa par rapport à la pression atmosphérique), celle-ci va brutalement diminuer jusqu'à la sortie de la buse. Sa valeur va alors rester constante égale à la pression atmosphérique tout le long de l'écoulement.

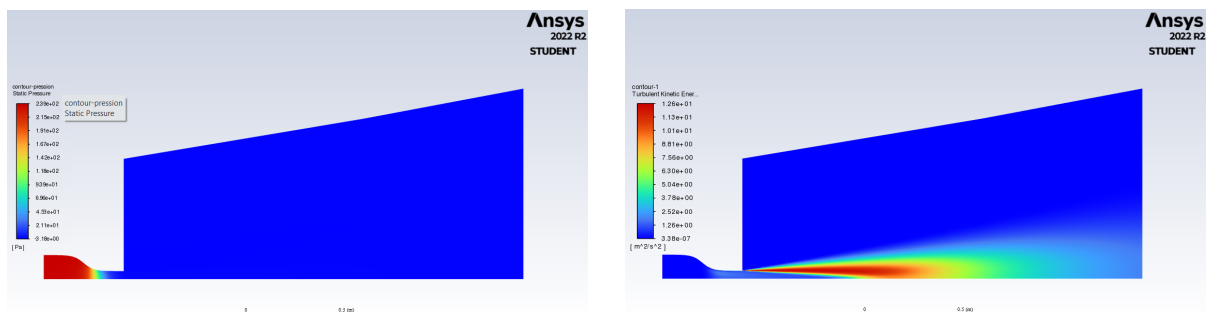


FIGURE 6 – Contours de pression et d'énergie cinétique de turbulence



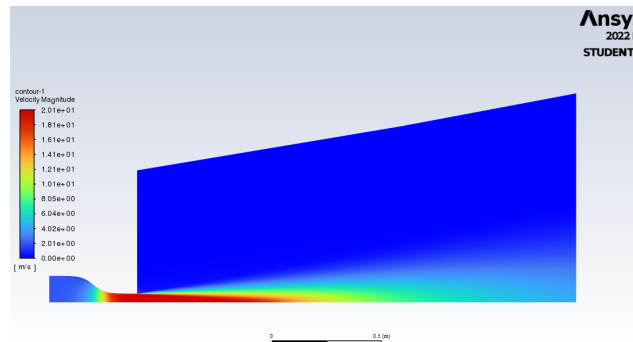


FIGURE 7 – Contours de vitesse

## 6 Comparaison des résultats expérimentaux avec la simulation numérique

Une fois les données numériques obtenues, nous avons dû les traiter afin de les comparer à celles obtenues précédemment lors de l'expérience.

La première étape a été de calculer les valeurs moyennes de  $k$  pour chaque surface utile modélisée. Pour cela nous avons choisi de faire la moyenne des différentes valeurs relevées par fluide en fonction de la distance  $x$  à la sortie du jet. En utilisant ces valeurs moyennes de l'énergie cinétique turbulente, on peut alors récupérer, en supposant les fluctuations turbulentes isotropes, la vitesse moyenne de simulation à l'aide de la formule :

$$U_{RMS} = \sqrt{\frac{2}{3} \cdot k} \quad (4)$$

Ces résultats sont alors à comparer avec les vitesses moyennes expérimentales. Celles-ci sont obtenues à partir des valeurs de tension moyenne et de tension fluctuante via la loi de King :

$$V = f(E) \quad (5)$$

Où nous pouvons réécrire la vitesse sous la forme :

$$\sqrt{V} = a \cdot E^2 + b \quad (6)$$

Par régression linéaire, on peut alors récupérer les valeurs de  $a$  et de  $b$  (ici, on a obtenu  $a=0.8$  et  $b=0.9$ ), et on en déduit après calcul :

$$u = f'(E) \cdot e = (2.56 \cdot E^2 - 2.88) \cdot E \cdot e \quad (7)$$

Cela nous permet d'obtenir le tableau comparatif suivant :

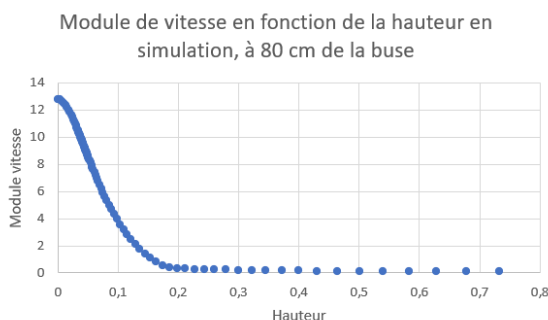
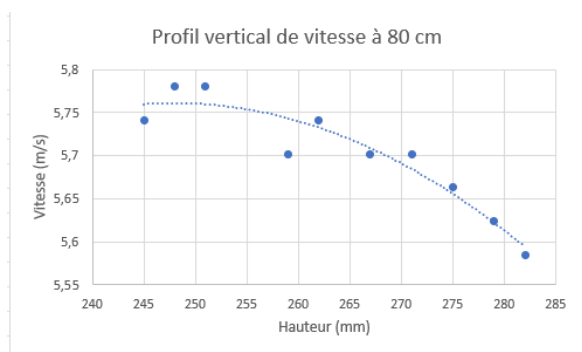
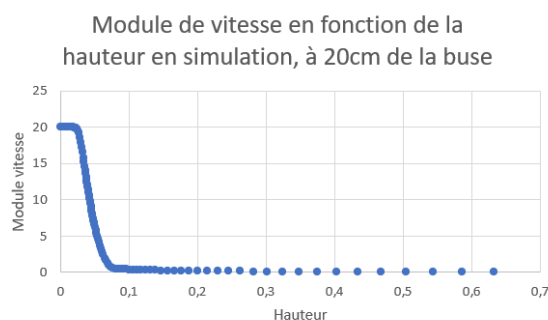
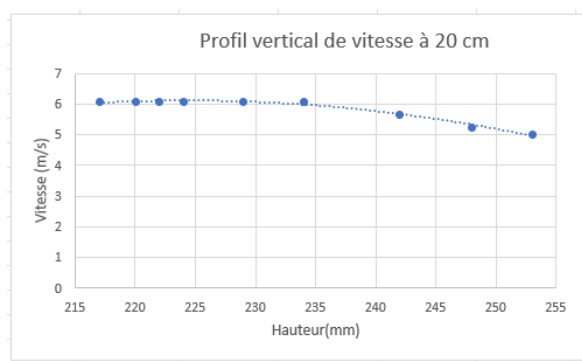
On constate de légères différences de vitesse allant de 0.1 m/s jusqu'à 0.59 m/s, cependant les écarts ne sont pas aberrants non plus et restent dans des ordres de grandeurs très proches, ce qui garantit une cohérence entre l'expérience pratique et la simulation numérique. On constate en outre qu'hormis pour  $x=122\text{cm}$ , ce sont toujours les vitesses moyennes expérimentales qui sont supérieures aux vitesses moyennes de simulation. Cela peut être dû à la précision des réglages lors de la manipulation ainsi que de la prise des valeurs de tensions.

TABLE 1 – Comparasion vitesse expérimentale-numérique

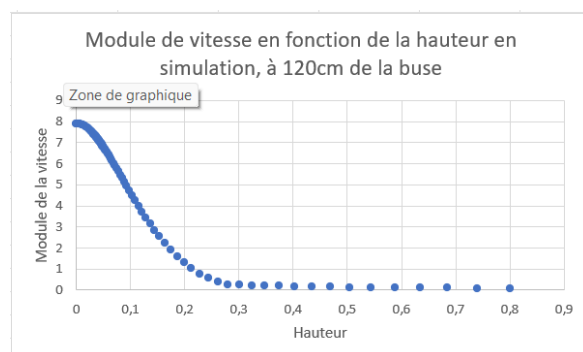
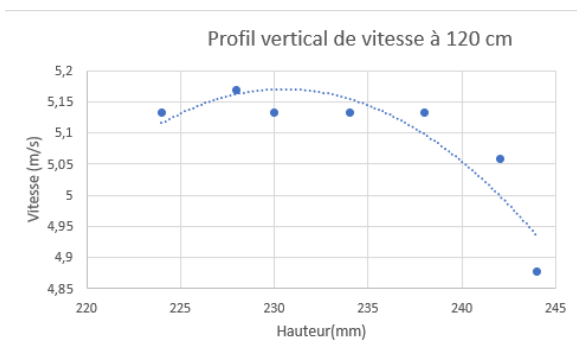
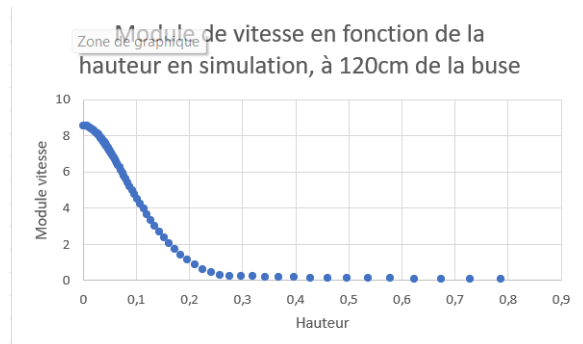
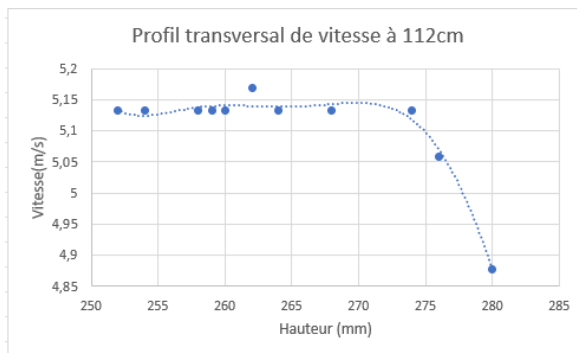
	vitesse moyenne expérimentale	vitesse moyenne simulation
x=20cm	2.31 m/s	1.72 m/s
x=80cm	2.22 m/s	2.09 m/s
x=112cm	1.64 m/s	1.74 m/s
x=120cm	1.92 m/s	1.65 m/s
Profil Horizontal	0.99 m/s	1.39 m/s

On compare alors les profils de vitesse expérimentaux et simulés. Pour plus de simplicité, on s'intéresse ici seulement à la partie basse du jet : le problème étant considéré axisymétrique, la partie haute doit suivre les mêmes résultats.

La vitesse sur les profils transversaux suivants est calculée à partir de la tension comme expliqué précédemment. Les hauteurs sur les graphes simulés sont en cm et celles sur les graphes expérimentaux en mm.



Pour chaque profil expérimental, nous avons tracé des courbes de tendance de type polynomial, en augmentant le degré du polynome de façon à coller le plus possible au nuage de points. Les différences de profil entre l'expérience et la simulation s'expliquent par la différence considérable de données : les mesures n'ont été prises que sur une certaine plage de hauteurs, tandis que la simulation est bien plus étendue. C'est ce qui explique la différence d'unités également entre les courbes expérimentales et numériques : les expérimentales font apparaître des hauteurs en mm, tandis que les numériques affichent une abscisse en cm. On peut ainsi supposer que les courbes expérimentales correspondent aux parties de faible hauteur des courbes de la simulation. C'est ce que la comparaison des deux courbes confirme dans chaque situation.



## 7 Conclusion

L'utilisation et la comparaison de modèles expérimentaux et numériques de ce phénomène de mécanique des fluides permet une vision beaucoup plus explicative et didactique des différentes zones du jet : le cône potentiel, la zone de mélange, la zone de transition et la zone auto-similaire. Malgré quelques difficultés rencontrées par le groupe, principalement dues à la grande quantité de données à collecter pour la formulation de chacun des profils, les profils trouvés dans la partie expérimentale ne sont pas extrêmement éloignés de ceux trouvés dans la partie numérique à travers la simulation. Les profils obtenus sont pour la plupart pertinents d'un point de vue physique et les profils expérimentaux et numériques sont souvent similaires. Certains points, lorsqu'ils sont comparés, montrent cette difficulté de l'opérateur et certaines imprécisions adoptées lors de l'exécution des deux phases de l'expérience.

Par conséquent, maintenant que nous connaissons mieux le phénomène, nous proposons les modifications suivantes dans la réalisation de l'expérience afin d'obtenir des données plus précises dans les deux phases :

- Effectuer des mesures à des points présentant de fortes variations de paramètres physiques, tels que des régions de transition entre différentes zones de jet.
- Réalisation de simulations à l'aide d'autres modèles de turbulence.

## 8 Annexes

### 8.1 Le Tube de Pitot

Le tube de Pitot est un appareil dédié à la mesure de la vitesse d'écoulement d'un fluide en mesurant la différence de pression entre les 2 extrémités A et B du tube, orientées perpendiculairement comme indiqué dans image ci-dessous. En A, on mesure la pression totale, composée de la pression statique et de la pression dynamique, celle due au débit, et en B, où la vitesse du fluide est nulle, seule la pression statique est mesurée.

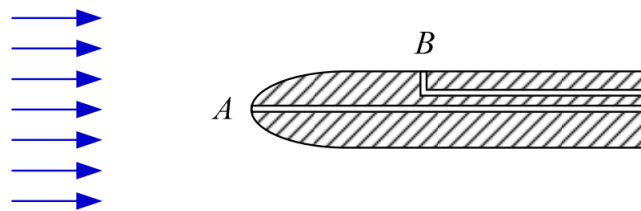


FIGURE 8 – Schéma d'un Tube de Pitot

En supposant que le fluide est incompressible et non visqueux, que l'écoulement est stationnaire et que les forces volumétriques dérivent d'un potentiel, nous remplissons toutes les conditions pour pouvoir appliquer le théorème de Bernoulli entre les points mentionnés ci-dessus.

$$p_a + \frac{1}{2}\rho \cdot U_{fluide}^2 = p_b \quad (8)$$

Ainsi, à partir de l'équation précédente, nous pouvons calculer la vitesse comme suit :

$$U_{fluide} = \sqrt{\frac{2(p_a - p_b)}{\rho}} \quad (9)$$

### 8.2 L'anémomètre à fil chaud

L'anémomètre à fil chaud est formé par un fil très fin et donc très fragile. L'appareil fonctionne grâce à un courant  $I$  circulant dans le fil, qui a une résistance  $R$  connue, ce qui nous permet de calculer la tension par l'équation :  $E = RI$ . De cette manière, grâce à l'effet Joule, le fil est chauffé à une certaine température. Cependant, il est important de se rappeler que le fil échange également de la chaleur avec l'environnement, provoquant des pertes thermiques. Pour maintenir le fil à une température constante d'environ  $300^\circ\text{C}$ , il est nécessaire de faire varier la tension  $E$ , en fonction de la vitesse de l'air  $V$ . A travers un bilan énergétique appliqué au fil, on peut déduire la loi de King, qui nous donne une relation entre la vitesse d'écoulement du fluide et la tension  $E$  donnée par l'anémomètre à fil chaud.

$$E^2 = a\sqrt{U} + b \quad (10)$$

En considérant les hypothèses de linéarité, à travers la différenciation de la loi de King, on obtient la relation suivante entre  $U_{RMS}$  ( $dU$ ), vitesse d'écoulement et  $E_{RMS}$  ( $dE$ ), qui représente les variations de tension.

$$U_{RMS} = 4 \cdot E \cdot E_{RMS} \cdot \frac{\sqrt{U}}{a} \quad (11)$$

### 8.3 Compléments expérimentaux

Différents graphiques ont été tracés pour mieux détailler l'expérience réalisée et les données recueillies :

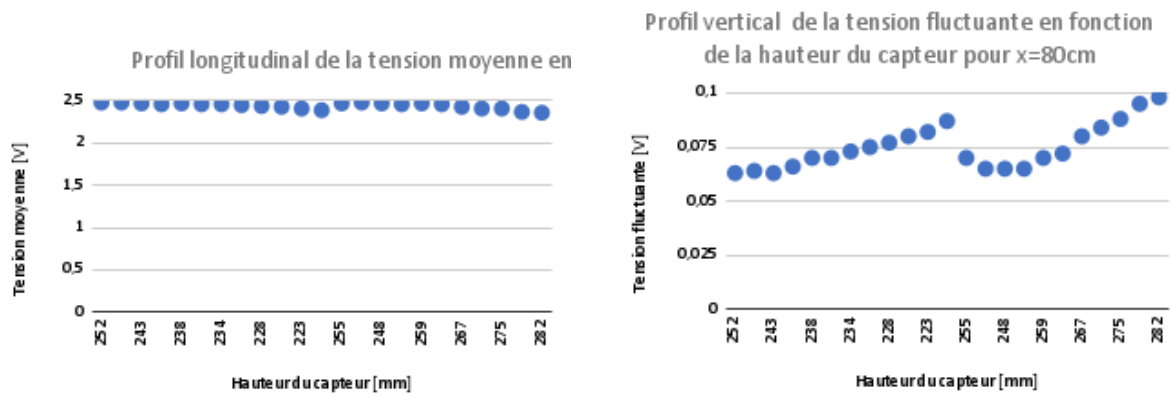


FIGURE 9 – Graphiques de tension moyenne et tension fluctuante deuxième profil vertical

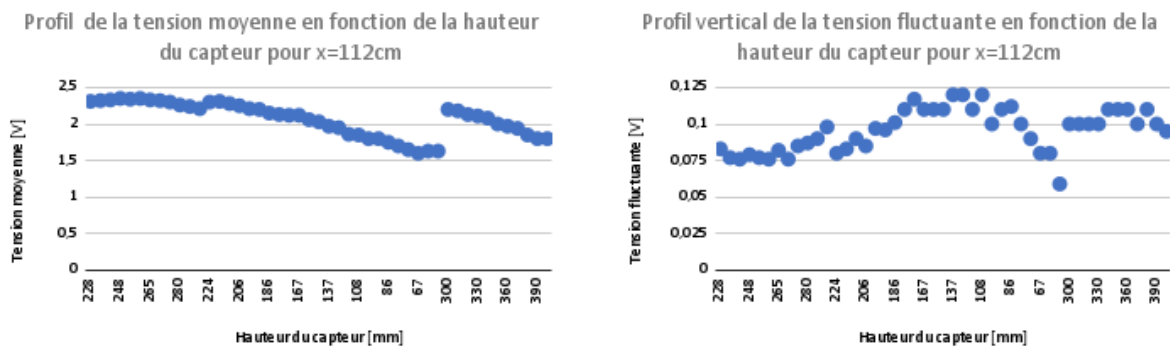


FIGURE 10 – Graphiques de tension moyenne et tension fluctuante troisième profil vertical

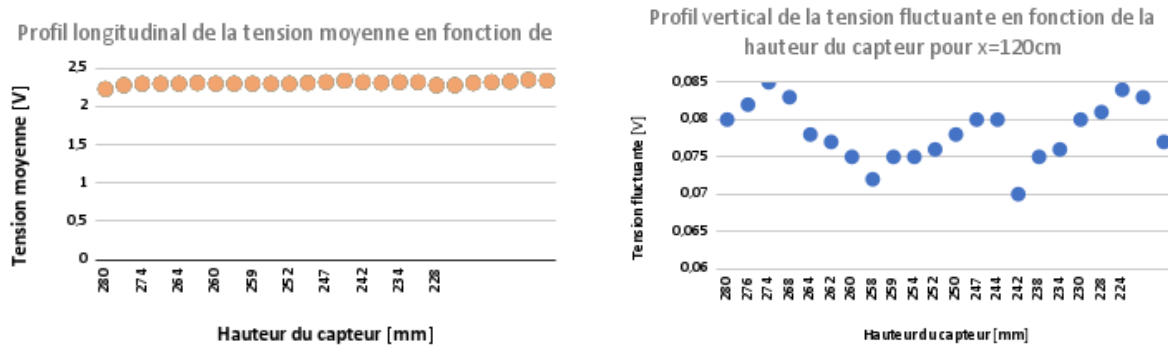


FIGURE 11 – Graphiques de tension moyenne et tension fluctuante quatrième profil vertical

## 8.4 Compléments simulation

Nous avons réalisé d'autres graphiques intéressants concernant notre jet grâce à la simulation :

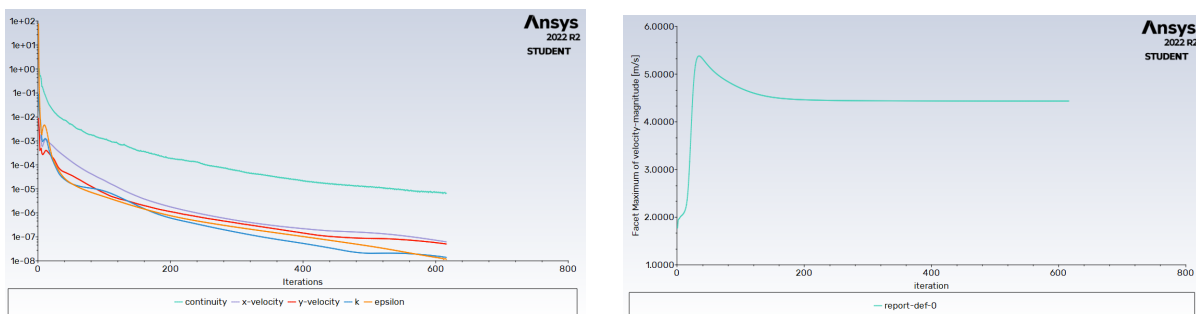


FIGURE 12 – Graphiques de convergence des résidus et des vitesses itérées

## 9 Bibliographie

[https://www.researchgate.net/figure/Axisymmetric-free-jet-Schlichting-1974-shows-a-exact-solution-for-an-incompressible\\_fig4\\_324673921](https://www.researchgate.net/figure/Axisymmetric-free-jet-Schlichting-1974-shows-a-exact-solution-for-an-incompressible_fig4_324673921)

[1] Département MFAE, Enoncé de TP, Jet d'air. UE Fluides et énergies (FLE tc 2), 2010.

[2] Département MFAE, Fiche ressource : Anémomètre à fil chaud. UE Fluides et énergies (FLE tc2) 2012.

[3] Département MFAE, Fiche ressource : Tube de Pitot. UE Fluides et énergies (FLE tc 2)

[4] Département MFAE, Fiche ressource : Jet circulaire - la structure d'un jet libre. UE Fluides et énergies (FLE tc 2/3)

[5] Lien drive données courbes <https://docs.google.com/spreadsheets/d/1f7WzqEMMktK4mxecM9nsharingouid=100127767195438891995rtpof=true&edit=true>