



Rédaction d'un compte-rendu technique

UE Fluides et Energie FLE tc 1



ÉCOLE
CENTRALE LYON

Objectifs

- **Savoir rédiger un rapport/CR technique**
 - La structure du document
 - Les règles de mise en forme
 - Les éléments clés : figures, équations, références biblio
 - **Illustration à travers un exemple commenté**
 - Un TP virtuel « Couche de mélange »
 - Un rapport « modèle » disponible sur Pédagogie
 - **Mise en garde**
 - Ce n'est pas une formation à Word ou Latex → vous devez vous auto-former
 - On présente le résultat attendu, peu importe l'outil
- Mise en application en 2^{ème} partie de séance pour la rédaction du rapport de la séquence C

Qu'est-ce qu'un rapport ou compte-rendu technique ?

- **C'est un outil de travail...**
 - Pour transmettre des informations et en garder une trace
 - Les informations doivent être présentées de façon claire et rigoureuse
 - Gain de temps pour le lecteur
 - « Réutilisabilité » de l'information
 - Le(s) rédacteur(s) s'efface(nt) au profit du contenu
 - Style impersonnel
 - La qualité du rédacteur doit apparaître à travers la qualité de ses documents
- **...qui s'adresse à des lecteurs spécialistes**
 - Ce n'est pas un document de vulgarisation
mais
 - Cela ne dispense pas d'être clair et pédagogue

Structure d'un compte-rendu technique

Page de titre

Sommaire

1 - Introduction

2 - Rappels théoriques et phénoménologiques

3 - Protocole expérimental

4 - Résultats et analyse

5 - Conclusion

6 - Bibliographie

Annexes

- Cette structure constitue un standard auquel les gens sont habitués
→ facilité d'assimilation et de compréhension par le lecteur
- Elle peut être modifiée mais il faut conserver :
 - La cohérence d'ensemble du document
 - Une progression en V

Introduction
et généralités

Conclusion et
prise de recul

Contenu détaillé

Style et typographie

- **Le style du langage**
 - Style impersonnel : « on » ou « nous », mais pas « ~~Paul a mesuré...~~ »
 - Le niveau de langage doit être neutre :
 - Ni un langage parlé
 - Ni un style littéraire et pompeux
 - Eviter les phrases trop longues
- **Quelques règles typographiques**
 - Pas d'espace avant les simples ponctuations : « . », « , »
 - Un espace insécable avant les doubles ponctuations : « : », « ; », « ? »
 - Un espace après toutes les ponctuations
 - Parenthèses : (elles collent au contenu intérieur)
- **Attention à l'orthographe !!**

Page de garde



Rapport de Travaux Pratiques

TP de sensibilisation FLE tc1

Caractérisation de l'écoulement
dans une couche de mélange

Groupe C1a1

Clémentine DUPUIS

Thomas DURAND

Adrien MARTIN

Vincent PETIT

Année 2013-2014

30 septembre 2013

- Elle doit situer rapidement le document

- qui, quoi, quand, où ?

Organisme

Contexte du document

Titre

Auteurs

- Avec numéro de groupe

Date

Sommaire et Introduction

Sommaire

1	Introduction.....	2
2	Description du phénomène et rappels théoriques.....	3
3	Protocole expérimental	4
3.1	Installation expérimentale.....	4
3.2	Instrumentation.....	4
3.3	Mesures effectuées	4
4	Résultats et analyse	5
5	Conclusion	6
6	Bibliographie.....	6
7	Annexes.....	6

Sommaire

• Introduction

Présenter rapidement le document

On introduit le TP. On peut montrer son intérêt pratique par un exemple

Figure : même si elle est illustrative, elle doit avoir une légende numérotée, avec référence dans le texte

Présentation du plan du document

1 Introduction

Ce compte-rendu présente la démarche adoptée et les résultats obtenus lors de la réalisation de la séance de travaux pratiques de FLE tc1 consacrée à l'étude d'une couche de mélange.

On appelle couche de mélange la zone de frottement qui apparaît lorsque deux courants de fluides, s'écoulant parallèlement l'un à l'autre à des vitesses différentes, se rencontrent. Il s'agit d'un écoulement élémentaire, que l'on retrouve dans de nombreux écoulements naturels ou industriels. On peut citer par exemple la jonction de deux rivières à leur confluent, comme cela est illustré sur la Figure 1 au confluent du Rhône et de la Saône, à Lyon.



Figure 1 : Couche de mélange au confluent du Rhône et de la Saône (Source Google Earth).

L'objectif de ce TP est d'étudier l'évolution du profil transversal de vitesse moyenne en fonction de la distance en aval du point de jonction des deux courants. Dans la section 2, nous résumons les principaux résultats connus sur une couche de mélange, qui nous seront utiles pour l'exploitation de nos mesures. Dans la section 3, nous décrivons le protocole expérimental et les techniques de mesure utilisées. Enfin dans la section 4, nous présentons et analysons les résultats de nos mesures.

Corps du rapport

Mise en forme du texte

2 Description du phénomène et rappels théoriques

Le schéma de la Figure 2 illustre le principe d'une couche de mélange et le comportement physique de l'écoulement associé. Considérons deux écoulements uniformes, de vitesses différentes U_1 et U_2 , s'écoulant parallèlement et séparés jusqu'à la position $x = 0$ par une fine paroi. A partir de la position $x = 0$, les deux écoulements sont en contact. En raison de la viscosité du fluide, la différence de vitesse entre les deux courants induit une contrainte de frottement, qui conduit à un transfert de quantité de mouvement du courant 1 vers le courant 2. Il en résulte un ralentissement progressif du courant 1 et une accélération progressive du courant 2, illustrés sur la Figure 2 par l'allure des profils de vitesse.

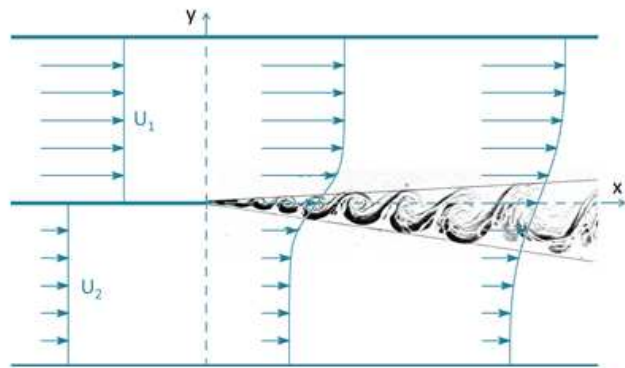


Figure 2 : Schéma de principe d'une couche de mélange entre deux courants de fluides (visualisation des tourbillons d'après Brown and Roshko, 1974).

La ressource technique associée au TP nous indique qu'il existe un modèle théorique pour décrire l'évolution du profil de vitesse en aval de la jonction (Goertler, 1942) :

$$u(x, y) = U_m + \frac{\Delta U}{2} [1 + \operatorname{erf}(\eta)] \quad \text{avec} \quad \eta = \sigma \frac{y}{x} \quad U_m = \frac{U_1 + U_2}{2} \quad \Delta U = U_1 - U_2 \quad (1)$$

où erf est la fonction erreur (intégrale de la fonction gaussienne), dont un développement approché est proposé en annexe 7.1. La constante σ est exprimée, dans le modèle de Goertler, par la relation :

$$\sigma = \sigma_0 \frac{U_1 + U_2}{U_1 - U_2} \quad \text{avec} \quad \sigma_0 = 11 \quad (2)$$

On peut remarquer que la forme du profil donnée par l'équation (1) est de type « auto-similaire », c'est-à-dire que la forme générale de la fonction reste inchangée pour différentes positions en aval. Seul l'étalement transversal du profil évolue : une même valeur de vitesse est observée pour une même valeur de η , c'est-à-dire pour une position $y = x / \sigma$.

Après ces quelques rappels théoriques, nous présentons dans la section suivante notre protocole expérimental.

Style des titres

- Numérotation
- Taille et police homogène pour tous les titres
- Choisissez un style sobre et clair
- Evitez de multiplier les niveaux

• Corps du texte

- Taille et police homogène pour toutes les parties
- Paragraphes « justifiés »
- Un retour à la ligne a une signification, il exprime le passage à une autre idée

Corps du rapport

Les figures

2 Description du phénomène et rappels théoriques

Le schéma de la Figure 2 illustre le principe d'une couche de mélange et le comportement physique de l'écoulement associé. Considérons deux écoulements uniformes, de vitesses différentes U_1 et U_2 , s'écoulant parallèlement et séparés jusqu'à la position $x = 0$ par une fine paroi. A partir de la position $x = 0$, les deux écoulements sont en contact. En raison de la viscosité du fluide, la différence de vitesse entre les deux courants induit une contrainte de frottement, qui conduit à un transfert de quantité de mouvement du courant 1 vers le courant 2. Il en résulte un ralentissement progressif du courant 1 et une accélération progressive du courant 2, illustrés sur la Figure 2 par l'allure des profils de vitesse.

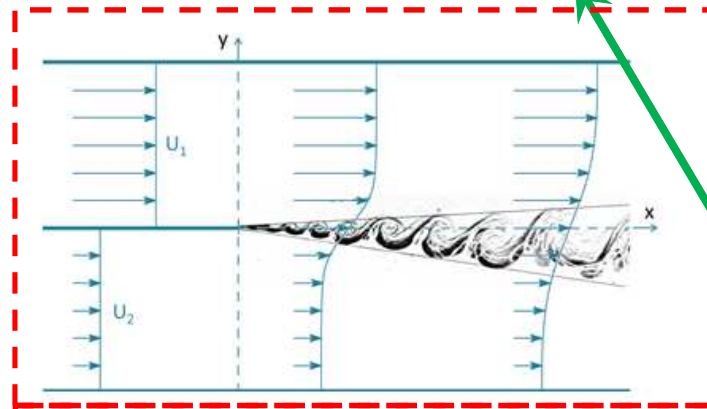


Figure 2 : Schéma de principe d'une couche de mélange entre deux courants de fluides (illustration des tourbillons d'après Brown and Roshko, 1974).

La ressource technique associée au TP nous indique qu'il existe un modèle théorique pour décrire l'évolution du profil de vitesse en aval de la jonction (Goertler, 1952) :

$$u(x, y) = U_m + \frac{\Delta U}{2} [1 + \text{erf}(\eta)] \quad \text{avec} \quad \eta = \sigma \frac{y}{x} \quad U_m = \frac{U_1 + U_2}{2} \quad \Delta U = U_1 - U_2 \quad (1)$$

où erf est la fonction erreur (intégrale de la fonction gaussienne), dont un développement approché est proposé en annexe 7.1. La constante σ est exprimée, dans le modèle de Goertler, par la relation :

$$\sigma = \sigma_0 \frac{U_1 + U_2}{U_1 - U_2} \quad \text{avec} \quad \sigma_0 = 11 \quad (2)$$

On peut remarquer que la forme du profil donnée par l'équation (1) est de type « auto-similaire », c'est-à-dire que la forme générale de la fonction reste inchangée pour différentes positions en aval. Seul l'étalement transversal du profil évolue : une même valeur de vitesse sera observée pour une même valeur de η , c'est-à-dire pour une position $y = x / \sigma$.

Après ces quelques rappels théoriques, nous présentons dans la section suivante notre protocole expérimental.

Corps de la figure

- Une figure exprime une idée, un résultat
- Elle doit être claire et soignée, qu'il s'agisse d'une photo, d'un schéma, d'une courbe (cf. 2^{ème} partie)
- La taille doit être adaptée à la lecture

Légende de la figure

- Elle est indispensable pour toute figure
- Numérotation
- Référence au numéro dans le texte
- Si la figure provient d'un document ou relève du droit d'auteur, il faut citer la source

Corps du rapport

Les équations

2 Description du phénomène et rappels théoriques

Le schéma de la Figure 2 illustre le principe d'une couche de mélange et le comportement physique de l'écoulement associé. Considérons deux écoulements uniformes, de vitesses différentes U_1 et U_2 , s'écoulant parallèlement et séparés jusqu'à la position $x = 0$ par une fine paroi. A partir de la position $x = 0$, les deux écoulements sont en contact. En raison de la viscosité du fluide, la différence de vitesse entre les deux courants induit une contrainte de frottement, qui conduit à un transfert de quantité de mouvement du courant 1 vers le courant 2. Il en résulte un ralentissement progressif du courant 1 et une accélération progressive du courant 2, illustrés sur la Figure 2 par l'allure des profils de vitesse.

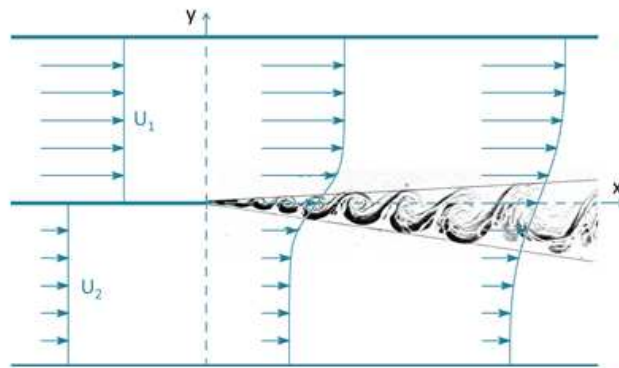


Figure 2 : Schéma de principe d'une couche de mélange entre deux courants de fluides (visualisation des tourbillons d'après Brown and Roshko, 1974).

La ressource technique associée au TP nous indique qu'il existe un modèle théorique pour décrire l'évolution du profil de vitesse en aval de la jonction (Goertler, 1942) :

$$u(x, y) = U_m + \frac{\Delta U}{2} [1 + \operatorname{erf}(\eta)] \quad \text{avec} \quad \eta = \sigma \frac{y}{x} \quad U_m = \frac{U_1 + U_2}{2} \quad \Delta U = U_1 - U_2 \quad (1)$$

où erf est la fonction erreur (intégrale de la fonction gaussienne), dont un développement approché est proposé en annexe 7.1. La constante σ est exprimée, dans le modèle de Goertler, par la relation :

$$\sigma = \sigma_0 \frac{U_1 + U_2}{U_1 - U_2} \quad \text{avec} \quad \sigma_0 = 11 \quad (2)$$

On peut remarquer que la forme du profil donnée par l'équation (1) est de type « auto-similaire », c'est-à-dire que la forme générale de la fonction reste inchangée pour différentes positions en aval. Seul l'étalement transversal du profil évolue : une même valeur de vitesse sera observée pour une même valeur de η , c'est-à-dire pour une position $y = x / \sigma$.

Après ces quelques rappels théoriques, nous présentons dans la section suivante notre protocole expérimental.

Mise en forme des équations

- Utilisation d'un éditeur d'équation
- Homogénéité des symboles pour exprimer une même variable, dans toutes les équations et dans le texte (lettre, mais aussi police, taille). Par exemple, évitez de combiner : U , \mathbf{U} , u , etc.

Equation numérotée

Numéro d'équation cité dans le texte



Figure 2 : Schéma de principe d'une couche de mélange entre deux courants de fluides (visualisation des tourbillons d'après Brown and Roshko, 1974).

La ressource technique associée au TP nous indique qu'il existe un modèle théorique pour décrire l'évolution du profil de vitesse en aval de la jonction (Goertler, 1942) :

$$u(x, y) = U_m + \frac{\Delta U}{2} [1 + \operatorname{erf}(\eta)] \quad \text{avec} \quad \eta = \sigma \frac{y}{x} \quad U_m = \frac{U_1 + U_2}{2} \quad \Delta U = U_1 - U_2 \quad (1)$$

où erf est la fonction erreur (intégrale de la fonction gaussienne), dont un développement approché est proposé en annexe 7.1. La constante σ est exprimée, dans le modèle de Goertler, par la relation :

$$\sigma = \sigma_0 \frac{U_1 + U_2}{U_1 - U_2} \quad \text{avec} \quad \sigma_0 = 11 \quad (2)$$

On peut remarquer que la forme du profil donnée par l'équation (1) est de type « auto-similaire », c'est-à-dire que la forme générale de la fonction reste inchangée pour différentes positions en aval. Seul l'étalement transversal du profil évolue : une même valeur de vitesse sera observée pour une même valeur de η , c'est-à-dire pour une position $y = x / \sigma$.

Après ces quelques rappels théoriques, nous présentons dans la section suivante notre protocole expérimental.

5 Conclusion

Cette séance de travaux pratiques nous a permis de caractériser la structure de l'écoulement moyen dans une couche de mélange. Des profils de vitesse ont été mesurés au moyen d'un anémomètre à tube de Pitot, et comparés au modèle analytique de Goertler (1942). L'autosimilarité des profils de vitesse a également été mise en évidence en utilisant une représentation adimensionnée.

La compréhension de la structure d'une couche de mélange et la validation d'un modèle analytique associé sont utiles aux ingénieurs pour caractériser les mécanismes d'échanges entre deux courants, par exemple entre deux rivières se rejoignant.

6 Bibliographie

- Abramowitz, M., Stegun, I.A., 1965. Handbook of mathematical functions. Dover.
- Brown, G.L., Roshko, A., 1974. On density effects and large structure in turbulent mixing layers. *J. Fluid Mech.* 64, 775-816.
- Goertler, H., 1942. Berechnung von aufgaben der freien turbulenz auf grund eines neuen naherungsansatzes. *Z.A.M.M.* 22, 244-254.

Corps du rapport

Les références biblio.

Dans le corps du texte

- Chaque document utilisé doit être cité en référence :
 - Par utilité : cela permet au lecteur de retrouver l'information intégrale si nécessaire
 - Par respect du droit d'auteur
- Mise en forme d'une référence (2 options) :
 - (Nom, Année) : (Goertler, 1942)
 - [numéro] : [3]

Bibliographie en fin de document

- Liste de toutes les références du rapport
- Mise en forme (2 options) :
 - Par ordre alphabétique si (Nom, Année)
 - Par ordre d'apparition si [numéro]

Rappels théoriques

2 Description du phénomène et rappels théoriques

Le schéma de la Figure 2 illustre le principe d'une couche de mélange et le comportement physique de l'écoulement associé. Considérons deux écoulements uniformes, de vitesses différentes U_1 et U_2 , s'écoulant parallèlement et séparés jusqu'à la position $x = 0$ par une fine paroi. A partir de la position $x = 0$, les deux écoulements sont en contact. En raison de la viscosité du fluide, la différence de vitesse entre les deux courants induit une contrainte de frottement, qui conduit à un transfert de quantité de mouvement du courant 1 vers le courant 2. Il en résulte un ralentissement progressif du courant 1 et une accélération progressive du courant 2, illustrés sur la Figure 2 par l'allure des profils de vitesse.

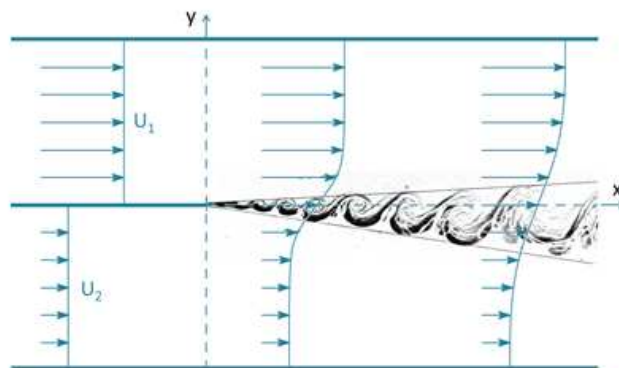


Figure 2 : Schéma de principe d'une couche de mélange entre deux courants de fluides (visualisation des tourbillons d'après Brown and Roshko, 1974).

La ressource technique associée au TP nous indique qu'il existe un modèle théorique pour décrire l'évolution du profil de vitesse en aval de la jonction (Goertler, 1942) :

$$u(x, y) = U_m + \frac{\Delta U}{2} [1 + \text{erf}(\eta)] \quad \text{avec} \quad \eta = \sigma \frac{y}{x} \quad U_m = \frac{U_1 + U_2}{2} \quad \Delta U = U_1 - U_2 \quad (1)$$

où erf est la fonction erreur (intégrale de la fonction gaussienne), dont un développement approché est proposé en annexe 7.1. La constante σ est exprimée, dans le modèle de Goertler, par la relation :

$$\sigma = \sigma_0 \frac{U_1 + U_2}{U_1 - U_2} \quad \text{avec} \quad \sigma_0 = 11 \quad (2)$$

On peut remarquer que la forme du profil donnée par l'équation (1) est de type « auto-similaire », c'est-à-dire que la forme générale de la fonction reste inchangée pour différentes positions en aval. Seul l'étalement transversal du profil évolue : une même valeur de vitesse sera observée pour une même valeur de η , c'est-à-dire pour une position $y = x / \sigma$.

Après ces quelques rappels théoriques, nous présentons dans la section suivante notre protocole expérimental.

• Présentation du phénomène

Explication du phénomène étudié et des principes physiques mis en jeu

Un schéma clair, qui introduit éventuellement le référentiel et les paramètres

• Rappels théoriques

- Ce n'est pas un cours
- On rappelle ce qui est utile à la compréhension et à l'exploitation des mesures
- On mentionne les hypothèses utilisées
- On cite les références

Protocole expérimental

3 Protocole expérimental

3.1 Installation expérimentale

La soufflerie expérimentale utilisée pour l'étude de la couche de mélange est schématisée sur la Figure 3.

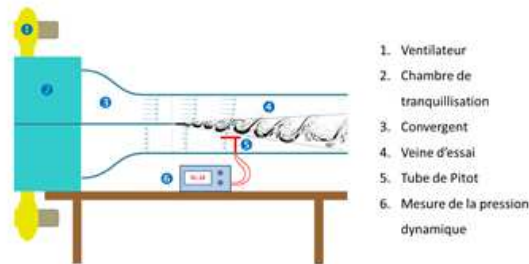


Figure 3 : Installation expérimentale d'étude d'une couche de mélange.

Deux circuits aérauliques (ventilateur + chambre de tranquillisation + convergent) permettent de générer dans chaque courant un écoulement uniforme en contrôlant la vitesse. Nous avons réglé la vitesse U_1 de l'écoulement supérieur à 20 m/s et la vitesse U_2 de l'écoulement inférieur à 4 m/s. Chacun des deux canaux mesure 25 cm de hauteur et 50 cm de largeur. En aval des convergents, les deux courants sont mis en contact et une couche de mélange se développe. La longueur totale de la veine d'essai à partir du point de jonction est de 2 m.

3.2 Instrumentation

La mesure de vitesse est réalisée au moyen d'un tube de Pitot, installé sur un chariot de déplacement. Un tube de Pitot est équipé d'une prise de pression totale, placée à l'extrémité du tube, et d'une prise de pression statique, placée sur le côté. En utilisant un manomètre différentiel, on mesure la pression dynamique ΔP , qui est la différence entre ces deux pressions. La vitesse moyenne de l'écoulement s'obtient alors par la relation :

$$u = \sqrt{2 \frac{\Delta P}{\rho}} \quad (3)$$

où ρ est la masse volumique de l'air.

3.3 Mesures effectuées

Au cours de ce TP, nous avons mesuré la vitesse longitudinale le long de 3 profils transversaux dans la direction y , pour les positions $x = 0,5$ m, $x = 1,0$ m et $x = 1,5$ m. Le pas de discrétisation de nos points de mesure est de 1 cm.

Les résultats obtenus sont présentés et analysés dans la section 4.

Installation expérimentale

- Présentation succincte du banc TP
- Schéma ou photo illustrative
- Permet d'introduire les différentes partie de l'installation

Instrumentation

- Nécessaire d'au moins lister les instruments de mesure utilisés
- Mentionner les traitements de données nécessaires : étalonnage, utilisation d'une relation, etc.
- Evoquer les limites de la technique

Protocole expérimental

- Détailler les mesures effectuées ou la démarche permettant d'aboutir aux résultats

Résultats et analyse

4 Résultats et analyse

Les 3 profils de vitesse mesurés dans la couche de mélange sont tracés sur la Figure 4. On observe qualitativement l'épaississement progressif de la couche de mélange au fur et à mesure que l'on s'éloigne du point de jonction. Nous avons également représenté sur cette figure le profil analytique résultant de l'application du modèle théorique de Goertler (équation 1). On constate que ce modèle reproduit bien nos observations expérimentales.

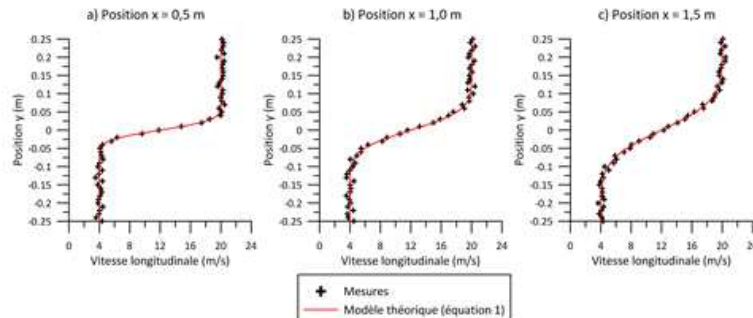


Figure 4 : Profils transversaux de la vitesse longitudinale moyenne, pour 3 positions en aval du point de jonction. Comparaison des vitesses expérimentales et théoriques.

Afin de vérifier l'autosimilarité des profils de vitesse, nous avons représenté sur la Figure 5 les vitesses normalisées, en fonction du paramètre η défini dans l'équation 1. Sur cette figure, il apparaît clairement que les différentes courbes expérimentales suivent un même comportement universel, correspondant au modèle théorique de l'équation 1.

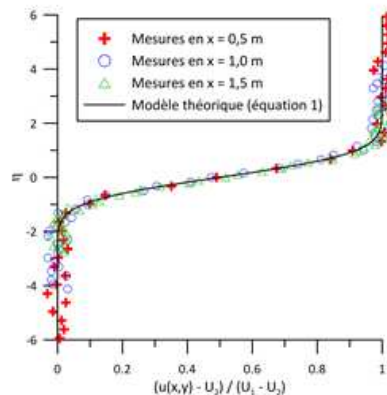


Figure 5 : Profils transversaux adimensionnés de la vitesse longitudinale moyenne. Vérification de l'autosimilarité des profils.

• Présentation des résultats

Résultats bruts (sans adimensionnement). Attention : « bruts » ne signifie pas « tracé à la va-vite » !

Résultats adimensionnés ou comparés à un modèle

• Analyse et interprétation

- Il ne suffit pas de présenter des résultats, aussi bons soient-ils
- Il est nécessaire de les commenter dans le texte :
 - Commenter l'adéquation ou non à un modèle théorique
 - Commenter les erreurs expérimentales
 - Mentionner les résultats « aberrants »

Conclusion, bibliog. et annexes

5 Conclusion

Cette séance de travaux pratiques nous a permis de caractériser la structure de l'écoulement moyen dans une couche de mélange. Des profils de vitesse ont été mesurés au moyen d'un anémomètre à tube de Pitot, et comparés au modèle analytique de Goertler (1942). L'autosimilarité des profils de vitesse a également été mise en évidence en utilisant une représentation adimensionnée.

La compréhension de la structure d'une couche de mélange et la validation d'un modèle analytique associé sont utiles aux ingénieurs pour caractériser les mécanismes d'échanges entre deux courants, par exemple entre deux rivières se rejoignant.

6 Bibliographie

Abramowitz, M., Stegun, I.A., 1965. Handbook of mathematical functions. Dover.

Brown, G.L., Roshko, A., 1974. On density effects and large structure in turbulent mixing layers. J. Fluid Mech. 64, 775-816.

Goertler, H., 1942. Berechnung von aufgaben der freien turbulenz auf grund eines neuen naherungsansatzes. Z.A.M.M. 22, 244-254.

7 Annexes

7.1 Développement approché de la fonction erreur erf

Il existe un développement approché de la fonction erreur, permettant une estimation rapide de cette fonction, avec une précision de $5 \cdot 10^{-4}$ (Abramowitz and Stegun, 1965) :

$$\text{erf}(\eta) = 1 - \frac{1}{(1 + a_1\eta + a_2\eta^2 + a_3\eta^3 + a_4\eta^4)^4} + \varepsilon(\eta) \quad \text{avec} \quad |\varepsilon(\eta)| \leq 5 \cdot 10^{-4} \quad (4)$$

$a_1 = 0,278393 \quad a_2 = 0,230389 \quad a_3 = 0,000972 \quad a_4 = 0,078108$

La fonction erf étant impaire, on utilise cette propriété pour déterminer ses valeurs lorsque η est négatif.

Conclusion

- Il est nécessaire de conclure un rapport. C'est parfois le seul paragraphe qui est lu !!
- Rappeler l'objectif, la démarche et les principaux résultats
- Dégager quelques perspectives

Bibliographie

- Cf. plus haut

Annexes

- On place en annexe des informations qui alourdiraient le corps du texte
 - Des données brutes
 - Une démonstration mathématique
 - Un programme de traitement

Remarques finales

- **Dans le cadre d'un rapport plus conséquent (projet, stage, etc.)**
 - La structure du document peut être différente
 - Certains éléments peuvent être ajoutés :
 - Remerciements
 - Résumé/abstract
 - Tables des figures
 - Toujours se référer aux pratiques en vigueur ou aux consignes de rédaction
- **Ne pas oublier !!**
 - **Une relecture**, surtout si le rapport est rédigé à plusieurs
 - Dans le cas d'une impression ou d'un transfert PDF, s'assurer de la qualité du livrable final

Merci de votre attention...

Des questions ?



36 av. Guy de Collongue
69134 Écully cedex
T + 33 (0)4 72 18 60 00

www.ec-lyon.fr

SIRET 196 901 870 000 10 - APE 8542Z