

Caractérisation du banc d'essais et traitement des données

Ce troisième chapitre est consacré à la caractérisation du banc d'essais et aux traitements des données permettant l'obtention des profils de vitesse et de température moyenne.

La première section présente les différentes campagnes de mesure menées au cours de cette thèse. Leurs configurations sont détaillées dans un premier temps puis les différents types de profil (vitesse et température) effectués pendant les campagnes sont présentés dans un second temps.

La seconde section porte sur la caractérisation du banc d'essais. Après avoir présenté l'aspect dynamique avec la mise en place du régime stationnaire ; les différentes incertitudes sur la géométrie du canal (parallélisme et verticalité des parois) et sur l'uniformité de la densité de flux de chaleur imposée en paroi sont abordées dans les sous-parties 2 et 3. Dans la sous-section suivante, une première étude sur l'impact de la stratification thermique dans la cellule en eau sur l'écoulement de convection naturelle dans le canal est présentée. Cette étude montre que la stratification thermique tend à réduire le débit dans le canal et à dégrader les échanges convectifs. Enfin, les pertes thermiques par les parois latérales du canal sont estimées dans la dernière sous-partie.

Par la suite, les différents traitements appliqués aux mesures de vitesse par LDV sont détaillés. Cette section est consacrée aux mesures de vitesse en proche paroi à l'aide de la cellule en eau trapézoïdale. Elle montre que la rotation de la sonde laser pour faire des mesures près de la paroi gauche nécessite de développer de nouvelles méthodes pour déterminer la position exacte du volume de mesure dans le canal. La prise en compte de l'évolution de la température dans la cellule en eau au cours d'une même campagne de mesure est aussi abordée dans cette section.

La section 4 traite de la conservation du débit volumique dans le canal. Dans un premier temps, elle montre que les vitesses sont très fluctuantes et qu'elles nécessitent des temps d'acquisition longs pour réduire les incertitudes. Puis, les notions d'écoulement 2D et 3D sont abordées avec les différences observées sur les débits calculés en entrée et en sortie de canal. Pour finir, une approximation est développée pour prendre en compte le caractère 3D de l'écoulement et déterminer le débit volumique à partir des profils de vitesse dans le plan central ($z/l = 0,5$).

Enfin, la dernière section porte sur la détermination des nombres caractéristiques de ce banc d'essais (Ra , Nu , Re). La précision attendue sur le calcul de ces nombres sans dimension est déterminée à partir des différentes incertitudes présentées dans les sections précédentes.

| Campagnes | Exp. | q (W.m ⁻²) | T_e (°C) | b (mm) | Ra_b^* | Types de cellule |
|--------------|------|-----------------------------|---------------|-------------|----------------------|----------------------|
| février 2011 | 0 | 191,8 | / | 48,1 | 2-3.10 ⁶ | Double-vitrage |
| | 1 | 190,7 | 22,6 | 45,1 | 1,68.10 ⁶ | |
| | 2 | 381,7 | 23,5 | 45,1 | 3,63.10 ⁶ | |
| mai 2011 | 3 | 763,6 | 27,3 | 45,1 | 9,07.10 ⁶ | Double-vitrage isolé |
| | 4 | 1147 | 32,6 | 45,1 | 1,72.10 ⁷ | |
| | 5 | 2305 | 36,5 | 45,5 | 4,34.10 ⁷ | |
| octobre 2011 | 6 | 1150 | 33,8 | 59 | 6,89.10 ⁷ | Simple-vitrage isolé |
| janvier 2012 | 7 | 2343 | 43,7 | 63 | 2,79.10 ⁸ | |
| février 2012 | 8 | 1537 | 39,6 | 61 | 1,35.10 ⁸ | |

TABLE 3.1 – Récapitulatif de la configuration du banc d'essais durant les différentes campagnes de mesure. La densité de flux de chaleur aux parois q est une moyenne temporelle sur les 24 chaufferettes ; T_e est la température moyenne temporelle sur les deux thermocouples en entrée (1017 et 2017, cf. fig. 2.13 p. 70) ; b est l'écartement moyen du canal et Ra_b^* est le nombre de Rayleigh (cf. éq. 3.14).

Présentation des différentes campagnes de mesure

Cinq campagnes de mesure ont été menées au cours de cette thèse. La première fut une campagne test durant laquelle le rôle de l'isolation de la cellule en eau a été étudié (voir §3.2.4). Durant la seconde campagne, des profils de température et de vitesse ont été établis en entrée et en sortie de canal pour 5 puissances différentes. Lors des trois suivantes, faites pour trois puissances différentes, la vitesse et la température ont été mesurées à différentes hauteurs sur la moitié gauche du canal, et notamment en proche paroi.

3.1.1 Conditions aux limites et géométrie

Tous les essais présentés dans ce manuscrit ont été faits avec une condition de chauffage uniforme symétrique sur les deux parois. En effet, il a été choisi d'étudier l'écoulement de convection naturelle en canal vertical dans un cas simple (« de référence ») avant d'envisager des configurations particulières (asymétrique, alternée...) plus proches des applications visées.

Lors de ces essais, trois paramètres ont varié : la densité de flux de chaleur imposée aux parois (q), la température d'entrée (T_e) et l'écartement du canal (b). La température d'entrée a été ajustée, en changeant la température de consigne du système de refroidissement, en fonction de la puissance injectée de façon à rester dans les conditions de validité de l'approximation de Boussinesq (cf. annexe A).

Par la suite, 9 expériences différentes seront distinguées ; leur configurations sont recensées dans le tableau 3.1. La densité de flux de chaleur q est une moyenne sur les 24 chaufferettes, T_e est la température moyenne mesurée par les deux thermocouples en entrée (1017 et 2017, cf. fig. 2.13 p. 70), b est l'écartement moyen sur la hauteur du canal et Ra_b^* est le nombre de Rayleigh modifié défini par l'équation 3.14. La première campagne (exp. 0) est particulière et sera plus détaillée dans la partie 3.2.4.

3.1.2 Mesures de vitesse et de température

Les 9 expériences ont été réalisées au cours de 5 campagnes différentes : une première campagne test en février 2011 suivie d'une campagne exploratoire en mai 2011 durant laquelle 5 puissances ont été balayées pour une première analyse, puis 3 campagnes plus approfondies consacrées chacune à une puissance donnée. La durée des campagnes de mesure dépend du nombre de profils de vitesse mesurés dans le canal.

Lors des deux premières campagnes (février et mai 2011), des profils de vitesse et de température (sauf pour l'expérience 2 où la température n'a pas été mesurée suite à un problème technique) ont été mesurés en entrée ($x/H = 0,04$) et en sortie ($x/H = 0,96$) sur la largeur du canal pour chaque puissance. La sonde laser étant perpendiculaire à la vitre avant de la cellule en eau, la vitesse horizontale n'a pas pu être mesurée près des parois (voir fig. 2.16(a)). De plus, les mesures de vitesses horizontale et verticale ne coïncident pas ; i.e. le terme croisé du tenseur de Reynolds ($\overline{u'v'}$) ne peut être calculé. En effet, pour avoir accès à ce terme, il faut que le système de LDV enregistre une mesure de vitesse verticale et horizontale en même temps, or toutes les particules qui traversent le volume de mesure ne génèrent pas un signal valide sur les deux composantes du système. Pour pouvoir calculer le terme $\overline{u'v'}$, il faut faire des mesures en coïncidence ; i.e. le système de LDV n'enregistre que les particules qui génèrent un signal sur les deux composantes, ce qui réduit fortement le taux d'acquisition sur chaque composante. Pour ce faire, le système LDV propose deux moyens :

- « hardware coincidence » : les signaux sont directement triés de façon analogique et seules les particules valides sont sauvegardées ;
- « software coincidence » : le traitement est fait par le logiciel à la fin de l'acquisition en ne retenant que les composantes de vitesses acquises dans une certaine fenêtre de temps.

Les trois dernières campagnes ont été consacrées à l'étude détaillée de l'écoulement pour une puissance donnée. Lors de ces campagnes, des mesures en proche paroi ont été réalisées sur la moitié gauche du canal avec la sonde laser inclinée et l'utilisation de la cellule trapézoïdale de compensation (cf. §2.3.3.4). Des profils de vitesse et de température ont été obtenus pour différentes hauteurs correspondant aux centres des chaufferettes : 2 à 12 pour les expériences 6 et 8 ; et 2, 4 à 6 et 8 à 12 pour l'expérience 7 (aucun profil n'a été fait en face de la première chaufferette car l'entrée du canal était trop perturbée). Les mesures ont été faites en coïncidence (accès à $\overline{u'v'}$) et proche de la paroi gauche (profils de $y/b = 0$ à $y/b = 0,7$). Les premiers profils de l'expérience 6 ont été faits en hardware coincidence, mais le logiciel avait un problème, l'enregistrement du temps était aberrant sur les signaux qui avaient le plus petit taux d'acquisition. La seconde méthode a donc été utilisée par la suite pour la fin de l'expérience et pour les 2 suivantes. De plus, lors des trois campagnes, des problèmes techniques ont été rencontrés avec le laser avec une perte de puissance importante (environ 50 % de perte en sortie de laser). Cette perte a eu pour effet de réduire les taux d'acquisition des mesures et surtout ceux des expériences 7 et 8. Enfin, les profils de vitesse obtenus lors de l'expérience 8 ne seront pas exploités à cause de problèmes rencontrés avec le système de refroidissement.

3.2 Caractérisation du banc d'essais

Dans cette section, les écarts entre la conception et les conditions de fonctionnement réelles, d'une part, et les incertitudes de mesure, d'autre part, seront évaluées.

3.2.1 Temps d'établissement

Le temps d'établissement varie peu d'une campagne de mesure à l'autre, il est d'environ 48 heures. La figure 3.1(a) présente les températures mesurées dans la moitié droite du banc d'essais à l'extérieur du canal et dans la salle lors du démarrage de l'expérience 8 (cf. tab. 3.1). La position des capteurs peut être repérée sur la figure 2.13 (page 70), ils correspondent aux thermocouples 1013 à 1019 et 1021, la température de la salle est mesurée avec le thermocouple 1019 non représenté sur cette figure. Pour des raisons de clarté, les courbes sont des moyennes glissantes faites sur 400 s (100 pts). Ces courbes montrent que la température n'évolue quasiment plus au bout de 48 heures mise à part celle en bas de la cellule en eau. Cette dernière se stabilise difficilement à cause de l'absence de brassage au fond de la cuve. En effet, la température de l'eau dans la cellule est homogénéisée par le brassage induit par l'écoulement de convection naturelle dans le canal : l'eau monte dans le canal et redescend derrière les blocs parois. Néanmoins, ce brassage n'atteint pas le bas de la cellule et les thermocouples situés environ 20 cm au dessous de l'entrée du canal. Le fond de la cuve se stratifie donc entre la température froide de la paroi vitrée du fond (notamment au niveau de l'ouverture dans le support en polystyrène pour de futures études PIV) et la température de l'entrée du canal.

Cependant, comme l'évolution de la température au fond de la cuve n'a pas d'influence sur l'écoulement, elle n'est pas prise en compte pour la validation du régime établi. Cette validation est faite sur l'évolution des températures diminuées de la température d'entrée comme le montre la figure 3.1(b). En effet, les campagnes se déroulant sur des longues périodes (1 à 2 mois), il peut y avoir des évolutions de la température dans la cellule (illustré sur la fig. 3.12) dues principalement à des variations au niveau du système de refroidissement.

Le régime établi est donc considéré comme atteint lorsque les température mesurées dans la cuve à l'extérieur du canal ne varient plus par rapport à la température mesurée en entrée de canal : $T - T_e = C^{te}$.

3.2.2 Géométrie du canal

La largeur du canal est un des paramètres clés de ce banc d'essais car elle est la longueur de référence. De plus, c'est elle qui contribue le plus à l'incertitude sur le calcul du nombre de Rayleigh modifié classique (basé sur b) puisqu'elle y apparaît à l'exposant 5. Une maîtrise du réglage du parallélisme des parois est donc essentielle.

Comme expliqué auparavant (§2.2.3.4 p.63), la verticalité du canal et son parallélisme sont modifiables à l'aide d'un système de tiges filetées à l'arrière des blocs parois (voir schéma 2.7 p.63). L'écartement, quant à lui, est ajusté à l'aide des systèmes vis-écrous reliant les blocs parois aux plaques support. Tous les réglages sont faits en utilisant les faisceaux laser et le système de déplacement comme capteur de position.

Le réglage des parois se fait en deux temps comme le montre la figure 3.2 : le réglage de la verticalité puis celui du parallélisme. La verticalité se fait par rapport au bord de la paroi situé contre la vitre avant et au laser monté sur le système de déplacement. Le réglage est fait de sorte que les deux bords avant soient parallèles ; i.e. le canal peut être très légèrement incliné, mais il faut éviter qu'il soit convergent (ou divergent). Pour cela, l'arête avant (parallèle à x) de la paroi en inox est pointée avec le couple de faisceaux laser verticaux et le bloc est ajusté de façon à ce que cette arête soit verticale. Avec ce système de réglage, l'écart mesuré sur la largeur du canal entre le bas et le haut est de $\pm 0,5$ mm. Cet écart est dû au système de tiges

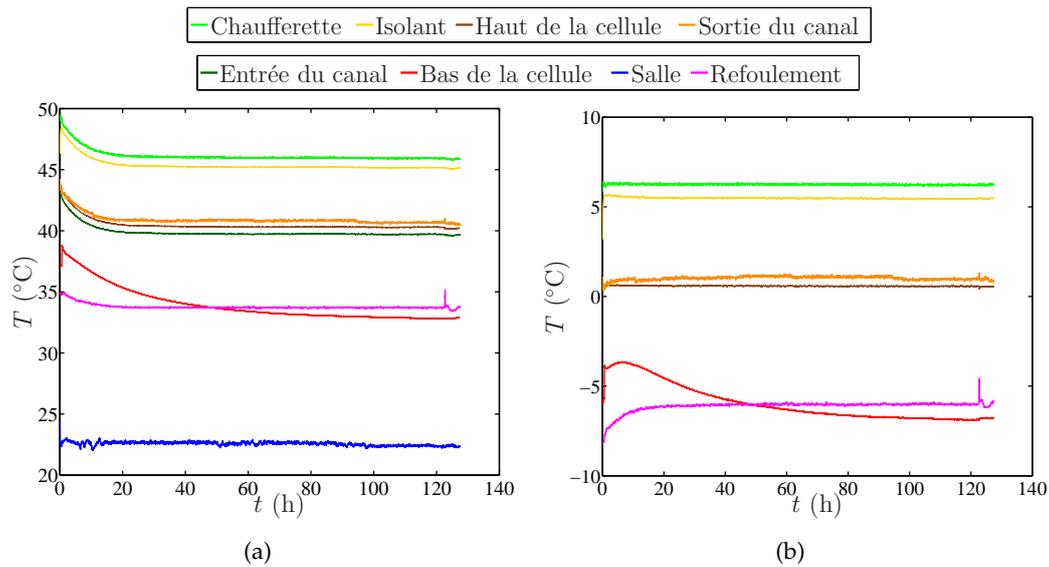


FIGURE 3.1 – Évolution des températures mesurées sur la moitié droite du banc d'essais lors du démarrage de la campagne de février 2012. Pour des raisons de lisibilité, les courbes présentées sont des moyennes glissantes faites sur 400 s. (a) Températures mesurées. (b) Écart de température avec l'entrée du canal. Voir figure 2.13 (page 70) pour la position des capteurs.

filetées qui est trop grossier. Néanmoins, cet écartement, mesuré au niveau de la vitre avant de la cuve, ne correspond pas à l'écartement réel dans le plan central du canal ($xOy, z/l = 0, 5$) car les parois ne sont pas parfaitement parallèles à l'axe z . Le parallélisme selon z se fait par rapport au dessus des blocs où l'écartement est mesuré grâce à un réglage. L'incertitude sur ce réglage est de ± 1 mm sur la profondeur des blocs (23 cm), soit $\pm 0,5$ mm d'incertitude sur l'écartement au centre.

L'incertitude sur la largeur du canal est donc de ± 1 mm. Cependant, la liaison entre le bloc paroi et le système vis-écrou n'est pas une liaison rotule parfaite et il y a un jeu important au niveau cette liaison. L'écartement mesuré en face avant et au dessus peut donc être différent de celui mesuré en face arrière et en dessous. Il faudra donc majorer l'incertitude par la suite.

3.2.3 Conditions aux limites en paroi

Le banc d'essais a été conçu de façon à avoir une condition de densité de flux de chaleur imposée en paroi. Celles-ci sont donc chauffées par des résistances électriques branchées en parallèle sur une alimentation Agilent® 6675A pouvant fournir jusqu'à 60 V sous 35 A avec une stabilité de $\pm 0,02$ V. Le chauffage s'effectuant par effet joule, il est indispensable que le circuit électrique soit équilibré pour obtenir l'uniformité des densités de flux de chaleur injectées. Or, lors de l'étalonnage des fluxmètres, une erreur de branchement a fait perdre les douze chaufferettes de la paroi droite. Elles ont donc été refaites mais la résistance électrique moyenne des 12 nouvelles chaufferettes n'était plus la même que celle des 24 premières. En effet, lors de la fabrication, la société Captec® fait en sorte que toutes les chaufferettes d'un même lot soient quasi-identiques, mais c'est plus difficile entre deux lots différents. La résistance électrique de toutes les chaufferettes a donc dû être rééquilibrée et par la même occasion, les résistances entre les chaufferettes d'un même lot ont également été rééquilibrées.

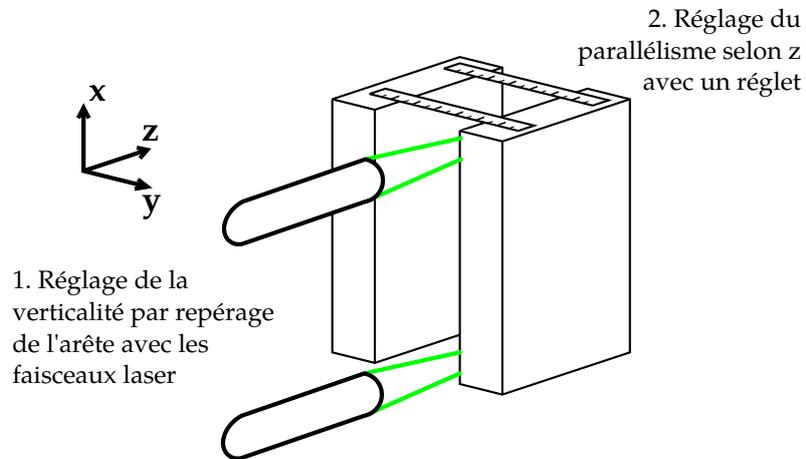


FIGURE 3.2 – Schéma des deux étapes de réglage des parois : 1. réglage de la verticalité ; 2. réglage du parallélisme.

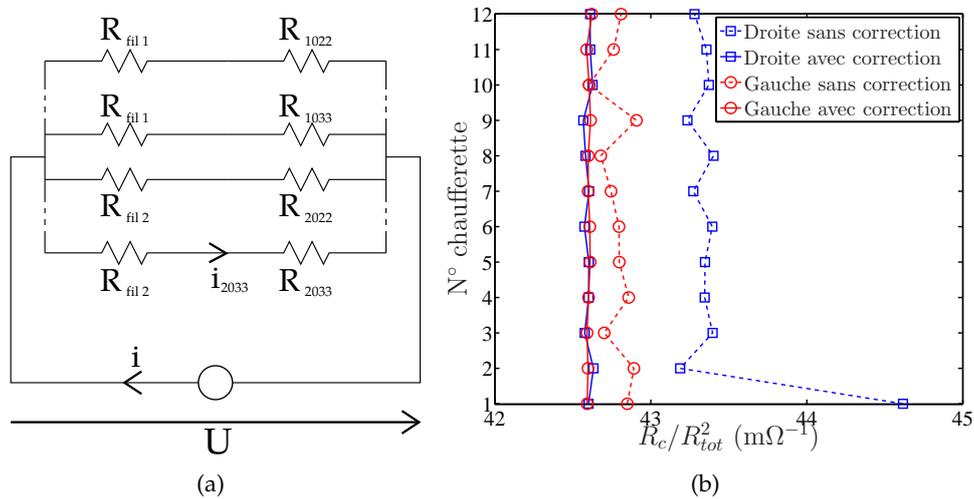


FIGURE 3.3 – (a) Schéma électrique des chaufferettes montées en parallèle sur l'alimentation ; chaque branche est constituée de deux résistances en série, celle de la chaufferette ($\sim 20 \Omega$) et celle du fil ($\sim 100 m\Omega$). (b) Valeur du terme $\frac{R_c}{R_{tot}^2}$ pour chaque chaufferette avant (pointillés) et après (traits pleins) correction avec une résistance de compensation.

| Chauff. | R_{c+fil} (Ω) | R_c (Ω) | R_{sup} (Ω) | Chauff. | R_{tot} (Ω) | R_c (Ω) | R_{sup} (Ω) |
|---------|-----------------------------|-----------------------|---------------------------|---------|---------------------------|-----------------------|---------------------------|
| 1022 | 22,328 | 22,243 | 0,522 | 2022 | 23,227 | 23,117 | 0,07 |
| 1023 | 23,069 | 22,984 | 0,15 | 2023 | 23,204 | 23,094 | 0,08 |
| 1024 | 22,958 | 22,873 | 0,22 | 2024 | 23,308 | 23,198 | 0,03 |
| 1025 | 22,985 | 22,900 | 0,2 | 2025 | 23,222 | 23,112 | 0,07 |
| 1026 | 22,984 | 22,899 | 0,2 | 2026 | 23,255 | 23,145 | 0,051 |
| 1027 | 22,959 | 22,874 | 0,22 | 2027 | 23,256 | 23,146 | 0,051 |
| 1028 | 23,024 | 22,939 | 0,18 | 2028 | 23,284 | 23,174 | 0,04 |
| 1029 | 22,955 | 22,870 | 0,22 | 2029 | 23,320 | 23,210 | 0,022 |
| 1030 | 23,044 | 22,959 | 0,18 | 2030 | 23,195 | 23,085 | 0,08 |
| 1031 | 22,971 | 22,886 | 0,2 | 2031 | 23,361 | 23,251 | \ |
| 1032 | 22,979 | 22,894 | 0,2 | 2032 | 23,275 | 23,165 | 0,047 |
| 1033 | 23,020 | 22,935 | 0,18 | 2033 | 23,249 | 23,139 | 0,051 |

TABLE 3.2 – Valeurs des résistances électriques des chaufferettes avec ($R_{chauff.+fil}$) et sans les fils ($R_{chauff.}$), ainsi que des résistances de compensation ($R_{sup.}$).

La figure 3.3(a) représente le schéma électrique du système, où U et i représentent la tension et l'intensité délivrées par l'alimentation. Ici, la résistance des fils doit être prise en compte car ceux-ci sont assez longs sur le banc d'essais : ceux de la paroi gauche mesurent environ 19,4 m (± 10 cm), tandis que ceux de la droite environ 15 m (plus courts car recoupés après l'incident lors de l'étalonnage). La résistance estimée pour les fils de la paroi gauche est donc de 109,9 m Ω ($\pm 0,6$ m Ω) et celle des fils de la paroi droite de 85,0 m Ω ($\pm 0,6$ m Ω).

Par exemple, pour la chaufferette n° 2033, en notant R_{c2033} sa résistance électrique et R_{fil2} celle de son fil associé, i_{2033} le courant la traversant et U la tension aux bornes de ses fils, la puissance \dot{P}_{2033} dissipée par cette chaufferette peut être calculée comme :

$$\dot{P}_{2033} = R_{c2033} \cdot i_{2033}^2 = \left(\frac{U}{R_{c2033} + R_{fil2}} \right)^2 R_{c2033}. \quad (3.1)$$

Pour corriger les écarts de résistances électriques entre chaque chaufferette, des résistances de compensation (R_{sup}) ont été ajoutées en série, ce qui revient à augmenter la résistance électrique du fil :

$$\dot{P}_{2033} = R_{2033} \cdot i_{2033}^2 = \left(\frac{U}{R_{2033} + R_{fil2} + R_{sup2033}} \right)^2 R_{2033} = U^2 \left(\frac{R_c}{R_{tot}^2} \right)_{2033}. \quad (3.2)$$

Le réajustage a été fait par rapport à la chaufferette possédant la plus grosse résistance (la chaufferette n° 2031) et les valeurs des résistances de compensation ont été choisies en fonction des valeurs classiques du commerce. Le tableau 3.2 recense les résistances électriques de chaque chaufferette avec et sans les fils (calculées en mesurant la résistance aux bornes de l'ensemble puis en retranchant la résistance estimée du fil) ainsi que les résistances de compensation ajoutées.

La figure 3.3(b) présente la valeur du terme $\frac{R_c}{R_{tot}^2}$ (R_c : résistance d'une chaufferette, $R_{tot} = R_c + R_{fil} (+R_{sup})$) qui caractérise la puissance injectée par chaque

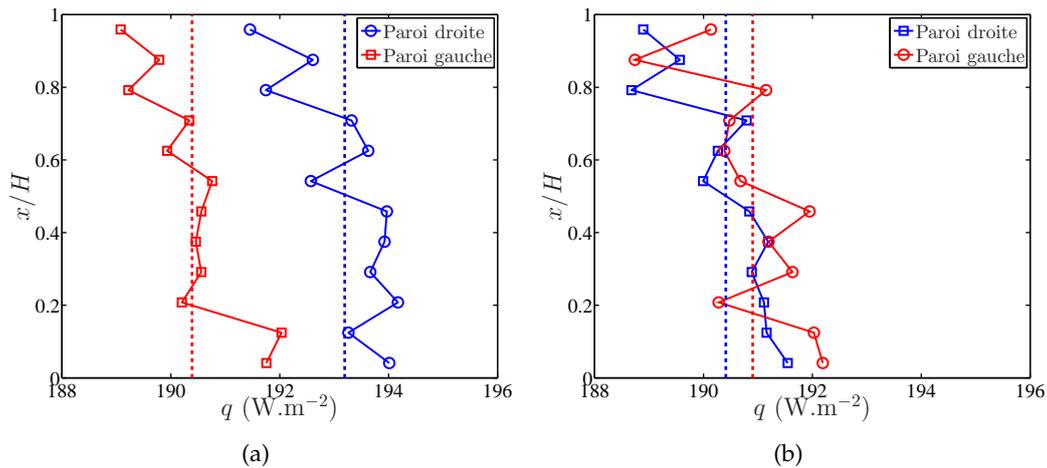


FIGURE 3.4 – Profils des densités de flux de chaleur moyennes injectées par les chaufferettes avant le rééquilibrage des résistances électriques à gauche et après à droite.

chaufferette ($\dot{P}_c = U^2 \frac{R_c}{R_{tot}^2}$) avec et sans le rééquilibrage des résistances. Ces courbes montrent que, sans compter la chaufferette 1022, l'écart moyen de $650 \mu\Omega$ entre les deux parois a été réduit à $3\mu\Omega$ après rééquilibrage ; et que les écarts maximaux de $300 \mu\Omega$ observés sur la paroi droite ont été ramenés à $60\mu\Omega$.

Plus concrètement, les figures 3.4 présentent les densités de flux de chaleur moyennes en paroi obtenues avant et après rééquilibrage pour une densité de flux imposée d'environ 190 W.m^{-2} (puissance injectée d'environ 46 W). Avant, la densité de flux de chaleur moyenne à droite était de $193,2 \text{ W.m}^{-2}$ et de $190,4 \text{ W.m}^{-2}$ à gauche ; après le rééquilibrage, elle est passée à $190,4 \text{ W.m}^{-2}$ à droite et $190,9 \text{ W.m}^{-2}$ à gauche. Les écarts maximaux mesurés sur la même paroi sont de l'ordre de 3 W.m^{-2} avec et sans rééquilibrage. Il n'empêche que l'origine de ces écarts peut être liée aux caractéristiques de l'écoulement. Les profils de la figure 3.4(b) ont été obtenus lors de l'expérience 1 (cf. tab. 3.1). Le chapitre suivant (cf. fig 4.3(a) p. 118), montrera que la température des parois lors de cette expérience est croissante avec l'altitude dans le canal. Cela montre que l'échange convectif en paroi diminue avec la hauteur et explique la diminution de la densité de flux de chaleur injectée aux parois observée sur la figure 3.4(b). En effet, lorsque l'échange en paroi diminue, les pertes dans l'isolant augmentent et donc la densité de flux injectée dans le canal diminue.

La condition de densité de flux de chaleur imposée est quand même bien respectée avec une dissymétrie inférieure à 0,3 % entre les parois et un écart maximal sur chaque paroi inférieur à 2 %.

3.2.4 Rôle de l'isolation

La première campagne qui fut une campagne de test a permis de mettre en évidence la faible efficacité du double-vitrage de la cellule en eau et la nécessité d'isoler cette dernière.

Lors de cette campagne, une faible puissance a été utilisée ; environ 46 W en configuration de chauffage uniforme symétrique. La température de consigne du bain thermostaté était de 22°C , identique à celle du système de régulation thermique de la pièce. Dans cette configuration, l'établissement d'une stratification thermique entre l'entrée du canal et le haut de la cellule en eau a été observée.

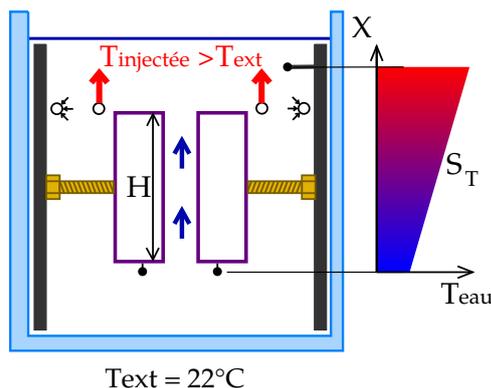


FIGURE 3.5 – Schéma de fonctionnement du banc d'essais avec une stratification imposée entre le haut et le bas de la cellule.

Cette stratification était due à l'accumulation de l'eau chaude en haut de la cellule tandis que l'entrée du canal et le bas de la cellule restaient à 22°C à cause des pertes thermiques avec l'extérieur ; la puissance injectée étant trop faible pour générer un brassage suffisant.

Afin de mieux comprendre l'influence de la stratification sur l'écoulement de convection naturelle dans le canal, des essais ont été réalisés en imposant une stratification dans la cellule en eau. Le principe est illustré sur la figure 3.5 ; le haut de la cellule en eau est maintenu à une température supérieure à celle de la pièce en utilisant le système de régulation (cf. §2.2.4 p. 64), tandis que les pertes thermiques à travers le double-vitrage maintiennent le bas de la cellule aux alentours de la température de la pièce. Quatre stratifications (S_T) différentes ont été imposées : 0, 4/2, 1/4, 6 et 9, 1°C.m⁻¹ ; et comparées au cas sans stratification (exp. 1, voir tab. 3.1) fait par la suite après avoir isolé la cellule en eau. Pour ces 5 expériences, une densité de flux de chaleur uniforme et symétrique de 191 W.m⁻² était imposée dans le canal (environ 46 W). Pour caractériser ces 4 stratifications, un paramètre de stratification Ψ est introduit, il est défini tel que :

$$\Psi = \frac{S_T}{\Delta T_s / H_s} ; \quad (3.3)$$

ΔT_s étant l'écart de température entre la paroi en sortie (mesurée au centre de la 12^{ème} chaufferette) et l'entrée du canal et H_s étant la distance entre le centre de la 12^{ème} chaufferette et le bord de la première chaufferette (l'entrée adiabatique du canal n'est pas prise en compte).

La figure 3.6(a) présente les profils de vitesse mesurés en sortie ($x/H = 0,96$ et $z/l = 0,5$) avec et sans stratification. La figure 3.6(b) montre l'évolution du nombre de Reynolds en fonction du paramètre de stratification Ψ . Les barres d'erreur représentent l'incertitude sur le calcul du nombre de Reynolds liée aux incertitudes sur la mesure de l'écartement du canal (voir §3.2.2) et sur les vitesses moyennes (cf. §3.4.1). Ces deux figures montrent que la stratification imposée à l'extérieur du canal joue le rôle d'un bouchon en réduisant fortement le débit de l'écoulement. De plus, cette réduction du débit est importante, même sous une faible stratification ; le Reynolds est réduit de moitié dès lors qu'une stratification de 0,4°C.m⁻¹ ($\Psi = 0,16$) est imposée.

Les figures 3.7 présentent les profils de température en paroi en fonction de la hauteur ainsi que leur écart à la stratification. Sur la figure 3.7(a) la température de paroi est diminuée de la température d'entrée du canal. Sur la figure 3.7(b), la

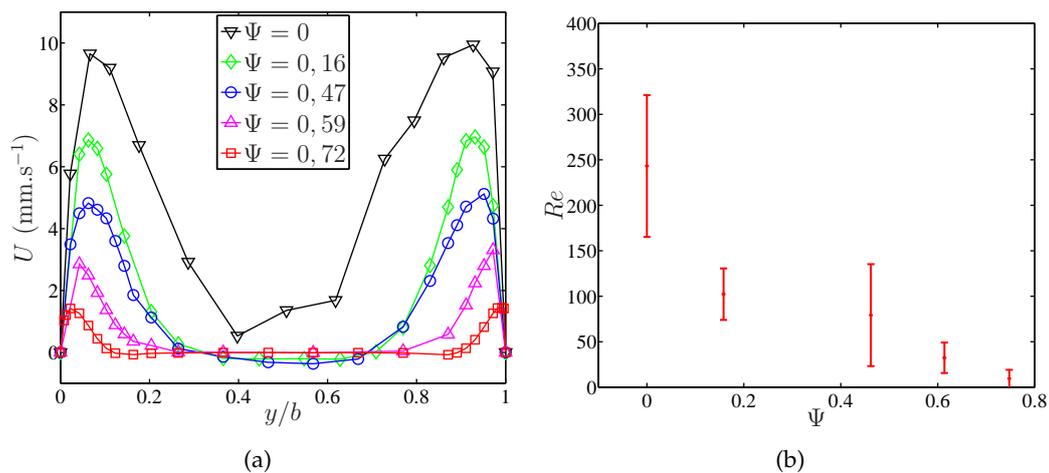


FIGURE 3.6 – (a) Profils de vitesse en sortie ($x/H = 0,96$ et $z/l = 0,5$) mesurés sous différentes stratifications thermiques de la cellule en eau. (b) Évolution du nombre de Reynolds, calculé à partir du débit, en fonction du paramètre de stratification Ψ .

stratification thermique a aussi été retranchée aux profils de température en paroi. Ces deux graphes montrent que la stratification tend à augmenter la température des parois du canal en limitant l'effet cheminée. Les échanges convectifs sont ainsi dégradés, notamment au centre du canal pour les fortes stratifications. Cependant, contrairement aux observations précédentes sur le débit, l'impact sur la thermique de l'écoulement n'est pas significatif pour les faibles stratifications ; il est négligeable pour $\Psi = 0,16$.

Cette étude rapide sur la stratification thermique dans la cellule en eau a mis en évidence son impact sur l'écoulement de convection naturelle dans le canal. La stratification a pour effet de limiter le débit dans le canal et de dégrader l'efficacité des échanges convectifs, ce qui se traduit par une augmentation de la température des parois. Néanmoins, même si le débit diminue fortement avec une faible stratification ($S_T = 0,4^\circ\text{C.m}^{-1}$), l'échange thermique lui n'est pas impacté : la température des parois n'est pratiquement pas modifiée par rapport au cas sans stratification. La thermique de l'écoulement est modifiée ici à partir d'une stratification de $2,1^\circ\text{C.m}^{-1}$ ($\Psi = 0,47$).

Suite à ces résultats, la cellule en eau a été isolée (cf. §2.2.2 p. 58) pour éviter la mise en place de la stratification et pour limiter l'influence de la température de la salle sur le fonctionnement du banc d'essais.

3.2.5 Évaluation des pertes

La cellule en eau est isolée à l'aide de 5 cm de Styrodur® (cf. §2.2.2 p. 58) afin d'éviter les déperditions de chaleur vers l'extérieur. Cette isolation permet de stabiliser la température à l'intérieur plus facilement et de ne pas être influencé par les variations de température dans la pièce. En revanche, le haut de la cuve est partiellement ouvert (pour laisser passer la tige du micro-thermocouple) et il y a des déperditions par évaporation qui dépendent de la température de l'eau ; ces pertes peuvent être vues comme un refroidissement supplémentaire de l'extérieur du canal. Dans les expériences, seules les pertes au niveau des parois latérales du canal comptent (vitre avant et arrière). Comme la vitre avant du canal n'est pas isolée pour permettre l'accès à la mesure par LDV les pertes par cette surface ont été

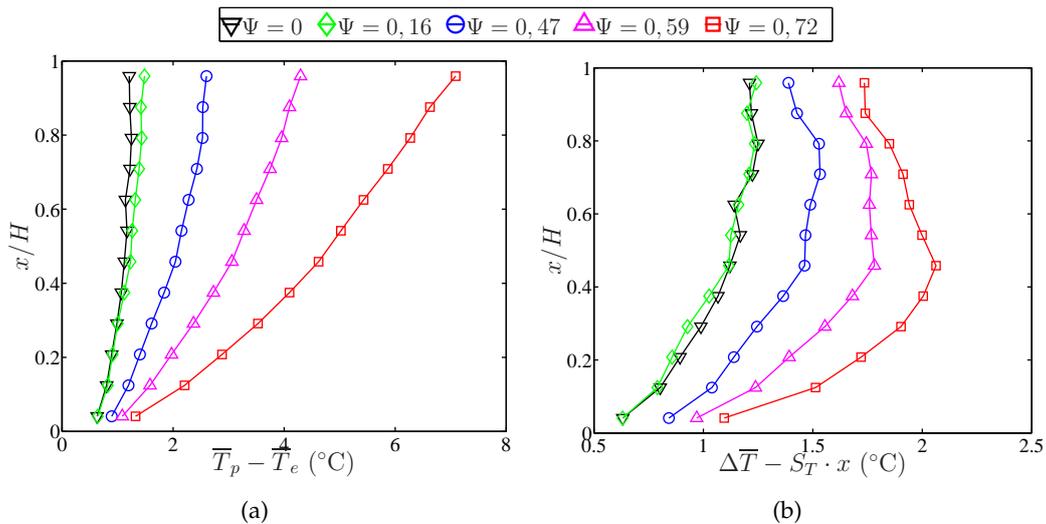


FIGURE 3.7 – (a) Profils de température en paroi (T_p), diminués de la température d'entrée (T_e), mesurés sous différentes stratifications thermiques de la cellule en eau. (b) Mêmes profils ($\Delta T = T_p - T_e$) auxquels a été soustraite la stratification thermique ($S_T \cdot x$).

estimées.

Ainsi, des profils de température ont été mesurés selon z en quatre positions (selon x et y) pour une configuration de chauffage uniforme sur les deux parois et une puissance injectée de 276 W (exp. 6, cf. tab. 3.1). Quatre profils ont été obtenus :

- un profil le long de la paroi gauche ($y = 0$) au niveau de la 12^{ème} chaufferette et dans ce cas, le micro-thermocouple touche la paroi ;
- un profil en proche paroi ($y/b = 0,1$; dans la couche limite thermique) au niveau de la 12^{ème} chaufferette du centre jusqu'à la vitre ;
- un profil sur toute la profondeur du canal au centre ($y/b = 0,5$) au niveau de la 12^{ème} chaufferette ;
- et un profil en proche paroi ($y/b = 0,1$) au niveau de la 6^{ème} chaufferette.

Ces quatre profils sont tracés sur la figure 3.8. Les profils dans les couches limites thermiques ($y/b = 0,1$) ont été faits sans la cellule trapézoïdale et jusqu'à la paroi latérale (thermocouple en contact avec la vitre avant de la cellule en eau). Les deux autres, ont été faits avec cette dernière, la position du thermocouple n'est donc pas connue exactement (cf. §3.3.3) et a été estimée de sorte que les gradients thermiques ($\frac{T_{mesure} - T_{vitre}}{y_{mesure} - y_{vitre}}$) calculés à partir de la mesure la plus proche de la vitre avant et de la température de cette dernière correspondent. Ces profils ne peuvent donc pas être utilisés pour l'évaluation des pertes mais ils montrent que la température est constante sur la profondeur du canal.

Les pertes sur la paroi latérale avant sont estimées à 35,5 W.m⁻² au niveau de la 12^{ème} chaufferette et à 29,3 W.m⁻² au niveau de la 6^{ème}. L'incertitude sur la position exacte de la paroi est de ± 1 mm et le gradient thermique est calculé sur 8 mm ; l'incertitude sur les pertes est donc de 13 %. Sachant que le rapport des surfaces entre les parois latérales et la surface chauffée (surface des chaufferettes) est de 30 % ; en surestimant les pertes à 36 W.m⁻² sur les deux parois (moyenne des pertes au niveau des chaufferettes 6 et 12 majorée par l'incertitude de 13 %), elles représentent moins de 1 % de la puissance injectée dans le canal. Ce calcul a été fait dans le cas de l'utilisation de la cellule trapézoïdale.

Dans le cas où le laser est perpendiculaire à la vitre avant de la cuve (pour me-

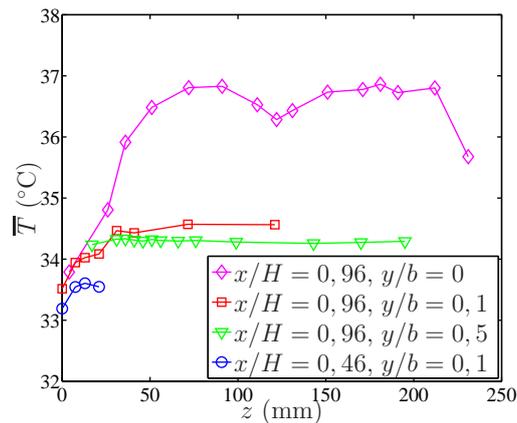


FIGURE 3.8 – Profils de température selon z mesurés lors de l'expérience 6 à l'aide du micro-thermocouple.

surer sur toute la largeur du canal), la cuve est isolée aussi à l'avant et une fenêtre de 5 cm de côté est ouverte pour laisser passer les faisceaux. Les déperditions au niveau de cette fenêtre sont négligées devant celles sur toute la hauteur du canal lorsque la cellule trapézoïdale est installée. Les pertes par les parois latérales du canal peuvent donc être négligées.

3.3 Calcul des profils de vitesse et de température moyennes

Tel que discuté au le chapitre précédent, la vitesse et la température dans le canal sont mesurées à l'aide d'un système de LDV couplé à un micro-thermocouple. Ces deux dispositifs sont montés sur un système de déplacement à deux composantes (x et y) indépendant du banc d'essais. Ce système de déplacement permet une précision sur la position du volume de mesure de $\pm 10 \mu\text{m}$ et sert de référence pour le réglage de la géométrie du canal. Les parois sont donc réglées et leur position est repérée, à l'aide des faisceaux lasers du système LDV.

Cependant, lors des expériences 6 à 8, la sonde laser a été tournée d'un angle de 4° par rapport à la vitre avant de la cellule en eau pour permettre la mesure de la vitesse horizontale en proche paroi (cf. §2.3.3.4 p. 75). Du fait de cette inclinaison, la position des parois ne peut plus être repérée de la même façon que lorsque la sonde était parallèle à ces dernières. Cet effet est illustré sur le schéma 3.9. Lorsque la sonde est parallèle aux parois, la position de ces dernières (Y_p) peut être repérée facilement dans le plan vertical; mais lorsque la sonde est inclinée, la position de la paroi gauche dans le repère du système de déplacement est modifiée (Y_{p2}) sans pouvoir être calculée (pas de mesure exacte des angles et des distances à cause de la réfraction).

Une méthode, basée sur la mesure des densités de flux de chaleur en paroi ainsi que des profils de température dans le canal, a donc été développée pour estimer avec précision la position de la paroi. Cette méthode a été validée à l'aide des mesures de température faites lors des expériences 1, 3, 4 et 5 où la sonde était parallèle aux parois.

3.3.1 Validation de la mesure de température en proche paroi

Durant les expériences 1, 3, 4 et 5, les mesures de température et de vitesse dans le canal ont été faites avec la sonde parallèle aux parois du canal. La vitesse et la

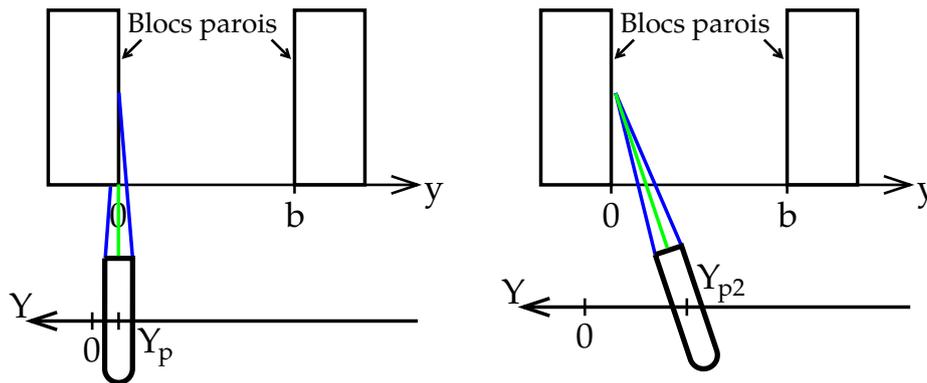


FIGURE 3.9 – Schéma montrant la correspondance entre les axes horizontaux du système de déplacement (Y) et du canal (y). Ces deux axes ne sont pas orientés dans le même sens et l’inclinaison de la sonde laser induit un décalage, comme le montre la position de la paroi pour le système de déplacement (Y_p).

température ont été mesurées sur toute la largeur du canal en entrée ($x/H = 0,04$) et en sortie ($x/H = 0,96$). La figure 3.10(a) présente les profils de vitesse en sortie pour ces 4 expériences et la figure 3.10(b) les demi-profils de température correspondants. Seules les parties gauches sont présentées car la perche est légèrement inclinée vers la paroi gauche et ne permet pas de s’approcher de la paroi droite. Un profil de température plus détaillé a aussi été réalisé durant l’expérience 4 (nommé exp. 4 bis) afin de vérifier la répétabilité des mesures et de mieux approcher le gradient en paroi. Sur ces expériences, la position de la paroi est déterminée précisément ; le gradient de température en paroi peut donc être calculé de deux façons : à l’aide de la mesure de la densité de flux de chaleur en paroi (grâce aux fluxmètres) et avec les mesures de température dans le canal. La relation entre les deux est :

$$\left. \frac{\partial T}{\partial y} \right)_{y=0} = -\frac{q_p}{\lambda} ; \quad (3.4)$$

où q_p est la densité de flux de chaleur en paroi et λ la conductivité thermique du fluide. La figure 3.11 présente les profils de température, de la figure 3.10(b), adimensionnés de la sorte :

$$T^* = \frac{T - T(y/b = 0,5)}{T(y/b = 0) - T(y/b = 0,5)} ; \quad (3.5a)$$

$$y^* = \frac{q_p y}{\lambda (T(y/b = 0) - T(y/b = 0,5))} . \quad (3.5b)$$

Ainsi, le gradient de température en paroi exprimé par l’équation 3.4 devient :

$$\left. \frac{\partial T^*}{\partial y^*} \right)_{y^*=0} = -1. \quad (3.6)$$

Le gradient thermique en paroi est représenté par la droite noire de pente -1 et les trois premiers points de chaque profil ont été interpolés par une parabole passant par le point en paroi. Pour l’expérience 4 bis, une interpolation a aussi été faite sur les points à $y^* = 1,4$ et $y^* = 1,8$ (courbes en pointillés). Cette figure montre que le gradient thermique à la paroi peut être correctement approché par une parabole à condition que les mesures de température ne soient pas trop espacées (comme

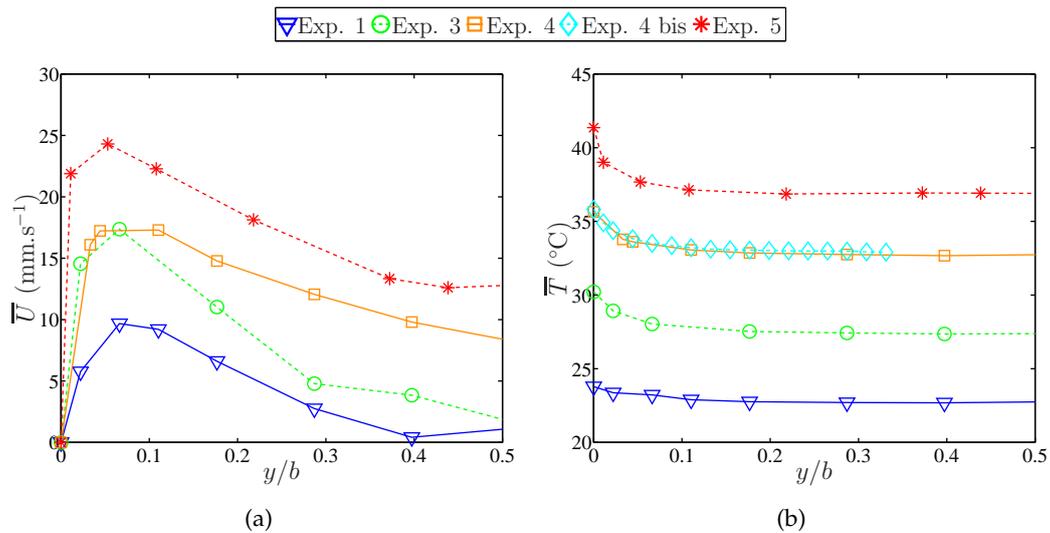


FIGURE 3.10 – (a) Profils de vitesse moyenne verticale en sortie ($x/H = 0,96$) mesurés pendant les expériences 1, 3, 4 et 5 (cf. tableau 3.1). (b) Profils de température moyenne en sortie ($x/H = 0,96$) mesurés pendant les expériences 1, 3, 4 et 5. Un second profil (Exp. 4 bis), plus détaillé, a été fait durant l'expérience 4.

pour l'exp. 5) et que le premier point de mesure dans le canal ne soit ni trop près (exp. 1) de la paroi ni trop loin (exp. 4 bis en pointillés) : $0,5 \leq y^* \leq 1,3$.

Ces observations illustrent la précision des mesures de température avec le micro-thermocouple qui sont cohérentes avec la mesure de la densité de flux de chaleur en paroi. Ainsi, par la suite, dans le cas de mesures faites avec la sonde inclinée (expériences 6 à 8), la position par rapport à la paroi sera déterminée en utilisant ce type d'interpolation.

3.3.2 Prise en compte de l'évolution de la température d'entrée

Avant d'estimer la position de la paroi à l'aide du gradient thermique, il faut corriger les profils de température par rapport à la température en entrée du canal. En effet, les campagnes de mesure pour les expériences 6 à 8 se sont déroulées sur plusieurs semaines et la température en entrée du canal a évolué au cours des acquisitions. Cela n'avait pas été le cas lors des expériences 1 à 5 qui ont été beaucoup plus courtes (quelques jours).

La figure 3.12 présente l'évolution de la température en entrée du canal durant l'expérience 7. Le profil est segmenté avec différentes couleurs qui représentent chacune la durée d'acquisition d'un profil de température et de vitesse, profils réalisés à 9 altitudes (x/H) différentes. Cette courbe montre que la température en entrée a fortement évolué durant l'acquisition de certains profils (e.g. les deux premiers) tandis qu'elle était stable durant d'autres.

La figure 3.13(a) présente les profils de température mesurés dans le canal durant l'expérience 7. La température est tracée en fonction des coordonnées du système de déplacement (Y) qui est orienté de la droite vers la gauche ; i.e. la paroi gauche se situe aux alentours de $Y \sim -15$ mm et le centre du canal autour de $Y \sim -45$ mm (cf. fig. 3.9). Ces profils montrent deux types de comportements anormaux : l'évolution de la température en fonction de la hauteur dans le canal est fautive et certains profils présentent une évolution en fonction de la largeur qui n'avait jamais été observée.

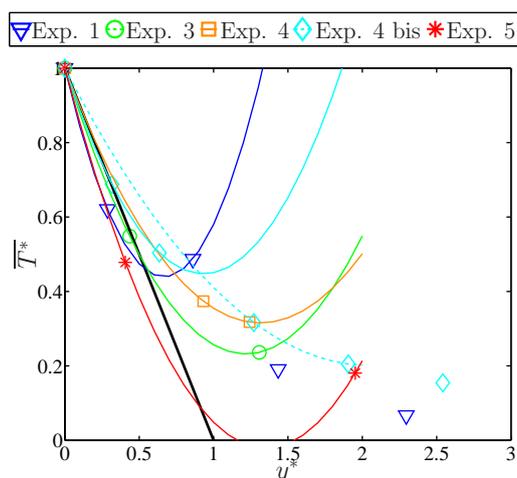


FIGURE 3.11 – Les symboles représentent les profils mesurés de température adimensionnée (T^*) en fonction de la distance à la paroi adimensionnée (y^*), en sortie ($x/H = 0,96$) pour les expériences 1, 3, 4 et 5 (cf. fig. 3.10(b)). La droite noire, de pente -1, représente le gradient de température en paroi adimensionnée. Les courbes en traits pleins sont une interpolation parabolique sur les trois points les plus proches de la paroi. La droite en pointillés représente une autre interpolation de l'expérience 4 bis en utilisant deux points plus éloignés.

Tout d'abord, le canal étant chauffé à densité de flux de chaleur imposée, la température ne peut pas être, en tout point d'un profil, inférieure à celle du profil en dessous comme avec les profils à $x/H = 0,71$ et $x/H = 0,79$ sur la figure 3.13(a). Par ailleurs, l'écart entre les profils n'est pas cohérent ; e.g. la température augmente d'environ $1,5^\circ\text{C}$ au centre du canal entre les deux premiers profils alors que cette augmentation est deux fois moins importante entre les profils 2 ($x/H = 0,29$) et 3 ($x/H = 0,37$) ; or la chaleur injectée entre deux profils consécutifs est constante. Enfin, certains profils montrent une évolution anormale de la température au centre du canal. Sur celui à $x/H = 0,12$ par exemple, cette dernière augmente en s'approchant de la paroi, alors qu'elle est constante sur les profils fait à $x/H = 0,88$ et $x/H = 0,63$ et sur ceux mesurés pendant les expériences 1, 3, 4 et 5 (voir fig. 3.10(b)).

Ces évolutions anormales sont attribuées à la variation de la température d'entrée observée sur la figure 3.12. Pour les corriger, cette dernière a été retranchée à la température mesurée dans le canal. Ces nouveaux profils sont tracés sur la figure 3.13(b). Ils sont similaires à ceux mesurés durant les expériences 1, 3, 4 et 5 ; la température est quasi constante au centre et augmente brutalement près de la paroi. Par ailleurs, les profils sont maintenant dans un ordre cohérent. Seuls les deux derniers profils sont encore légèrement aberrants, avec une température plus chaude d'environ $0,1^\circ\text{C}$ pour l'avant dernier ; mais cette erreur a été fortement atténuée car l'écart avant correction était d'environ $0,7^\circ\text{C}$. Cet écart est peut être dû à une influence de la sortie sur la température en haut du canal. De plus, les profils à $x/H = 0,46$ et $x/H = 0,46$ bis, qui ont été mesurés à deux semaines d'intervalle, ne sont pas parfaitement identiques. La différence entre les deux est peut être due à un léger changement de comportement de l'écoulement qui serait influencé par la température d'entrée.

Finalement, les profils de température corrigée par rapport à la température en entrée du canal (fig. 3.13(b)) sont caractéristiques de l'évolution de la température

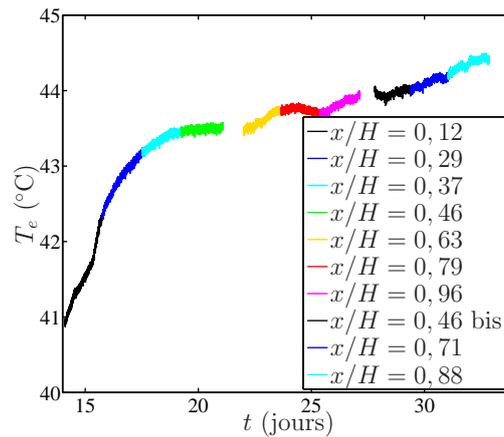


FIGURE 3.12 – Évolution de la température en entrée du canal (moyenne sur les deux thermocouples situés en entrée) en fonction du temps lors de l'expérience 7 (cf. tableau 3.1). Chaque zone colorée correspond à la durée d'acquisition d'un profil (à l'altitude x/H) de vitesse et de température dans le canal.

dans le canal et peuvent être utilisés pour déterminer la position de la paroi à partir du gradient thermique.

3.3.3 Localisation de la paroi

Le principe de localisation de la paroi est basé sur l'égalisation entre le gradient thermique imposé par la densité de flux de chaleur en paroi et celui calculé à partir des profils de température obtenus avec le micro-thermocouple. La méthode est illustrée sur la figure 3.14(a). Le profil de température en paroi est modélisé par une parabole pour les trois premiers points (température en paroi et les deux mesures les plus proches, cf. fig. 3.11), la position de la paroi Y_{pg} est donnée par l'équation :

$$Y = C_1 T^2 + C_2 T + C_3. \quad (3.7)$$

Le gradient thermique en paroi, mesuré par les fluxmètres, s'écrit donc :

$$-\frac{\lambda}{q_{pg}} = 2C_1 T_{pg} + C_2 ; \quad (3.8)$$

où q_{pg} est la densité de flux de chaleur injectée à la paroi gauche issue des mesures par les fluxmètres. La température et la densité de flux à la paroi gauche (T_{pg} et q_{pg}) ainsi que les positions et les températures des deux premiers points (Y_1, Y_2, T_1 et T_2) étant connues, c'est donc un système à 4 équations (équation de la parabole en trois points et gradient thermique) et à 4 inconnus : C_1, C_2, C_3 et la position de la paroi gauche Y_{pg} .

Lors de cette procédure, les points de mesure situés trop près de la paroi sont supprimés pour que l'interpolation basée sur le gradient thermique en paroi soit faite dans les conditions de validité présentées dans la section 3.3.1.

Ainsi, la position de la paroi gauche dans le plan de mesure ($z/l = 0,5$) estimée lors de l'expérience 6 est tracée sur la figure 3.14(b). Cette courbe montre que la paroi est en moyenne légèrement inclinée avec un écart d'environ 2,3 mm entre le haut et le bas du canal. L'écart entre les deux premiers points (profils à $x/H = 0,12$ et $x/H = 0,21$), de l'ordre de 0,5 mm, donne un ordre de grandeur de la précision de cette méthode. L'incertitude sur la position de la paroi sera considérée de ± 1 mm.

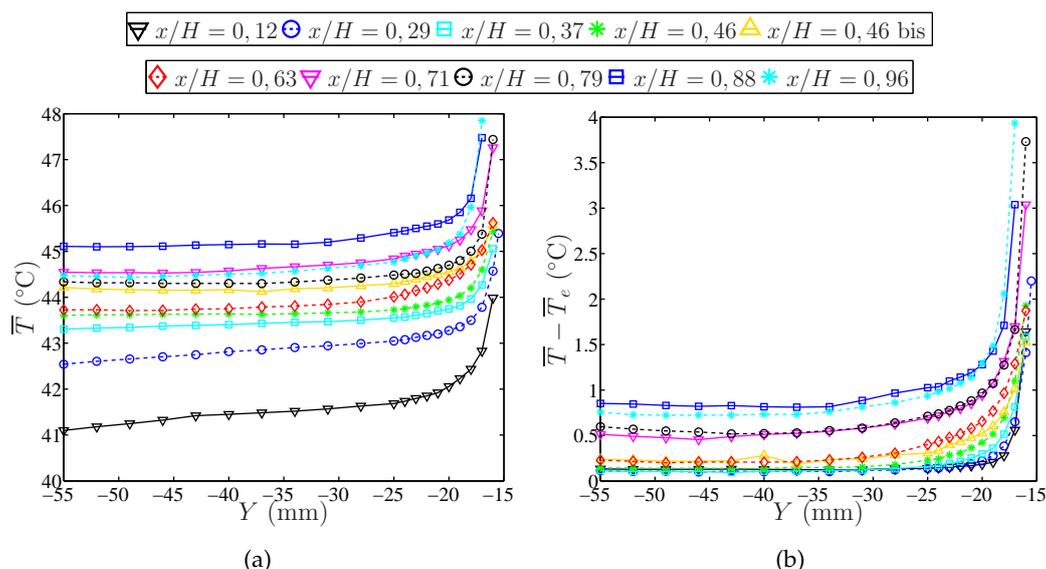


FIGURE 3.13 – (a) Profils de température mesurés dans le canal à différentes hauteurs (x/H) lors de l'expérience 7 (cf. tableau 3.1). (b) Évolution de la température dans le canal diminuée de la température en entrée à différentes hauteurs (x/H) lors de l'expérience 7. Les profils sont tracés en fonction de la coordonnée horizontale du système de déplacement (Y); la paroi gauche se situe aux environs de -15 mm.

L'allure en proche paroi des profils de vitesse obtenus, présentés sur la figure 3.15(b), confirme la méthode. En effet, les gradients de vitesse à la paroi ne semblent pas incohérents par rapport à ceux des profils bruts (fig. 3.15(a)). La méthode de localisation de la paroi basée sur l'égalisation des gradients thermiques est donc estimée valide et l'incertitude sur cette position sera considérée de ± 1 mm. Une fois la paroi localisée et les profils de vitesse et de température convertis en fonction des coordonnées du canal, il faut estimer la largeur de ce dernier.

3.3.4 Détermination de la largeur du canal

Pour les expériences 1 à 5, l'écartement du canal est mesuré à l'aide du système LDV positionné perpendiculairement à la vitre avant de la cellule en eau. Or, durant les expériences 6 à 8 la mesure de l'écartement n'a pas été faite de cette façon car la cellule en eau trapézoïdale était en place et n'a pas été enlevée pour des raisons de stabilité de l'écoulement. De plus, cet écartement a été modifié d'une expérience à l'autre à cause des ajustements faits entre les expériences, comme le nettoyage des parois par exemple. L'écartement du canal (comme la position de la paroi) est donc inconnu pour ces trois expériences et a dû être estimé à partir des mesures.

La figure 3.16(a) présente les demi-profiles de vitesse moyenne verticale mesurés lors des expériences 1 à 5. Pour montrer la symétrie des profils de vitesse, les demi-profiles droits (en pointillés, $y/b = 0, 5 - 1$) ont été symétrisés par rapport au centre du canal et superposés aux demi-profiles gauches (en traits pleins, $y/b = 0 - 0, 5$, cf. fig. 3.10(a)). Mise à part l'expérience 4 qui semble présenter une légère dissymétrie, ces demi-profiles se superposent correctement et cette propriété de symétrie sera utilisée par la suite pour déterminer la largeur du canal.

La méthode d'estimation de la largeur du canal est illustrée sur la figure 3.16(b). L'écoulement étant supposé symétrique, le profil de vitesse dans le canal est recom-

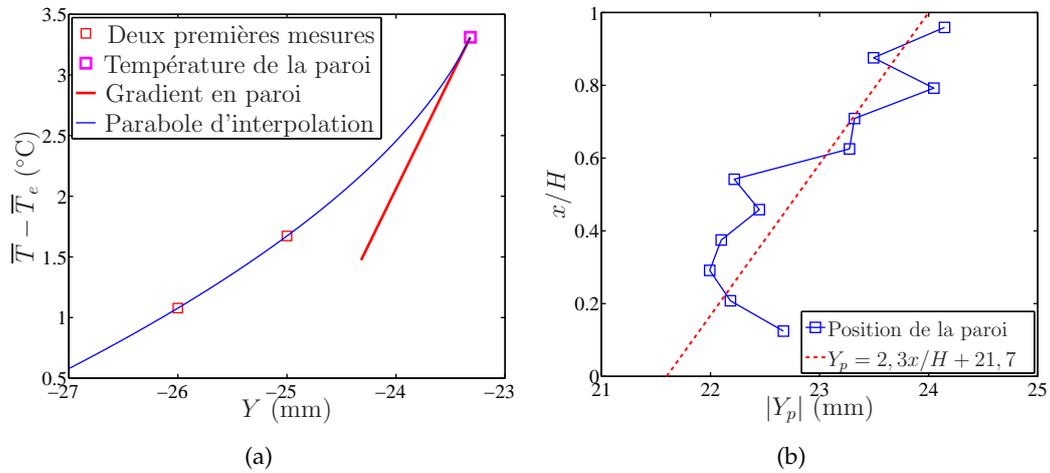


FIGURE 3.14 – (a) Évaluation de la position de la paroi par interpolation des mesures de température proches de celle-ci. Cet exemple est basé sur le profil de température à $x/H = 0,71$ pendant l'expérience 6. (b) Estimation de la position de la paroi dans le plan de mesure ($z/l = 0,5$) à partir des gradients thermiques mesurés pendant l'expérience 6. La droite en pointillés rouges est la régression linéaire de ce profil. La position de la paroi est donnée en fonction de la coordonnée (Y) du système de déplacement.

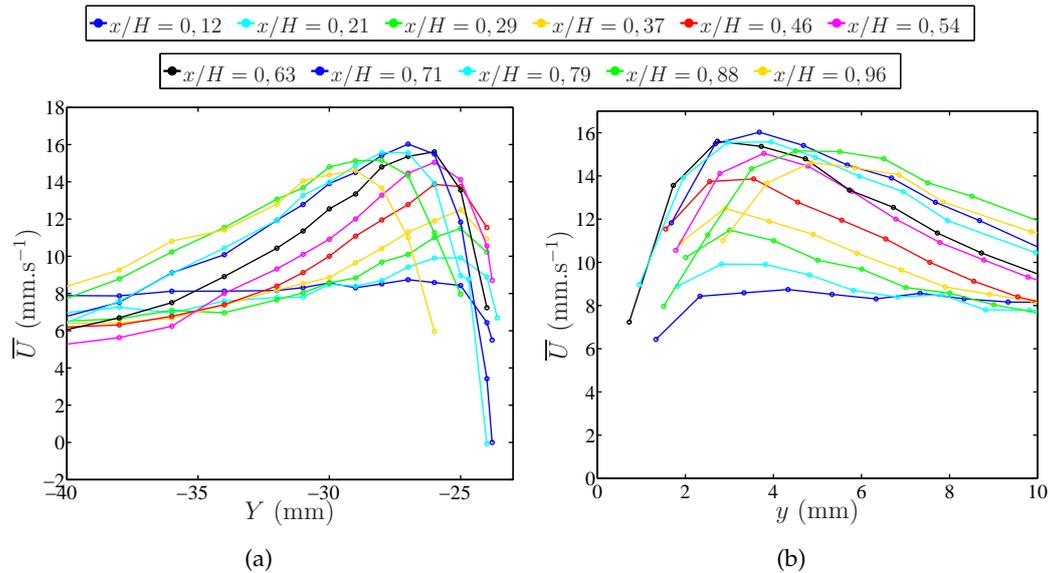


FIGURE 3.15 – Allure, en proche paroi, des profils de vitesse verticale moyenne mesurés à différentes hauteurs (x/H) pendant l'expérience 6 : (a) profils bruts ; (b) profils calés par rapport à la paroi.

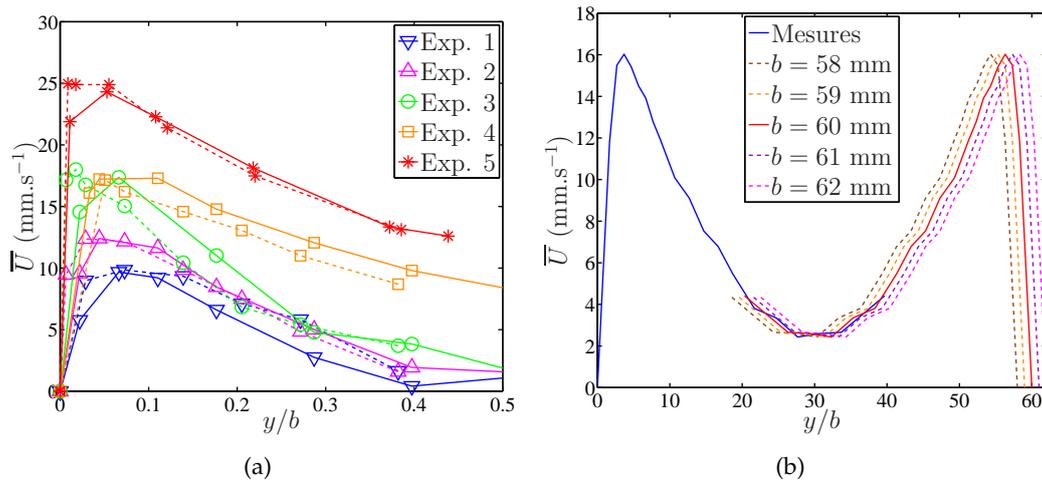


FIGURE 3.16 – (a) Profils de vitesse moyenne verticale mesurés lors des expériences 1 à 5. Les traits pleins représentent les parties gauches ($y/b = 0 - 0,5$) des profils (cf. fig. 3.11) et les pointillés montrent les parties droites ($y/b = 0,5 - 1$) qui ont été repliées par rapport au centre du canal. (b) Procédure d'estimation de la largeur du canal par symétrisation du profil mesuré sur la moitié gauche du canal. L'exemple est basé sur les mesures faites à $x/H = 0,71$ pendant l'expérience 6.

posé à partir du demi-profil gauche et d'un demi-profil droit construit par symétrie. Les deux demi-profiles sont ensuite décalés jusqu'à ce que les parties centrales se superposent, sur la figure 3.16(b) la meilleure superposition est obtenue pour un écartement de 60 mm. Cette méthode ne peut être appliquée à tous les profils car certains sont plus plats au centre et la vitesse n'augmente pas sur la partie droite. L'écartement du canal est donc estimé sur les profils exploitables (généralement ceux mesurés en partie haute) et un écartement moyen est utilisé pour les autres.

Avec cette méthode, l'incertitude sur la largeur du canal (b) est de l'ordre de ± 1 mm.

3.4 Conservation du débit

Cette section traite de la conservation du débit. Le débit massique se conserve dans le canal et comme les essais sont faits dans les conditions de validité de l'approximation de Boussinesq (cf. annexe A), le débit volumique se conserve également (variation de masse volumique négligeable dans le canal, de l'ordre de 0,2%). Après avoir déterminé l'incertitude sur le calcul des vitesses moyennes, la conservation du débit sera traitée avec la vérification de l'hypothèse d'un écoulement 2D dans le canal.

3.4.1 Incertitudes sur les vitesses moyennes

Les figures 3.17(a), 3.17(b) et 3.17(c) présentent respectivement des moyennes glissantes faites sur des mesures longues de vitesse verticale en entrée de canal lors des expériences 1, 6 et 7. Ces trois figures illustrent l'importance des fluctuations de vitesse en entrée qui rendent difficile l'obtention d'une vitesse moyenne stable au cours du temps. De plus, la figure 3.17(b) montre que la moyenne sur 4 heures évolue et décroît avec le temps mais aucune explication n'a été trouvée.

3. Caractérisation du banc d'essais et traitement des données

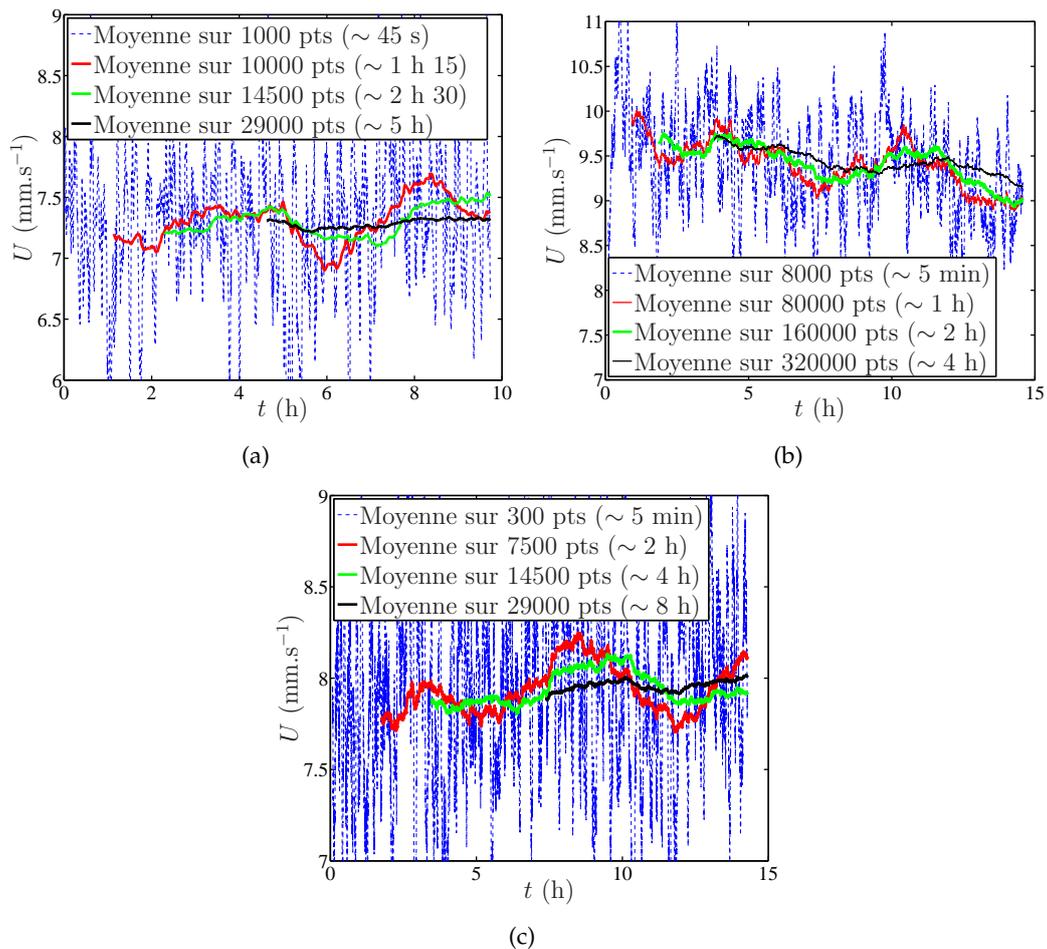


FIGURE 3.17 – Moyennes glissantes faites sur une mesure de vitesse verticale en entrée de canal : (a) exp. 1, $x/H = 0,04$, $y/b = 0,59$, $z/l = 0,5$; (b) exp. 6, $x/H = 0,12$, $y/b = 0,43$, $z/l = 0,5$; (c) exp. 7, $x/H = 0,12$, $y/b = 0,37$, $z/l = 0,5$.

Le tableau 3.3 regroupe différentes grandeurs permettant de caractériser les vitesses horizontale et verticale en entrée pour les expériences 6 et 7. L'intensité turbulente calculée en entrée (carré des fluctuations de vitesse verticale divisé par la vitesse moyenne au carré) à partir de ces données est de 20 % pour l'expérience 6 et de 30 % pour l'expérience 7. Ceci explique l'importance des fluctuations de vitesse et la nécessité de calculer les vitesses moyennes sur des temps longs.

Un compromis entre le temps de mesure et la précision des moyennes a donc dû être trouvé pour l'acquisition des profils de vitesse pour les différentes campagnes. Pour la campagne de mai 2011, les moyennes ont été faites sur 25 à 30 minutes, alors qu'elles ont été faites sur 1 heure, 2 heures et 1 h 30 pour les campagnes d'octobre 2011, de janvier et de février 2012. Ainsi les incertitudes sur les vitesses moyennes sur l'ensemble des expériences sont comprises entre 0,2 et 0,4 $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ (cf. « Incertitude sur la moyenne » dans le tableau 3.3); elles sont estimées par rapport aux variations entre les moyennes glissantes faites sur une durée classique de mesure (1-2 h) et celles faites sur des temps plus longs (4-8 h, cf. fig. 3.17).

| | Exp. 6 | | Exp. 7 | |
|--|--------|-------|--------|-------|
| | U | V | U | V |
| x/H | 0,12 | 0,12 | 0,12 | 0,12 |
| y/b | 0,43 | 0,43 | 0,37 | 0,37 |
| Moyenne (mm.s ⁻¹) | 9,4 | -0,25 | 7,9 | -0,49 |
| Écart max mesuré (mm.s ⁻¹) | 15 | 12 | 15 | 12 |
| Écart-type (mm.s ⁻¹) | 2,6 | 1,7 | 3,4 | 2,1 |
| Fluctuations de vitesse verticale $\frac{1}{2}\overline{u'^2}$ (mm ² .s ⁻²) | 3,34 | 1,39 | 5,60 | 2,28 |
| Incertitude sur la moyenne (\pm mm.s ⁻¹) | 0,4 | 0,25 | 0,3 | 0,2 |

TABLE 3.3 – Caractérisation des vitesse verticale (U) et horizontale (V) en entrée lors des expériences 6 et 7 (voir tab. 3.1). L'incertitude sur la vitesse moyenne dépend du choix de la durée de mesure : 1 h lors de l'expérience 6 et 2 h lors de la 7.

3.4.2 Caractère 3D de l'écoulement

La figure 3.18(a) présente les profils de vitesse moyenne verticale mesurés en entrée ($x/H = 0,12$) et en sortie ($x/H = 0,96$) lors de l'expérience 6 (avant la mise en place de la cellule trapézoïdale pour les mesures en proche paroi). En considérant l'écoulement parfaitement 2D, le débit volumique $Q(x)$ se définit comme :

$$Q = \int_0^l \int_0^b U(x, y, z).dy.dz = l \int_0^b U(x, y).dy. \quad (3.9)$$

Les débits obtenus à partir de cette définition et des profils de la figure 3.18(a), sont de $1,10.10^{-4}\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ en entrée et de $1,34.10^{-4}\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ en sortie ; soit une augmentation du débit de 20 % entre l'entrée et la sortie du canal. Cette différence est due à l'hypothèse d'un écoulement parfaitement 2D. En effet, la vitesse est nulle au niveau des parois latérales du canal (adhérence au niveau des parois vitrées de la cellule en eau) et une couche limite dynamique se développe le long de ces parois. Ce phénomène est illustré par la figure 3.18(b) sur laquelle sont tracés des profils selon z de vitesse moyenne verticale, adimensionnée par la vitesse au centre ($z/l = 0,5$), en entrée et en sortie. Ces courbes montrent que l'écoulement peut être considéré 2D au centre du canal ; les profils sont plats entre $z/l = 0,35$ et $z/l = 0,5$ en entrée comme en sortie. Par contre, si le profil en entrée reste plat jusqu'à $z/l = 0,2$ avant de chuter pour atteindre 0 à la paroi latérale, la décroissance des deux profils en sortie commence dès $z/l = 0,35$. Cette différence est due à l'épaississement de la couche limite dynamique avec la hauteur le long des parois latérales.

Afin de prendre en compte l'évolution de la vitesse moyenne selon z , son évolution en fonction de z sera supposée indépendante de celle en fonction de y . La vitesse moyenne verticale est supposée égale à :

$$U(x, y, z) = f_p(x, z) \times U(x, y, z = 0,5l) ; \quad (3.10)$$

où $f_p(x, z)$ correspond aux profils de la figure 3.18(b) en supposant que ceux-ci sont indépendants de y ; hypothèse faisable au vue du peu de différence entre les deux profils en sortie. Ainsi, le débit volumique devient :

$$Q = \int_0^l \int_0^b U(x, y, z).dy.dz = \int_0^l f_p(x, z).dz \int_0^b U(x, y, z = 0,5l).dy. \quad (3.11)$$

| Expériences | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|--------------------|------|------|------|------|------|
| Q_e ($10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) | Sans correction | 1.79 | 2.89 | 2.73 | 4.47 | 6.25 |
| Q_s ($10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) | | 2.19 | 2.80 | 3.56 | 5.39 | 7.89 |
| $\frac{\Delta Q}{Q_s}$ (%) | | +18 | -3 | +23 | +17 | +21 |
| Q_e ($10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) | Avec correction | 1.56 | 2.52 | 2.37 | 3.89 | 5.44 |
| Q_s ($10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) | | 1.56 | 1.99 | 2.53 | 3.83 | 5.61 |
| $\frac{\Delta Q}{Q_s}$ (%) | | <1 | -27 | +6 | -1 | +3 |

TABLE 3.4 – Débits volumiques calculés en entrée et en sortie sur les expériences 1 à 5 avec et sans correction par la fonction *Porte*.

La mesure de la fonction f_p n'étant pas possible pour tous les profils pour des questions de temps, cette dernière sera supposée linéaire en x et calculée à partir des profils de la figure 3.18(b). Une fonction correctrice *Porte* sera donc introduite pour le débit tel que :

$$Porte(x) = \int_0^l f_p(x, z) \cdot dz = -0,173 \frac{x}{H} + 0,875 ; \quad (3.12)$$

et,

$$Q = Porte(x) \int_0^b U(x, y, z = 0, 5l) \cdot dy. \quad (3.13)$$

Avec cette nouvelle définition, les débits calculés à partir des profils de la figure 3.18(a) sont de $8,75 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ en entrée et en sortie.

La figure 3.18(c) présente le débit volumique calculé à partir des demi-profils mesurés lors de l'expérience 6 en fonction de la hauteur avec et sans correction par la fonction *Porte*. Les importantes variations de débit autour de sa moyenne sont principalement dues aux incertitudes liées à la localisation de la paroi gauche et à la détermination de la largeur du canal (cf. §3.3.3 et 3.3.4), qui sont plus grandes sur les premiers profils. Néanmoins, sans correction, le débit moyen croît en fonction de la hauteur dans le canal, tandis qu'avec la correction, celui-ci est constant.

La vitesse selon z n'ayant pas été mesurée lors des expériences 1 à 5, la correction calculée pour l'expérience 6 sera utilisée. Le tableau 3.4 présente les débits calculés en entrée et en sortie pour les expériences 1 à 5 avec et sans correction par la fonction *Porte*. Mise à part l'expérience 2 pour laquelle le débit est identique en entrée et en sortie sans correction, ce qui reste inexpliqué ; l'écart maximal de débit après correction est de 6 %. La fonction *Porte* peut donc raisonnablement être estimée peu dépendante du nombre de Rayleigh et donc être utilisée pour corriger toutes les expériences. Cependant, cette estimation n'est pas correcte pour l'expérience 7. En effet, la figure 3.18(d) présente le débit avec et sans correction, comme pour la figure 3.18(c), calculé lors de cette expérience. La courbe bleu montre clairement deux pentes différentes : le débit est quasi-constant sur la première moitié du canal tandis qu'il augmente franchement sur la seconde. Ce brusque changement de pente est sûrement dû au fait que l'écoulement devienne 3D lors de cette expérience.

Cette analyse ne peut pas être complétée par l'étude des profils de vitesse horizontale (V) car ceux-ci ne sont pas correctement exploitables (cf. 4.2.2.1).

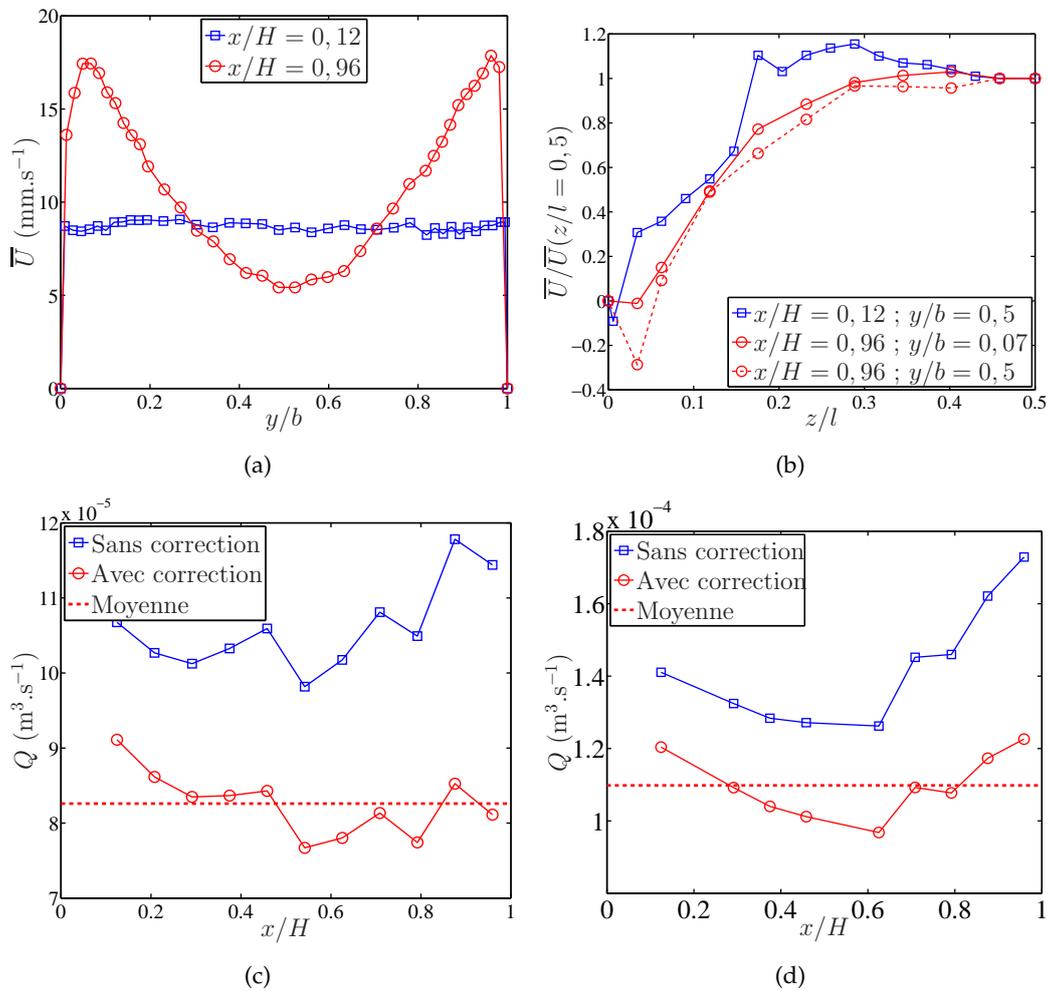


FIGURE 3.18 – (a) Profils de vitesse moyenne verticale en entrée ($x/H = 0,12$, $z/l = 0,5$) et en sortie ($x/H = 0,96$, $z/l = 0,5$) mesurés sur la largeur du canal pendant l'expérience 6. (b) Profils de vitesse moyenne verticale adimensionnée par la vitesse au centre ($z/l = 0,5$) en entrée ($x/H = 0,12$, $y/b = 0,5$) et en sortie ($x/H = 0,96$, $y/b = 0,07$ et $y/b = 0,5$) mesurés selon z pendant l'expérience 6. (c) Débit volumique Q calculé le long du canal pendant l'expérience 6. Les carrés bleus représentent le débit calculé directement à partir des profils de vitesse moyenne et les ronds rouges représentent le débit corrigé à l'aide de la fonction *Porte* pour prendre en compte le caractère 3D de l'écoulement dans le canal. (d) Évolution avec et sans correction du débit volumique dans le canal lors de l'expérience 7.

| Grandeur | Ordre de grandeur | Incertitude absolue | Incertitude relative |
|------------|-----------------------------|---------------------|----------------------|
| q | 100 -1000 W.m ⁻² | | <±1 % |
| b | ~ 60 mm | ±3 mm | ±5 % |
| ΔT | ~ 5 °C | ±0,05 °C | ±1 % |

TABLE 3.5 – Incertitudes sur les principales grandeurs intervenant dans les définitions des nombres de Rayleigh et Nusselt.

3.5 Incertitudes sur les nombres adimensionnels

En convection naturelle en canal vertical, les trois nombres adimensionnels caractéristiques (cf. §1.3.1.3) sont les nombres de Rayleigh (Ra), de Nusselt (Nu) et de Reynolds (Re).

3.5.1 Nombres de Rayleigh et de Nusselt

Les incertitudes sur les nombres de Rayleigh modifié (Ra_b^*) et de Nusselt basés sur la largeur du canal seront abordées ici.

Pour rappel, ces deux nombres adimensionnels s'écrivent :

$$Ra_b^* = \frac{g\beta qb^5}{\nu aH}; \quad (3.14)$$

$$Nu_b = \frac{qb}{\lambda\Delta T}. \quad (3.15)$$

Les incertitudes sur les différentes grandeurs sont données dans le tableau 3.5 en fonction des incertitudes de mesure calculées lors de l'étalonnage (cf. §2.3.2 p. 72) ou de celles données plus haut. Celles sur le calcul des propriétés thermophysiques de l'eau et sur la détermination de la hauteur du canal (dimensions des parois connues à ±10μm) sont négligées. L'incertitude absolue sur l'écartement est calculée en additionnant les incertitudes sur la localisation de la paroi et sur la recherche de l'écartement (cf. §3.3.3 et 3.3.4) : comme la recherche de la largeur se fait en symétrisant le profil sur le demi-canal gauche, l'incertitude sur la localisation de la paroi est doublée. L'incertitude sur la densité de flux de chaleur mesurée en paroi est de l'ordre de ±0,01 % (cf. §2.3.2 p. 72), celle sur la densité de flux injectée dans le canal peut donc être estimée comme liée aux pertes par les parois latérales estimées précédemment (cf. §3.2.5).

Pour ne pas cumuler arbitrairement les erreurs, l'incertitude sera calculée à partir de l'erreur maximale, soit :

$$\frac{\Delta Ra_b^*}{Ra_b^*} = 5 \frac{\Delta b}{b}; \quad (3.16)$$

$$\frac{\Delta Nu_b}{Nu_b} = \frac{\Delta b}{b}. \quad (3.17)$$

La maîtrise de la largeur du canal est donc essentielle pour caractériser correctement l'écoulement. Au cours de cette thèse, deux types de campagnes de mesure ont été menées : avec ou sans cellule trapézoïdale pour s'approcher de la paroi.

Sans la cellule trapézoïdale, la largeur du canal est mesurée en face avant et l'incertitude sur cette dernière est de l'ordre de ± 1 mm (cf. §3.2.2). Cependant, lors des campagnes faites avec la cellule trapézoïdale, la position du volume de mesure par rapport à la paroi gauche n'est pas connue et a été estimée à partir des profils de température.

Ainsi, l'incertitude sur le nombre de Rayleigh modifié basé sur la largeur varie entre ± 10 et ± 25 %, tandis que celle sur le nombre de Nusselt basé sur la largeur varie entre ± 2 et ± 5 %. Ces calculs montrent l'importance de la maîtrise de la largeur du canal et mettent en perspective une des améliorations du banc d'essais.

3.5.2 Débit volumique et nombre de Reynolds

Tel qu'illustré sur la figure 3.18(c), l'incertitude sur le calcul du débit volumique dans le canal est grande dans le cas où les profils de vitesse ont été mesurés avec la cellule en eau trapézoïdale. Ces incertitudes sont principalement dues à la localisation de la paroi gauche et à la détermination de la largeur du canal (voir §3.3.3 et 3.3.4). À ces incertitudes, s'ajoute celle sur le calcul de la vitesse moyenne due aux fortes variations de celle-ci (cf. §3.4.1).

L'incertitude sur le calcul du débit est la même que celle sur le nombre de Reynolds car ce dernier peut s'écrire comme :

$$Re = \frac{Q}{\nu l}; \quad (3.18)$$

et que les incertitudes sur ν et l sont quasi-nulles. D'après l'équation 3.13, l'incertitude sur le nombre de Reynolds est la somme des incertitudes liées à la détermination de la largeur b (§3.2.2 et 3.3.4), à l'évaluation de la vitesse moyenne \bar{U} sur un profil (§3.4.1) et à la correction par la fonction *Porte* (§3.4.2). Elle peut être écrite comme :

$$\frac{dRe}{Re} = \frac{dU}{U} + \frac{dPorte}{Porte} + \frac{db}{b}. \quad (3.19)$$

D'après le tableau 3.3, le premier terme est de l'ordre de ± 4 % ; le second peut être estimé de l'ordre de ± 4 % également à partir de la différence entre les deux profils de sortie de la figure 3.18(b). Pour la détermination du dernier terme deux cas sont distingués : les expériences 1 à 5 pendant lesquelles la vitesse a été mesurée sans rotation de la sonde laser et les expériences 6 à 8 où l'incertitude sur l'écartement du canal (b) est plus grande du fait de la rotation de la sonde.

Sans rotation de la sonde, l'incertitude donnée dans la section 3.2.2 (± 1 mm) conduit à une erreur sur le nombre de Reynolds d'environ ± 2 %. Avec rotation de la sonde, cette dernière est plus importante (cf. tab. 3.5), l'erreur est de l'ordre de ± 3 mm soit ± 5 % d'erreur sur le nombre de Reynolds.

L'incertitude totale sur le calcul du débit et du nombre de Reynolds peut donc être estimée de l'ordre de ± 10 % pour les expériences 1 à 5 et de ± 15 % pour les expériences 6 à 8.

3.6 Conclusion

Dans ce troisième chapitre, le banc d'essais a été caractérisé. Après l'avoir décrit précisément dans le chapitre 2, les écarts entre la conception du banc et sa réalité en fonctionnement ont été déterminés.

Dans la première section, les différentes campagnes de mesure menées durant cette thèse ont été décrites. Cette partie servira de point de repère lors de l'exploitation des résultats dans le chapitre suivant. Les configurations de fonctionnement ainsi que les différents types de profils de vitesse (et de température) établis dans le canal sont détaillés pour chaque expérience.

La seconde section traite de la caractérisation du banc d'essais liée à sa conception. Le temps d'établissement et la mise en température de la cellule en eau sont présentés avant de détailler les incertitudes sur les conditions aux limites : densité de flux de chaleur imposée en paroi et largeur du canal. Dans une troisième sous-section, la problématique de la stratification dans la cellule en eau est traitée. Il est montré que cette dernière tend à réduire fortement le débit dans le canal et à dégrader les échanges convectifs. En revanche, l'impact sur le débit se fait sentir dès les faibles stratifications tandis que les échanges convectifs commencent à se dégrader pour des stratifications plus élevées. Cependant, cette étude n'a pas été plus approfondie puisque la stratification a été supprimée par la suite avec l'isolation de la cellule en eau. Enfin, les pertes thermiques par les parois latérales du canal ont été estimées et elles sont négligeables.

La troisième section est consacrée aux différentes méthodes qui ont dûes être mises au point pour estimer la position du volume de mesure lors des mesures en proche paroi avec la cellule en eau trapézoïdale. Avec l'utilisation de cette cellule, la localisation des parois n'est plus possible directement mais doit être faite à partir des mesures de vitesse et de température. Une méthode de localisation de la paroi basée sur les gradients thermiques mesurés en paroi avec les fluxmètres et le micro-thermocouple est présentée ici. Cette méthode est validée sur les mesures faites sans cellule trapézoïdale. Par ailleurs, une seconde méthode basée sur la symétrie des profils de vitesse est présentée pour la détermination de la largeur du canal.

La section 4 porte sur la conservation du débit dans le canal. Elle montre que l'hypothèse d'un écoulement parfaitement 2D ne permet pas de conserver le débit massique dans le canal. Une approximation permettant de prendre en compte le caractère 3D de l'écoulement à partir de profils de vitesse mesurés suivant z a donc été mise au point.

Enfin, ce chapitre termine sur la détermination des incertitudes sur les nombres caractéristiques de l'écoulement de convection naturelle dans un canal vertical. À partir de la caractérisation du banc et des systèmes de mesure, la précision maximale attendue sur le calcul de ces nombres a été déterminée.

Pour conclure, ce chapitre a permis de caractériser et d'estimer les différentes incertitudes du dispositif expérimental, qu'elles soient liées à la conception du banc ou directement à la mesure des différentes grandeurs (principalement la vitesse dans ce cas). Ces estimations ont permis de déterminer la précision sur les nombres caractéristiques en convection naturelle.

Je suis âgé et je mourrai bientôt. Quand je serai au ciel, j'espère que j'y recevrai des éclaircissements à propos de deux phénomènes : l'électrodynamique quantique et la turbulence des fluides. En ce qui concerne l'électrodynamique quantique, j'ai bon espoir.
Horace Lamb

