Ce chapitre est consacré à la présentation du dispositif expérimental créé pour l'étude de la convection naturelle en canal vertical dans l'eau.

La première partie présente une description rapide du banc d'essais permettant de comprendre son fonctionnement ainsi que de visualiser les différents éléments le composant. Les organes clés sont présentés ainsi que les conditions aux limites et l'instrumentation mise en place. La suite du chapitre reprend en détail chaque point de cette présentation.

La seconde partie est consacrée à la description détaillée de la conception du banc d'essais. La principale difficulté de cette conception provient de l'utilisation de l'eau pour étudier la convection qui entraîne des problèmes d'étanchéité et de corrosion. Elle montre comment le banc a été dimensionné par similitude avec un canal en air déjà présent au laboratoire. Les différents éléments sont décrits en justifiant les décisions prises dans le but d'obtenir les conditions aux limites souhaitées. L'évolution du dispositif au cours de la thèse ainsi que les difficultés rencontrées sont aussi abordées.

Enfin, la dernière partie présente le pilotage du banc d'essais ainsi que l'instrumentation et les différents systèmes d'acquisition mis en place. Le but de l'étude étant la compréhension du couplage entre la cinématique et la thermique de l'écoulement, l'expérience a été instrumentalisée au moyen de thermocouples, de fluxmètres et d'un système de mesures couplées de vitesse et de température dans le canal. Ce dernier permet d'effectuer des mesures en tout point du canal. La description et le fonctionnement, ainsi que l'étalonnage de ces différents capteurs et systèmes de la chaîne d'acquisition sont détaillés dans cette dernière section.



FIGURE 2.1 – (a) Schéma présentant la géométrie du banc d'essais avec en bleu la cellule en eau, en violet les blocs parois (parois chauffées en gris clair), en gris foncé les plaques support en PVC et en jaune les systèmes vis-écrous. (b) Photo du banc d'essais en cours de montage présentant les deux blocs parois formant le canal et plongés dans la cellule en eau. (c) Photo du canal avec, en avant plan, la sonde laser du système LDV. (d) Schéma du banc d'essais complet.

2.1 Présentation générale

Cette première partie est une description générale du banc d'essais dans son ensemble. La section suivante complètera cette description point par point plus en détail.

2.1.1 Géométrie du banc d'essais

Le banc d'essais est schématisé sur les figures 2.1(a) et 2.1(d), c'est un canal vertical formé par deux blocs rectangulaires étanches positionnés face à face et plongés dans une cellule en verre de 1,5 m de haut (selon x) pour 60 cm de large (selon y) et 23,5 cm de profondeur (selon z) remplie d'eau distillée. Ces deux blocs parois sont maintenus grâce à des systèmes vis-écrous les reliant à des plaques support en PVC de 140 cm de haut (selon x) et de 20 cm de profondeur (selon z) en appui sur le fond de la cellule. Ainsi, le canal est délimité par les blocs parois, de 65 cm de haut (selon x) et 23,5 cm de profondeur (selon z), d'une part, et par les vitres avant et arrière de la cellule en verre d'autre part. Son écartement (selon y) est variable de 0 à 14 cm grâce aux systèmes vis-écrous.

Les blocs parois constituent les parois chauffantes du canal; ce sont des blocs étanches en polycarbonate avec une face, celle constituant la paroi du canal, en acier inoxydable de 1,5 mm d'épaisseur. Une des difficultés de ce dispositif expérimental concerne l'étanchéité de ces blocs parois.

Le chauffage de chaque paroi se fait au moyen de 12 résistances électriques indépendantes qui sont plaquées contre la paroi en inox à l'aide de trois couches de mousse isolante (qui limitent les pertes thermiques dans les blocs). Des rainures de 1 mm de profondeur sont usinées dans la paroi en inox entre chaque chaufferette pour limiter la conduction dans la paroi entre deux zones.

Le réglage de l'écartement du canal se fait au moyen des système vis-écrous reliant les blocs parois aux plaques support en PVC. Le réglage de la verticalité et du parallélisme des parois se fait au moyen de deux systèmes reliant les deux coins supérieurs arrières de chaque bloc à leur plaque support. Le réglage se fait donc en jouant sur la distance entre les coins supérieurs des blocs parois et leur plaque support.

2.1.2 Conditions aux limites thermiques

Trois types de conditions aux limites thermiques sont présentes sur le banc d'essais. Deux conditions aux limites au niveau du canal et une pour la température à l'extérieur du canal.

Les parois principales du canal sont chauffées chacune au moyen de 12 chaufferettes indépendantes. Chaque chaufferette permet d'imposer une densité de flux de chaleur constante sur une surface de 5×20 cm². Les 24 chaufferettes sont branchées en parallèle sur une alimentation en courant continu fournissant jusqu'à 2 kW. La résistance électrique des chaufferettes est ajustée de façon à ce qu'elles imposent toutes la même densité de flux de chaleur. Les parois latérales du canal sont considérées comme adiabatiques. Pour cela, la cellule en verre de 15 mm d'épaisseur est isolée à l'aide de 5 cm de Styrodur[®].

La dernière condition aux limites thermiques est une condition de température imposée à l'extérieur du canal. Cette température est régulée à l'aide d'un système de refroidissement composé d'un bain thermostaté, d'une pompe et d'échangeurs contre-courant à eau. L'eau de la cellule s'échauffe sous l'influence de la puissance injectée aux parois, une partie est pompée en partie haute de la cellule à proximité des plaques support en PVC puis refroidie en passant dans les échangeurs et réinjectée au niveau de la sortie du canal derrière les blocs parois. Les échangeurs sont refroidis à l'aide d'un bain thermostaté à température imposée pouvant extraire jusqu'à 1,6 kW.

De plus, la pièce dans laquelle est situé le banc d'essais est régulée en température. Cette régulation permet de rendre la cellule indépendante des variations de température journalières et saisonnières.

2.1.3 Instrumentation

Le dispositif expérimental est entièrement instrumenté et trois types de mesures sont faites : des mesures de densité de flux de chaleur, de température et de vitesse.

Chaque chaufferette est équipée d'un capteur de densité de flux de chaleur, placé dans son dos, qui mesure la densité de flux moyenne perdue dans les blocs parois. Ainsi grâce à la mesure de la puissance injectée, la densité de flux moyenne en paroi peut être déterminée au niveau de chaque chaufferette.

Des thermocouples de type K de 130 μ m de diamètre sont disposés sur l'ensemble du banc :

- 12 thermocouples sont insérés dans chaque paroi dans des rainures de 1 mm de profondeur, au niveau du centre de chaque chaufferette, pour mesurer la température de la paroi;
- 2 thermocouples sont insérés dans chaque bloc entre les couches d'isolant pour contrôler la surchauffe des blocs;
- 8 thermocouples sont placés symétriquement dans la cellule pour mesurer la température de l'eau en haut et en bas ainsi qu'en entrée et sortie du canal.

Enfin, un système de mesures couplées de vitesse et de température a été mis en place pour caractériser l'écoulement dans le canal. Ce système se compose d'un micro-thermocouple de type K de 25 μ m de diamètre placé au bout d'une perche et couplé à un système de mesure de vitesse par LDV (Laser Doppler Velocimetry) à deux composantes (x et y). La sonde du laser ainsi que la perche sont toutes les deux montées sur un système de déplacement à deux composantes qui permet la mesure de la vitesse et de la température en tout point du banc d'essais.

2.2 Conception

Cette deuxième partie est consacrée à la description détaillée des différentes parties composant le banc d'essais, présenté sur les figures 2.1. Ce dernier ayant évolué au cours de la thèse, il sera présenté ici tel qu'il est aujourd'hui et les évolutions qui ont permis d'aboutir à cette solution seront détaillées à la fin (§2.2.6).

2.2.1 Dimensionnement du banc

2.2.1.1 Géométrie

Ce banc d'essais a été conçu pour obtenir un écoulement similaire à celui observé dans le canal vertical en air conçu au CETHIL par Jérémie Vareilles [80]. La figure 2.1(a) présente la géométrie du banc d'essais : deux blocs étanches, contenant les éléments chauffants, face à face pour former un canal vertical, dans une cuve en verre remplie d'eau. Ce schéma montre les dimensions principales du banc avec le système de coordonnées xyz qui sera utilisé par la suite. La conception du banc en eau par similitude consiste à le dimensionner pour atteindre les mêmes gammes de nombres sans dimension, à savoir les nombres de Rayleigh et de Nusselt, que celles atteintes avec l'expérience en air. Dans un premier temps, la température de l'eau à l'extérieur du canal doit être choisie pour pouvoir estimer les valeurs des propriétés thermophysiques du fluide. Celle-ci est fixée à 40°C de façon à accepter des écarts de température importants ($\sim 10^{\circ}C$) tout en restant dans les conditions de l'approximation de Boussinesq (cf. §1.3.1.1). Ce choix de 40°C permet également d'éviter d'atteindre localement des températures critiques pour l'étanchéité des blocs parois et de la cellule en eau ou pour certains éléments.

Les choix de la hauteur du canal (H, selon x) et de son écartement (b, selon y) ont été faits de façon à se placer dans les mêmes gammes de nombre de Rayleigh (basé sur l'écart de température, Ra_{Tb}) que dans l'expérience en air. Ainsi, pour l'eau (à 40°C) $Ra_{eau} = 3, 8.10^{10}.\Delta T_{eau}b_{eau}^3$; et pour l'air $Ra_{air} = 4, 7.10^7.\Delta T_{air}b_{air}^3$. Les écarts de température atteints dans l'air étant de l'ordre de 100° C : $b_{eau} \sim 1/4 \ b_{air}$. Afin de pouvoir comparer les résultats, le rapport de forme Γ ($\Gamma = b/H$) a été convservé, et donc : $H_{eau} \sim 1/4 \ H_{air} \sim 35 \ cm$. Une hauteur chauffée de canal de 60 cm et un écartement variable de 0 à 14 cm ont ainsi été choisis, ce qui permet de balayer les gammes de Rayleigh du canal en air et d'aller au delà. Par conséquent, les rapports sont plutôt de l'ordre de : $H_{eau} \sim 1/3 \ H_{air}$ et $b_{eau} \sim 1/2 \ b_{air}$.

La profondeur du canal (l, selon z) doit être grande devant la largeur pour pouvoir considérer un écoulement 2D au centre ; le rapport b/l a été choisi de l'ordre d'un cinquième, choix motivé aussi par la taille du banc d'essais et la quantité d'eau nécessaire. En se plaçant dans les mêmes conditions que Jérémie Vareilles [80] (rapport de forme de b/H = 1/15), l'écartement du canal est de 4 cm ce qui aboutit à une profondeur (chauffée) de 20 cm.

Enfin, les dimensions de la cellule en verre ont été déterminées à partir de plusieurs critères :

- une hauteur d'eau en entrée et en sortie suffisante pour ne pas perturber l'écoulement dans le canal;
- suffisamment d'espace derrière les parois pour limiter les pertes de charge et le bouclage de l'écoulement;
- une quantité d'eau pas trop importante pour limiter les phases de remplissage/vidange.

Jérémie Vareilles [80] avait choisi une hauteur en entrée et en sortie de 75 cm, soit la moitié de la hauteur du canal. Pour le banc d'essais en eau, il a été choisi de garder une hauteur d'au moins 40 cm en entrée et en sortie et avons fixé la hauteur de la cuve à 1,5 m. Il faut noter ici que cette hauteur de 1,5 m est aussi limitée d'une part par la hauteur de la pièce dans laquelle le banc d'essais est installé (voir §2.2.5.2); et d'autre part par des problèmes techniques de réalisation de la cuve en verre. Quant à la profondeur de la cuve (selon *z*), le canal est fermé latéralement par les parois de la cuve, ce qui fixe la profondeur de celle-ci à 23,5 cm (voir conception des blocs parois §2.2.3.1). Enfin, le volume d'eau a été limité à 200 L, ce qui impose une largeur de cuve de 60 cm. Avec des blocs de 7 cm d'épaisseur (voir §2.2.3.1) et un canal large de 4 cm cela laisse environ 20 cm derrière chaque bloc pour l'écoulement de retour (écoulement de la sortie vers l'entrée derrière les blocs parois) ce qui est suffisant pour négliger les pertes de charge (d'autant plus que les vitesses sont faibles).

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0093/these.pdf © [C. Daverat], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

2.2.1.2 Conditions aux limites en paroi

Tel que discuté au chapitre précédent, une condition de densité de flux de chaleur imposée a été choisie pour les parois du canal. C'est pourquoi un chauffage par résistances électriques a été adopté. Celles-ci sont placées derrière une paroi conductrice de chaleur et dans un bloc étanche pour éviter tout contact avec l'eau. La hauteur chauffée de 60 cm par 20 cm a donc été découpée en 12 bandes de 5 cm de haut pour 20 cm de profondeur afin d'offrir de nombreuses possibilités de chauffage alterné (12 est un multiple de 1, 2, 3, 4 et 6). Les résistances sont faites en constantan (55% cuivre, 45% nickel), car cet alliage possède une résistivité électrique quasiment indépendante de la température. Par conséquent, une alimentation à courant imposé permet de maintenir une puissance de chauffe constante. Ces chaufferettes, fabriquées par la société Captec[®], sont toutes équipées d'un capteur de densité de flux de chaleur (collé derrière la résistance cf. §2.3.1.1). Deux de ces chaufferettes sont présentées sur la photo 2.14(a) (page 71), face résistance en haut et capteur en bas.

La densité de flux de chaleur imposée en paroi a été déterminée de façon à obtenir les mêmes gammes de nombre de Nusselt que sur l'expérience en air [80]. Dans l'air, le nombre de Rayleigh maximal a été atteint pour un écartement de 10 cm et une densité de flux de chaleur d'environ 500 W.m⁻². L'écart de température maximal obtenu est de l'ordre de 100 °C. Dans l'eau, l'écart de température maximal a été fixé à 10°C et un écartement de 4 cm, ce qui conduit à une densité de flux de chaleur de l'ordre de 2600 W.m⁻². Cette densité de flux correspond à une puissance totale injectée sur les deux parois de 600 W. Les chaufferettes sont branchées sur une alimentation en courant continu pouvant fournir jusqu'à 2 kW, ce qui permet d'obtenir des puissances suffisantes pour des cas de chauffage alterné impliquant moins de chaufferettes et donc une surface de chauffe plus faible.

2.2.2 La cellule en eau

Le canal vertical est placé dans une grande cellule de 1,5 m de haut pour 60 cm de large et 23,5 cm de profondeur faite en verre ultra clair de 15 mm d'épaisseur, présentée sur la photo 2.2(a). Afin d'éviter le développement d'algues et les dépôts calcaire, la cellule est remplie avec 160 L d'eau distillée provenant d'un distillateur pouvant fournir jusqu'à 10 L par heure (le remplissage se fait donc sur deux jours). Par ailleurs, de la javel est rajoutée pour garder l'eau de la cellule propre plus long-temps. Ainsi, l'eau doit être changée tous les 3 à 4 mois environ.

Comme le montre la photo 2.2(b), la cellule est isolée, sur toutes ses faces verticales, à l'aide de panneaux de Styrodur[®] de 5 cm d'épaisseur et de conductivité thermique de 0,033 W.m⁻¹.K⁻¹ pour limiter les pertes thermiques avec l'extérieur. Sur la face avant, une ouverture (plus ou moins grande) est pratiquée dans l'isolant pour permettre la mesure de vitesse par LDV (cf. §2.3.3.2). Le fond de la cellule repose sur une plaque de polystyrène expansé de 4 cm d'épaisseur pour compenser les défauts de planéité du support. Une fenêtre de 15×15 cm² est pratiquée au centre du support horizontal et de la plaque de polystyrène pour permettre l'introduction dans le canal, par la vitre inférieure, d'une nappe laser pour de futures mesures par PIV (Particule Image Velocimetry). Seul le dessus de la cellule n'est pas isolé car la perche utilisée pour la mesure de température dans le canal (cf. §2.3.3.3) ne permet pas de fermer cette face. Pour limiter l'évaporation, un film plastique est tendu sur le dessus et une fenêtre est pratiquée au centre de ce film pour laisser passer la perche.



FIGURE 2.2 – Photos de la cellule en eau avec (à droite) et sans (à gauche) son isolation extérieure en Styrodur[®]. Sur la photo (a) on peut voir en arrière-plan les blocs parois fixés à leur plaque support.

2.2.3 Le canal

Le canal vertical est formé par deux blocs parois face à face maintenus au centre de la cellule en eau par deux plaques support en PVC. Le banc d'essais est conçu de façon symétrique, chaque ensemble bloc paroi et support est indépendant.

2.2.3.1 Les blocs parois

Les blocs parois sont les éléments sensibles de ce banc d'essais car ils doivent être étanches pour protéger les résistances électriques et les capteurs qu'ils renferment (cf. §2.2.3.2).

Ces blocs (voir photo 2.3(a)) sont constitués de trois parties :

- une paroi en acier inoxydable;
- un cadre en polycarbonate sur lequel est collée la paroi;
- et un couvercle en polycarbonate qui se visse sur le cadre avec un joint torique pour assurer l'étanchéité.

Les parois, en acier inoxydable de 1,5 mm d'épaisseur, mesurent 65 cm de haut pour 23 cm de profondeur (selon x et z). La face externe (en contact avec l'écoulement) est polie et la face interne (à l'intérieur du bloc paroi) est rainurée comme le montre la photo 2.3(a). Ces rainures de $1 \times 1 \text{ mm}^2$ de section, sont de deux types (cf. fig. 2.3(b)) : des rainures selon z qui servent à limiter la conduction dans la paroi entre deux zones chauffées ; et d'autres selon x permettant d'insérer des thermocouples dans la paroi au niveau du centre de chaque chaufferette (voir photo 2.5(b)).

Chaque paroi est collée à un cadre en polycarbonate de 5 cm d'épaisseur à l'aide d'un adhésif double-face étanche de 5 mm de large et de 1 mm d'épaisseur. L'étanchéité est renforcée par un cordon en silicone à l'intérieur du bloc paroi. Le doubleface et le silicone résistent tous les deux jusqu'à 90 °C. Cependant, à trois reprises (espacées de plusieurs mois), des fuites sont apparues sur l'un des blocs parois. Le



FIGURE 2.3 – (a) Photo d'un bloc paroi vide. (b) Schéma de la face intérieure des parois en inox avec la disposition des rainures en pointillés.



FIGURE 2.4 – Schémas (échelle non respectée) du collage de la plaque en acier inoxydable sur le cadre en polycarbonate : collage initial à gauche et nouveau collage (à droite) fait après les fuites sur le bloc paroi gauche.

collage a donc été refait et un deuxième cordon de silicone a été rajouté à l'extérieur. Les figures 2.4 schématisent ces deux collages.

Chaque couvercle, de 2 cm d'épaisseur, est fixé sur son cadre au moyen de 56 vis M8 de 3 cm de long et l'étanchéité est assurée par un joint torique de 4 mm de diamètre. Des inserts en peek (plastique plus résistant, utilisé par exemple dans certaines prothèses cervicales) ont été placés dans le cadre en polycarbonate pour renforcer les filetages et permettre un meilleur serrage au niveau du joint torique. Le serrage s'effectue à l'aide d'une clé dynamométrique à 2 Nm.

Tous les fils des résistances électriques et capteurs présents à l'intérieur des blocs sortent à l'air libre par un tuyau en PVC de 3 cm de diamètre fixé sur le couvercle en polycarbonate au moyen d'un raccord cannelé. L'étanchéité au niveau du raccord cannelé est assurée par un joint plat et du freinfilet (empêche le desserrage et les fuites entre les filets), car la fragilité du filetage dans le polycarbonate ne permettait pas l'utilisation d'un joint plat seul, qui demande un serrage important.

Enfin, un cordon en silicone est tiré sur chaque bord long des blocs (bords dans des plans xOy) afin de combler le jeu de plusieurs millimètres entre les blocs parois et les parois vitrées de la cellule en verre et d'éviter l'aspiration d'eau dans le canal par les côtés.

2.2.3.2 Équipement des blocs

La première étape de l'équipement des blocs parois est celle du passage des cables dans le tuyau en PVC et à travers le couvercle. Les thermocouples, étalonnés au préalable (cf. §2.3.2), sont déjà branchés sur la centrale d'acquisition ; ils doivent donc être insérés de l'extérieur vers l'intérieur du bloc. En revanche, les cables des chaufferettes et des fluxmètres doivent être passés de l'intérieur vers l'extérieur.

La seconde étape est l'insertion des thermocouples dans les rainures (selon x) des parois en inox. Un thermocouple de 130 μ m de diamètre (voir §2.3.1.2) est inséré dans chaque rainure verticale des parois en inox de façon à mesurer la température des parois au centre de chaque chaufferette. Les rainures permettent d'approcher au maximum la température de surface des parois en contact avec l'écoulement mais surtout de pouvoir placer les thermocouples sous les chaufferettes sans introduire de défaut de planéité. Les photos 2.5(a) et 2.5(b) montrent une paroi équipée de ses thermocouples. Les capteurs sont maintenus en place grâce à une pâte epoxy bi-composants. Cette pâte permet aussi de boucher complètement la rainure et de réduire ainsi la résistance thermique locale de la paroi en évitant la présence de bulles d'air.

L'étape suivante est la mise en place des chaufferettes, illustrée par les photos 2.5(c) et 2.5(d). Chaque paroi est équipée de 12 chaufferettes indépendantes permettant de créer différentes configurations de chauffage (cf. §2.2.1.2). Les chaufferettes sont équipées de fluxmètres (voir §2.3.1.1) et l'ensemble forme une fine plaque de 1 mm d'épaisseur pour 20 cm de long et 5 cm de large. Chaque ensemble est positionné contre la paroi (côté chaufferette contre la paroi) au centre d'une des zones délimitées par les rainures horizontales (cf. fig. 2.3(b)) et est maintenu en place au moyen de ruban adhésif en aluminium aux deux extrémités (voir photo 2.5(d)).

Enfin, les chaufferettes sont plaquées contre la paroi grâce à trois épaisseurs de mousse en silicone (1 cm d'épaisseur, voir photo 2.5(e)) qui viennent exercer une légère pression (pas trop forte pour ne pas écraser les fluxmètres) lors de la fermeture du couvercle. Cette mousse joue aussi le rôle d'isolant pour limiter les pertes thermiques vers l'arrière des chaufferettes dans les blocs parois.

2.2.3.3 Les plaques support

Chaque bloc paroi est fixé sur une plaque support en PVC (voir photo 2.6(a)) qui permet de le maintenir à mi-hauteur dans la cellule en eau. Ces plaques mesurent 140 cm de haut pour 20 cm de profondeur et 1,5 cm d'épaisseur et leur rigidité est renforcée par deux cornières en acier inoxydable de 3 cm de côté. Pour répartir la pression exercée sur le verre, les deux plaques support reposent sur une troisième plaque de même épaisseur posée au fond de la cellule en eau. Deux rainures sont faites dans cette troisième plaque afin de maintenir l'écartement des plaques support en bas de la cellule. Le maintien des plaques en haut, se fait au moyen de deux barreaux en PVC, de longueur réglable, tendus entre les deux plaques (fig. 2.6(b)).

La jonction entre le bloc paroi et sa plaque support se fait au moyen d'un système vis-écrous en laiton comme le montre la photo 2.6(c). Ce système permet de régler l'écartement du canal entre 0 et 14 cm. Un jeu a été volontairement introduit dans ce système de façon à pouvoir régler le parallélisme des parois.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0093/these.pdf © [C. Daverat], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés



FIGURE 2.5 – Photos présentant les différentes étapes de l'équipement des blocs parois. (a) et (b) Mise en place des thermocouples dans les rainures. (c) et (d) Positionnement des chaufferettes. (e) Fin avec la mise en place des trois couches de mousse isolante.



FIGURE 2.6 – (a) Photo d'une plaque support en PVC. (b) Schéma de l'ensemble en PVC permettant de maintenir les blocs parois : les deux plaques support, la troisième plaque posée au fond de la cellule et les barreaux de maintien. (c) Photo du canal en gros plan (banc d'essais en cours de construction) avec le système vis écrou qui soutient le bloc paroi.

2.2.3.4 Système de réglage de la géométrie

Le paragraphe précédent a montré que la largeur du canal se règle grâce aux deux systèmes vis-écrous maintenant les blocs parois aux plaques support. Cependant, ce système mécanique ne permet que le maintien des parois et ne peut assurer leur parallélisme. C'est pourquoi ce réglage est fait à l'aide d'un autre système présenté sur la figure 2.7. Cette figure présente aussi une version précédente qui sera détaillée plus loin (§2.2.6.3). Une barre carrée en acier inoxydable est fixée de façon rigide à la plaque support en PVC. Deux tiges filetées reliant les coins supérieurs du bloc paroi à la barre carrée permettent de régler la distance et/ou l'orientation entre ces deux éléments.



FIGURE 2.7 – Schéma présentant les deux systèmes utilisés pour le réglage du parallélisme des parois.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0093/these.pdf © [C. Daverat], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés



FIGURE 2.8 – Schéma du fonctionnement du système de régulation de la température dans la cellule en eau.

2.2.4 La régulation thermique de la cellule

La condition aux limites à l'extérieur du canal est une condition de température imposée. Le banc d'essais doit donc être équipé d'un système de régulation thermique qui vient compenser la puissance injectée aux parois.

2.2.4.1 Le système de régulation

La régulation de la température de l'eau se fait au moyen d'échangeurs à eau reliés à un bain thermostaté. Pour des raisons de simplicité et pour limiter les pertes de charge dans la cellule, ces échangeurs ont été installés en dehors de la cellule en eau et de créer un circuit de régulation externe. Le système de régulation thermique est donc composé de trois éléments :

- une pompe pour la circulation de l'eau de la cellule;
- deux échangeurs contre-courant droits;
- et un bain thermostaté Lauda pouvant extraire jusqu'à 1,6 kW.

Le principe de fonctionnement de ce système est présenté sur la figure 2.8. L'eau chaude de la cellule est aspirée en partie haute près des plaques support en PVC grâce à une pompe à faible débit (entre 1 et 3 L.min⁻¹). Cette pompe, à membrane, est couplée à un amortisseur qui absorbe les vibrations de la membrane oscillante pour éviter de perturber l'écoulement dans la cellule. L'eau passe ensuite dans deux échangeurs droits montés en série puis est réinjectée dans la cellule au niveau de la sortie du canal, derrière les blocs parois. Les deux échangeurs sont refroidis grâce à deux circulations d'eau provenant du bain thermostaté qui est régulé à une température fixe. La température de consigne de la régulation n'est pas la température de refoulement de l'eau dans la cellule mais la température de l'eau du bain thermostaté. L'ensemble du système (tuyaux et échangeurs) est isolé à l'aide de gaines en mousse isolante recouvertes de ruban adhésif en aluminium pour limiter les pertes par transfert radiatif. L'aspiration et le refoulement de l'eau dans la cellule se fait au travers de diffuseurs en PVC afin de limiter au maximum les perturbations en répartissant le débit sur toute la profondeur du canal.



FIGURE 2.9 – (a) Photo d'un des diffuseurs en PVC utilisé pour l'aspiration et le refoulement du système de régulation. (b) Photo des diffuseurs d'aspiration (à gauche) et de refoulement (à droite) fixés sur la plaque support en PVC et sur le bloc paroi.

2.2.4.2 Les diffuseurs d'aspiration et de refoulement

La photo 2.9(a) montre un des diffuseurs utilisés pour l'aspiration et le refoulement de l'eau dans la cellule. Ce sont des tubes en PVC de 1 cm de diamètre et de 20 cm de long, percés de 4 trous de 8 mm de diamètre. Ainsi le débit, déjà faible, du circuit de régulation est divisé par 8 au niveau du refoulement. La position des diffuseurs est présentée sur la photo 2.9(b), mais en fonctionnement, le diffuseur de refoulement (à droite) est orienté vers le haut (et non vers la droite). Le but du système de régulation étant d'extraire la chaleur injectée au niveau des parois, les diffuseurs d'aspiration ont été positionnés en partie haute et fixés aux plaques support à l'aide de clips en plastique. L'aspiration est orientée horizontalement. Le refoulement a été placé au niveau de la sortie du canal car la température extérieure en sortie de canal est un des paramètres importants pour ce type d'écoulement. Les diffuseurs sont donc fixés au dos des blocs parois grâce aux mêmes clips et le refoulement est orienté vers le haut.

2.2.5 L'environnement extérieur

Divers aménagements ont dû être mis en place dans la pièce pour faciliter l'accès à l'intérieur de la cellule et la manutention des différents éléments, mais aussi pour stabiliser la température de l'air environnant et limiter les écarts de température (notamment jour/nuit).

2.2.5.1 Les plateformes du banc d'essais

Tout d'abord, la cellule en eau a été surélevée de façon à porter le canal à hauteur du regard. Un châssis de 60 cm de haut a donc été construit pour supporter la cuve en verre. Des caoutchoucs antivibration ont été placés sous les pieds du châssis pour limiter au maximum l'introduction de perturbations provenant de l'extérieur. Le haut de la cellule en verre se trouvant donc à 1,9 m du sol, une plateforme de 1,2 m de large et de 80 cm de profondeur et de hauteur, a été construite derrière afin de permettre un accès à l'intérieur de la cellule à deux personnes en même temps. La disposition du banc d'essais dans la pièce est illustrée par la photo 2.10(a). Cependant, cette plateforme ne permet pas la manutention des parois fixées



FIGURE 2.10 – (a) Photo montrant la cellule en eau sur son bâti ainsi que la plateforme derrière permettant d'accéder à la cellule par le haut. (b) Photo présentant la mise en place d'une paroi grâce au palan et à la potence installés derrière.

à leur plaque support car ces ensembles sont lourds (environ 20 kg) et doivent être levés à 3,5 m du sol pour être introduits dans la cuve.

2.2.5.2 Manutention des parois

La manutention des parois est un des points délicats de l'assemblage du banc d'essais. En effet, cette manœuvre doit être faite avec délicatesse pour éviter un choc sur les blocs parois qui pourrait engendrer une fuite ou des rayures sur les parois. De plus, les plaques support doivent être insérées bien droites et donc levées à plus de 3,5 m du sol, comme le montre la photo 2.10(b). Pour cela, une potence d'une hauteur de 4,5 m (hauteur sous palan) a été installée avec un palan manuel pouvant lever 50 kg. La manutention des plaques support et de leur bloc paroi se fait donc à deux : une personne qui lève à l'aide du palan et l'autre qui guide l'introduction de la paroi dans la cellule en eau.

Il faut noter ici que la hauteur de cuve de 1,5 m approche de la hauteur limite possible, avec une hauteur sous palan de 4,5 m.

2.2.5.3 Régulation thermique de la pièce

Même si le banc d'essais est régulé en température et en grande partie isolé de l'extérieur, les variations de température dans la pièce influent sur la température de l'eau dans la cellule et notamment en bas. D'autant plus que les campagnes de mesures se déroulent sur plus d'un mois et qu'aux variations jour/nuit (pouvant aller jusqu'à 5°C) s'ajoutent les variations de températures saisonnières. Pour remédier à ce problème, un système de contrôle de la température a été installé dans la pièce. Cette salle acceuillant aussi l'expérience du canal vertical en air (expérience de Vareilles [80]), un système de plafond diffusant a été installé pour limiter au maximum les vitesses d'air dans la pièce. Ce système permet de fixer une température de 22°C dans la pièce avec des variations mesurées de $\pm 1^{\circ}$ C, ce qui est suffisamment stable pour rendre notre banc d'essais indépendant de l'extérieur.



FIGURE 2.11 – Photos d'un bloc paroi tel qu'il était conçu au départ.

2.2.6 Réglages et adaptations du banc d'essais

Au cours de cette thèse le banc d'essais a connu de nombreuses évolutions en commençant par la conception des blocs parois. Les principales évolutions qui ont conduit à la version finale qui vient d'être présentée sont recensées ici.

2.2.6.1 Les blocs parois

Au départ du projet, les blocs parois étaient bien différents, composés de 4 parties. Pour palier les éventuelles déformations de la paroi en acier inoxydable sous l'effet de la chaleur, le cadre était conçu en deux parties : un cadre en inox pour pouvoir visser le couvercle (lui aussi conçu en inox) et une bordure de 4 cm en caoutchouc. Le cadre en caoutchouc était formé de 4 bandes collées entre elles sur le cadre et la paroi en inox à l'aide d'une colle Araldite[®] résistante à la température. Les photos 2.11 montrent un bloc paroi en cours de collage avec le couvercle vissé sur un cadre en inox, la bordure en caoutchouc et la paroi en inox (non collée ici).

Cependant, cette solution impliquait trop de collage, ce qui entraînait des fuites, d'autant plus que le serrage pendant le collage était limité à cause de la fragilité de la paroi. C'est pourquoi cette solution a été abandonnée au profit de la solution en polycarbonate usinée dans la masse par une entreprise extérieure.

2.2.6.2 Modification de la régulation thermique

Comme discuté précédemment, le système de régulation thermique est actuellement constitué de 2 échangeurs droits contre-courant branchés en série. Deux échangeur ont été utilisés car au départ le circuit de régulation était conçu différement ; i.e. chaque paroi avait son propre échangeur afin de pouvoir n'en brancher qu'un si nécessaire. La pompe était ainsi placée en aval des échangeurs de façon à mélanger les deux circuits d'eau et refouler des deux côtés à la même température.

Cependant cette différenciation des circuits n'était pas nécessaire et lors d'un réaménagement du circuit, pour réduire les longeurs de tuyaux et les pertes de charge, les deux échangeurs ont été installés bout à bout. De plus, l'isolation du circuit a été faite à ce moment-là.



FIGURE 2.12 – Photo de la première cellule en double vitrage.

2.2.6.3 Adaptation du système de réglage de la géométrie

Le réglage de la géométrie s'est toujours fait à l'aide de quatres tiges filetées vissées aux deux coins supérieurs de chaque bloc paroi et reliées à une barre carrée en inox. Cependant, comme le montre la figure 2.7 (schéma de gauche), au départ la barre en inox était fixée sur l'axe du système vis-écrous (voir aussi la photo 2.6(c)). Cette solution avait été adoptée pour pouvoir changer facilement l'écartement des parois sans changer le parallélisme.

Ce système a lui aussi été revu car la rigidité du système n'était pas suffisante pour régler le parallélisme des parois. La solution, plus simple, de fixer la barre carrée en inox directement sur les plaques support à l'aide de deux autres tiges filetées a donc été mise en place.

2.2.6.4 La cellule en eau et son isolation

Le changement de la cellule en eau a été rendu nécessaire suite à une fuite apparue en juin 2011. La première cellule présentée sur la photo 2.12 était fabriquée en double-vitrage pour limiter les pertes thermiques vers l'extérieur. C'était une cuve faite sur mesure en verre de 12 mm d'épaisseur avec un double vitrage (sauf sur le fond) de 6 mm. Au départ, celle-ci n'était pas isolée, or les premières campagnes d'essais, menées à faible puissance (190 W.m⁻²) ont montré que les pertes n'étaient pas négligeables (la puissance de chauffe étant faible, l'importance des pertes augmente). Ce constat a mené à l'isolation de la cellule.

Cependant, peu de temps après, une fuite est survenue sur la cuve. Cette fuite n'étant pas localisable et la réparation difficile, il a été décidé de changer la cuve. Le double-vitrage n'étant plus nécessaire, il a été supprimé et pour améliorer la qualité des mesures par LDV, la face avant et le fond de la cellule ont été fabriqués en verre ultra-clair¹. Par ailleurs, la nouvelle cuve a été faite en verre de 15 mm : épaisseur minimale pour une cuve de 1,5 m de haut d'après le nouveau fournisseur. La fuite sur l'ancienne cuve pourrait être due à la déformation du verre, trop fin pour supporter les contraintes imposées par la hauteur.

^{1.} La différence de couleur du verre se remarque sur la photo 2.2(a). La tranche de la face arrièrre apparaît noire alors qu'elle est transparente à l'avant (on peut voir à travers les 60 cm de verre).

2.2.6.5 L'entrée du canal

L'entrée du canal n'a subi qu'une évolution mineure. Lors des premières campagnes, l'entrée était fortement perturbée, ce qui demandait des acquisitions de vitesse sur des temps longs (~ 1 h) pour obtenir des grandeurs moyennes correctes. Sur l'expérience en air, Vareilles [80] a observé qu'une entrée en angle droit génère une zone de recirculation liée au bord d'attaque. Pour éviter cette zone de recirculation, lors du remplacement de la cuve, des demi-tubes en PVC de 4 cm de diamètre ont été collés sur le bas des blocs parois pour passer d'une entrée à angle droit à une entrée arrondie. Les tubes ont été collés au silicone et un joint a été fait entre le demi-tube et la paroi afin de limiter les aspérités.

Cependant, ce changement n'a eu que très peu d'effet sur les fluctuations de la vitesse en entrée.

2.3 Instrumentation et pilotage

La section précédente s'est attachée à la description du banc d'essais. Cette section traitera de sa gestion et de l'instrumentation mise en place pour l'acquisition des résultats.

2.3.1 Mesures thermiques

Comme discuté précédemment, des mesures de densité de flux de chaleur et de température sont effectuées sur ce banc d'essais au moyen de fluxmètres et de thermocouples. Les différents capteurs présents sur le banc d'essais sont représentés sur le schéma 2.13. Ces capteurs, à l'exception du micro-thermocouple dans le canal qui sera présenté par la suite (cf. §2.3.3, non représenté sur le schéma), sont tous branchés sur une centrale d'acquisition Agilent[®] 34980A. Les capteurs sont tous solidaires d'un des deux ensembles bloc paroi/plaque support et ils sont branchés sur deux cartes différentes de la centrale d'acquisition ; la carte 1 (voies 1001 à 1040) pour la paroi droite et la 2 (voies 2001 à 2040) pour la gauche.

2.3.1.1 Mesures de densité de flux de chaleur

Chaque chaufferette est équipée d'un capteur de densité de flux de chaleur Captec[®] collé au dos (voir photo 2.14(a)). Le principe de fonctionnement des fluxmètres est schématisé sur la figure 2.14(b) ; il consiste à mesurer un gradient de température transversal (perpendiculaire à la densité de flux) qui est dû à la densité de flux longitudinale à mesurer. L'avantage principal est d'augmenter la sensibilité du capteur tout en gardant une épaisseur et donc une résistance thermique faible. Le capteur se compose de deux plaques fines en cuivre entre lesquelles se trouve une alternance de bandes de cuivre et de cavités d'air. La densité de flux de chaleur incidente *q* qui traverse le capteur de bas en haut est contrainte à passer par les zones cuivrées (à cause de la différence de conductivité entre l'air, 0,026 W.m⁻¹.K⁻¹ et le cuivre, 390 W.m⁻¹.K⁻¹). La différence de température entre les points A et B est donc directement corrélée à la densité de flux de chaleur locale qui traverse le capteur. La densité de flux moyenne traversant le capteur est obtenue en intégrant ces différences sur toute sa surface. En pratique, la mesure de température intégrée se fait par une thermopile de surface entre les plots et la surface cuivrée du bas.

Les capteurs de la paroi droite sont associés aux voies 1022 à 1033 du multimètre Agilent[®] et ceux de la paroi gauche aux voies 2022 à 2033. Les chaufferettes étant



FIGURE 2.13 – Schéma du banc d'essais vu de face avec les différents capteurs qu'il contient associés à leur numéro de voie sur la centrale Agilent[®].



FIGURE 2.14 – (a) Photo d'une chaufferette, face résistance en haut et fluxmètre en bas. (b) Schéma de fonctionnement d'un capteur de densité de flux de chaleur Captec[®].

disposées de bas en haut, les capteurs XX22 correspondent aux premières chaufferettes en entrée et les XX33 aux 12^{ème} placées en sortie. Par la suite, les capteurs seront désignés par leur numéro de voie.

2.3.1.2 Mesures de température

Les températures sur le banc d'essais (mise à part celle dans le canal mesurée avec le micro-thermocouple présenté ensuite) sont mesurées à l'aide de thermocouples de type K (chromel-alumel) de 130μ m de diamètre fabriqués sur place. Le dispositif expérimental compte au total 40 thermocouples répartis en deux groupes de 20; un groupe par ensemble bloc paroi/plaque support. Chaque groupe de 20 thermocouples possède sa propre jonction froide (cf. annexe D); il s'agit d'un barillet en cuivre dans lequel sont insérées les soudures froides de chaque thermocouple ainsi qu'une sonde Pt100 pour mesurer la température de la jonction froide. Les deux barillets (un par jonction) sont ensuite isolés séparément à l'aide de chanvre et rassemblés dans une boîte en plastique.

La disposition des thermocouples, décrite sur le schéma 2.13, est la suivante :

- 12 thermocouples dans chaque paroi au centre de chaque chaufferette (cf. fig. 2.5(c) et 2.5(d)) sur les voies 1001 à 1012 (paroi droite) et 2001 à 2012 (paroi gauche);
- 1 thermocouple au dos de chaque 6^{ème} chaufferette (1013 et 2013) et un au même endroit mais entre la première et la deuxième couche d'isolant (1014 et 2014);
- 2 thermocouples en entrée sous chaque bloc paroi (1017 et 2017) et 2 en sortie juste au dessus des blocs (dans l'écoulement, 1016 et 2016); ces 4 thermocouples sont situés dans un plan xOy, 1 cm derrière le plan de mesure (situé à z/l = 0, 5);
- 2 thermocouples en bas de la cellule en verre (1018 et 2018) et 2 en haut (1015 et 2015), attachés sur des baguettes en PVC à 20 cm des plaques support et 20 cm en-dessous ou au-dessus des blocs parois.
- 1 thermocouple dans chaque diffuseur de refoulement (1021 et 2021) et 1 dans le diffuseur d'aspiration gauche (2019);
- 1 thermocouple hors de la cellule en eau, collé sur l'isolant (1019).

Ainsi sont mesurées les températures dans les parois, dans l'isolant des blocs parois (pour vérifier les surchauffes), à différents endroits de la cellule en eau et dans la pièce. Les voies 1020 et 2020 sont réservées aux résistances platine des jonctions froides qui sont branchées en 4 fils pour optimiser la mesure (voies 1020/2020 et 1040/2040).

2.3.2 Étalonnage des capteurs

Tous les capteurs présents sur le banc d'essais ont été étalonnés sur place avec leur chaîne d'acquisition (capteur + fils + carte et centrale d'acquisition).

Les thermocouples et les sondes platine ont été étalonnés à l'aide d'une sonde platine de référence présente au laboratoire, calibrée par un organisme certifié à $\pm 0,01^{\circ}$ C et d'un banc construit pour l'occasion (décrit dans l'annexe D). Dans un premier temps les deux sondes Pt100 des jonctions froides ont été étalonnées pour 5 paliers de température compris entre 10 et 30°C. Puis les jonctions froides ont été assemblées pour procéder à l'étalonnage des thermocouples sur 6 paliers entre 10 et 70°C. Après étalonnage, l'incertitude sur la mesure de température des sondes platine est de $\pm 0,02^{\circ}$ C et celle sur la mesure des thermocouples est de $\pm 0,05^{\circ}$ C.

Les fluxmètres ont aussi été étalonnés (voir annexe C) avec un banc d'étalonnage conçu spécialement pour ce type de capteur par D. David lors de sa thèse [29]. En effet, les fluxmètres Captec[®] sont fournis avec un étalonnage fait en usine, mais celui-ci est assez approximatif et en particulier, il néglige la réponse du capteur pour une densité de flux de chaleur nulle. L'étalonnage des fluxmètres s'est donc fait en deux temps : un étalonnage sous une densité de flux nulle, en plaçant les fluxmètres entre deux plaques d'isolant; et un étalonnage à 50 $W.m^{-2}$, ce qui correspond à l'ordre de grandeur des densité de flux de chaleur mesurées sur le banc d'essais (rappelons ici que les fluxmètres mesurent les pertes dans l'isolant). L'étalonnage ne s'est fait que sur deux points pour des raisons de temps car, contrairement aux thermocouples qui ont été étalonnés tous ensemble, les fluxmètres sont étalonnés un par un. La linéarité de la réponse a été vérifiée pour un capteur (voir annexe C). Après étalonnage, l'incertitude sur la mesure de la densité de flux de chaleur est de 1,2%; ce qui conduit à une incertitude sur la valeur de la densité de flux de chaleur injectée dans le canal (environ cent fois plus grand que les pertes) de l'ordre de 0,01%.

2.3.3 Mesures couplées vitesse/température

En parallèle des mesures fixes de densité de flux de chaleur et de température sur le banc d'essais, un dispositif original a été mis en place pour mesurer la vitesse et la température de l'écoulement dans le canal. Ce système est basé sur le couplage d'un système de mesure de vitesse par LDV et d'un micro-thermocouple à un système de déplacement à deux axes (x et y).

2.3.3.1 Choix du système

Pour la mesure de vitesse, deux systèmes classiques étaient envisageables : la LDV et la PIV. Ces deux systèmes, non intrusifs, sont basés sur la mesure de vitesse de particules injectées dans l'écoulement et éclairées à l'aide de laser. La LDV permet une mesure continue en un point tandis que la PIV permet la mesure de champs (carré de 10 cm de côté environ) de vitesse instantanés avec une fréquence imposée (jusqu'à 10 Hz pour un système classique).

Bien que le banc d'essais ait été conçu pour pouvoir accueillir les deux techniques et qu'un système de PIV était déjà disponible au laboratoire, le choix a été fait d'aquérir un système de LDV pour les mesures. Ce choix a été motivé par trois aspects :

- la LDV permet d'avoir des taux d'acquisition élevés car elle n'est pas limitée par la technologie (la suite montre que ce ne fut pas réellement le cas lors des campagnes);
- la mesure en un point permet de s'approcher plus facilement des parois pour faire des mesures dans les couches limites, ce qui est plus difficile en PIV (problème de réflection et de perpendicularité de la caméra par rapport aux parois);
- la température est mesurée avec un micro-thermocouple placé très près du volume de mesure pour obtenir la vitesse et la température au même point et accéder à une estimation des fluctuations croisées ($\overline{u'\theta'}$ et $\overline{v'\theta'}$). La mesure couplée de vitesse et température avec un système de PIV-LIF (Laser-Induced Fluorescence), non intrusive, est difficilement applicable dans ce cas car elle nécessite l'utilisation d'un traceur fluorescent dans l'eau (souvent toxique, classiquement de la rodamine), qui pose des problèmes de recyclage vu les quantités d'eau utilisées.

Parmi ces trois points, la suite montrera que le vrai plus du système LDV fut de pouvoir s'approcher très près de la paroi.

2.3.3.2 Mesures de vitesse

Le principe de la mesure de vitesse par LDV est de créer un réseau de franges en un point, appelé « volume de mesure », en faisant interférer deux faisceaux laser (voir figure 2.15) et de mesurer la vitesse de particules (ajoutées à l'écoulement) qui traversent ce réseau de franges. La vitesse est calculée à partir du signal lumineux réfléchi par les particules et récupéré par un photomultiplicateur. Le système mesure la vitesse perpendiculaire aux franges (dans le plan des faisceaux et perpendiculaire à l'axe optique), il suffit donc de créer plusieurs réseaux à l'aide de différents faisceaux laser de couleurs différentes pour mesurer plusieurs composantes de la vitesse de la particule. La mesure des composantes x et y (ou y et z) est assez simple car elle se fait avec quatre faisceaux ayant le même axe optique et donc provenant de la même sonde laser, tandis que celle des trois composantes nécessite deux sondes laser qui doivent être ajustées pour que les volumes de mesure coïncident.

L'écoulement étant considéré 2D au centre du canal (cf. §2.2.1.1), un système LDV à deux composantes (x et y) a été choisi, de la société TSI[®]. Ce système est composé de :

- un laser continu Argon de 300 mW (de la société Meles Griot[®]) permettant de fournir trois longueurs d'ondes (vert : 514 nm, bleu : 488 nm, violet : 458 nm);
- une cellule de Bragg qui permet la séparation des longueurs d'onde et le décalage en fréquence d'un des faisceaux de chaque couleur²;
- une sonde laser reliée à la cellule de Bragg par fibre optique qui fait interférer les 4 faisceaux (verts et bleus) et qui récupère le signal rétrodiffusé par les particules pour l'envoyer dans le photomultiplicateur;
- un photomultiplicateur;
- un processeur qui traite le signal reçu.

^{2.} si le réseau de franges est immobile il est impossible de déterminer le sens des particules, c'est pourquoi un des faisceaux est décalé en fréquence pour faire défiler le réseau à 40 MHz (ce qui correspond à une vitesse d'environ 150 m.s^{-1}).

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0093/these.pdf © [C. Daverat], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés



FIGURE 2.15 – (a) Photo d'un réseau de franges créé par le croisement de deux faisceaux laser, faite à l'ONERA. (b) Schéma du principe d'interférence de deux faisceaux lasers.

Le système est piloté par ordinateur à l'aide du logiciel FlowSizer fourni par TSI[®]. La sonde laser est montée sur un système de déplacement à deux axes, fabriqué par la société Newport[®], permettant un déplacement, de 2 m selon x et 40 cm selon y, avec une précision sur la position de 10 μ m.

Pour l'ensemencement de l'écoulement, trois types de particules ont été utilisées. Au départ, des micro-billes argentées de 10 μ m et d'une densité de 1,4 étaient utilisées, mais celles-ci étaient trop lourdes et sédimentaient trop vite. Des particules de polyamide ont donc été utilisées par la suite, moins réfléchissantes mais plus légères avec une densité de 1,03. Deux diamètres différents ont été testés, 20 puis 5 μ m. Les différences entre ces particules n'ont pas pu être observées car les mesures ont toujours été faites dans des conditions différentes à cause de plusieurs problèmes avec le système de LDV.

De nombreux problèmes ont été rencontrés avec le système de LDV tout au long des campagnes de mesure. Tout d'abord, une perte de puissance (environ 50%) a été observée sur les 4 faisceaux en sortie de la sonde ; puis une seconde chute au niveau des faisceaux bleus (environ 75 %). Ces pertes de puissance étaient principalement dues à un encrassement anormal de la sortie de la tête laser et des têtes des fibres optiques. De plus, le processeur du système est tombé en panne et a dû être remplacé ; et sur la fin de la thèse, le laser a perdu la moitié de sa puissance et est devenu instable, sa puissance variant entre 110 et 180 mW. La qualité du faisceau laser initial variant, les réglages des fibres optiques et la puissance en sortie de sonde n'étaient plus optimaux (par rapport à la puissance en sortie de laser).

L'accumulation et la succession des problèmes sur le laser ont fait que la plupart des mesures n'ont pas été réalisées avec les réglages des faisceaux optimaux, ce qui rend difficile la comparaison entre les différentes particules utilisées (difficile d'attribuer la part des particules et des réglages sur la faiblesse du signal). Par ailleurs, en changeant la cuve en verre, la transmission du signal a aussi été améliorée.

Finalement, entre les épaisseurs de verre (double-vitrage coloré, ou cellule trapézoïdale cf. §2.3.3.4), le choix des particules et les problèmes accumulés, les taux d'acquisition ont rarement dépassé les 10 Hz et ces derniers étaient le plus souvent de quelques Hertz.



FIGURE 2.16 – (a) Schéma des possibilités de mesure de vitesse dans le canal avec ou sans rotation autour de l'axe x de la sonde laser. (b) Schéma en perspective et vue de dessus de l'angle formé par les faisceaux laser en fonction de la rotation autour de l'axe z de la sonde.

2.3.3.3 Mesure de température dans le canal

La température dans le canal est mesurée à l'aide d'un micro-thermocouple de type K de 25 μ m de diamètre. Ce thermocouple est glissé dans une tige en laiton de 3 mm de diamètre (avec un diamètre intérieur de 1 mm) suspendue à une potence en profilés aluminium fixée sur la platine de déplacement du laser. Ce système permet la mesure de température à proximité du volume de mesure de la vitesse. Pour que la pointe du thermocouple ne perturbe pas la mesure de vitesse, celle-ci est positionnée légèrement plus haut dans un rayon de 2 mm autour du volume de mesure.

Le micro-thermocouple possède sa propre jonction froide avec sa propre sonde Pt100 et sa propre centrale d'acquisition Keithley[®]. Cette indépendance est faite pour pouvoir atteindre de grandes fréquences d'acquisition ; la constante de temps associée au micro-thermocouple est de l'ordre de 2 ms. Lors des campagnes de mesure la fréquence était de 9 Hz, cette fréquence n'est pas très grande mais elle est du même ordre de grandeur que celle de la mesure de vitesse et elle permet de limiter le bruit de mesure.

Le micro-thermocouple et sa sonde Pt100 ont eux aussi été étalonnés au laboratoire (voir annexe E) et l'incertitude sur la mesure de température dans le canal est la même que pour les autres thermocouples ($\pm 0, 05^{\circ}$ C).

2.3.3.4 Mesures en proche paroi

La principale difficulté de ce système de mesure de vitesse et de température couplées est la mesure en proche paroi. La mesure se faisant dans le plan central du canal (plan xOy à z = l/2), pour approcher la paroi il faut tourner la sonde laser autour de l'axe x pour que le faisceau le plus proche de la paroi soit quasiment parallèle à celle-ci comme le montre la figure 2.16(a). Cependant, cette inclinaison ne permet la mesure que sur une moitié de canal (de y/b = 0 à $y/b \sim 0, 6$). Pour réduire cet angle d'inclinaison, la sonde est tournée de 45° autour de l'axe z (fig. 2.16(b)).

Cependant, à cause de la différence d'indice de réfraction (n) entre l'air et l'eau, si la sonde est inclinée par rapport à la paroi avant de la cellule en verre, les faisceaux ne se croisent plus au même point, voire ne se croisent plus du tout. Ce problème de réfraction est schématisé sur la figure 2.17. Sur ce schéma les angles



FIGURE 2.17 – Schéma de la diffraction des faisceaux laser à la traversée des dioptres air/eau et eau/eau. Les traits pleins représentent le trajet des faisceaux avec le dioptre et les pointillés représentent leur trajet sans dioptre.



FIGURE 2.18 – Schéma de la cellule trapézoïdale et vue de dessus du banc d'essais avec celle-ci installée en face avant.

d'inclinaison sont exagérés pour des raisons de clarté et la diffraction dans le verre est négligée à cause de sa faible épaisseur et des faibles angles d'inclinaison. Ce schéma en 2D montre qu'en inclinant la sonde par rapport à la surface vitrée avant de la cuve, les faisceaux ne se croisent plus au niveau de l'axe optique. La vitesse mesurée par chaque composante ne correspondra donc pas au même point de l'écoulement.

Pour remédier à ce problème, une petite cellule trapézoïdale en verre ultraclair formant un angle de 4° et remplie d'eau (voir fig. 2.18) a été conçue. Ainsi la sonde laser peut être inclinée autour de l'axe x du même angle et faire des mesures proches de la paroi gauche. Néanmoins, ce système empêche de s'approcher de la paroi droite ce qui a limité less mesures de y/b = 0 à y/b = 0, 6. Avec cette cellule, les faisceaux arrivent toujours de biais par rapport à la grande cuve en verre (voir fig. 2.17), mais dans cette configuration cela ne les dévie pas car l'indice de réfraction est le même de part et d'autre de la vitre. Le paramètre important de cette installation est la perpendicularité au niveau du dioptre air/eau.

2.3.4 Système de commande et d'acquisition

Le banc d'essais est presque entièrement piloté par ordinateur ; seuls la pompe et le bain thermostaté du système de régulation ne sont pas contrôlés. Trois ordinateurs sont utilisés pour piloter l'ensemble du banc et ses appareils de mesure : un pour l'alimentation des chaufferettes et la centrale d'acquisition Agilent[®]; un pour le système de LDV et un dernier pour le système de déplacement et la centrale Keithley[®] avec le micro-thermocouple. Chaque ordinateur peut être piloté à distance par internet en se connectant au réseau de l'INSA de Lyon par VPN (Virtual Private Network).

2.3.4.1 Pilotage du banc d'essais sous LabVIEW®

LabVIEW[®] est un logiciel de développement d'applications basé sur un langage de programmation graphique. Chaque programme, appelé VI, se présente sous la forme de deux fenêtres : une « face avant » (fig. 2.19) qui sert à donner les instructions et à afficher les résultats et une « face arrière » ou « diagramme » qui présente le code sous forme graphique. Le codage se fait en reliant des « boîtes » qui sont autant de sous-VIs ³ par des fils qui matérialisent l'ordre des actions.

Le programme de pilotage du banc d'essais est schématisé sur la figure 2.20. Au démarrage, il configure l'alimentation et la centrale d'acquisition Agilent[®] en fonction des consignes imposées par l'utilisateur en face avant (fig. 2.19). Ensuite, il rentre dans une boucle pour faire l'acquisition des mesures. À chaque itération, le programme vérifie et applique la consigne « ON/OFF » de l'alimentation ; l'acquisition des mesures se fait même si l'alimentation électrique est coupée. Ensuite, la centrale d'acquisition balaye l'ensemble des voies de mesure et les données sont enregistrées dans un fichier texte. Par ailleurs, une fois les voies balayées, le programme vérifie que la température mesurée sur chacune des voies ne dépasse pas une température de sécurité de 70°C. Si c'est le cas, l'alimentation est coupée et le programme s'arrête. Une seconde sécurité indépendante coupe l'alimentation si la température dans l'isolant des blocs parois dépasse aussi les 70°C ; cette sécurité est gérée par un disjoncteur indépendant possédant sa propre alimentation. Enfin, le programme s'arrête quand l'utilisateur appuie sur le bouton STOP (en face avant).

Le temps d'une itération dépend du nombre de voies mesurées et de la configuration de chaque voie; jusqu'à présent toutes les voies ont été balayées à chaque itération avec un temps d'intégration de 1 NPLC⁴ et le temps d'une itération est de 4 secondes. L'arrêt de l'alimentation (par l'utilisateur ou par le processus de sécurité) ne peut se faire qu'une fois par itération soit toutes les 4 secondes.

De nombreux sous-VIs spécifiques à chacune des tâches ont du être développés pour la conception du programme de pilotage du banc d'essais.

2.3.4.2 Synchronisation des mesures de température et de vitesse dans le canal

La mesure couplée de température et de vitesse est un des points forts de ce banc d'essais (cf. §2.3.3). La synchronisation des mesures est donc essentielle. Le système de LDV acquiert une vitesse chaque fois qu'une particule valide passe dans le volume de mesure ; une synchronisation parfaite des mesures de vitesse et de température dans le canal nécessiterait un système complexe où l'acquisition de la température serait commandée par le système de LDV. Un tel système ne pouvait pas être mis en place dans le temps de cette thèse et avec les moyens disponibles (nécessité d'améliorer le système de LDV). C'est pourquoi la synchronisation n'a été faite que sur le temps de départ des deux mesures.

Le système de mesure couplée est totalement indépendant du banc d'essais ; il est piloté par deux ordinateurs supplémentaires. L'acquisition de la vitesse se fait

^{3.} un sous-VI est un VI qui est utilisé par un autre VI.

^{4.} Number of Power Line Cycles, 1 NPLC = 20 ms (avec une alimentation à 50 Hz).



FIGURE 2.19 – Vue de la face avant du programme LabVIEW[®] de pilotage du banc d'essais.



FIGURE 2.20 – Schéma du programme de pilotage du banc d'essais.



FIGURE 2.21 – Schéma du programme de pilotage du système de mesure couplée vitesse/température.

78 Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0093/these.pdf @ [C. Daverat], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

au travers du logiciel FlowSizer[®], fourni avec le système de LDV et nécessite un ordinateur pour le faire fonctionner. Pour obtenir de bonnes fréquences d'acquisition, le micro-thermocouple est relié à sa propre centrale d'acquisition Keithley[®]. L'acquisition est commandée par un second ordinateur au moyen d'un programme LabVIEW[®]. Ce programme pilote la centrale d'acquisition Keithley[®] et le système de déplacement. De plus, les deux ordinateurs sont reliés par une connexion série et le programme LabVIEW[®] envoie des consignes au logiciel FLowsizer[®] pour synchroniser les démarrage des mesures.

Le programme LabVIEW[®] qui permet la synchronisation des mesures couplées de vitesse et de température dans le canal est schématisé sur la figure 2.21. Son principe est le même que le programme de pilotage du banc d'essais (cf. fig. 2.20) : une première étape de configuration puis une boucle pour l'acquisition et l'enregistrement de la température. Un ordre de démarrage est envoyé à Flowsizer[®] juste avant le démarrage de l'acquisition de la température de sorte que les deux mesures démarrent en même temps. Une seconde boucle est ajoutée par dessus pour permettre de lancer des mesures en différents points. Ainsi, le programme lit dans un fichier texte les positions (x et y) du point de mesure, déplace la sonde et lance la mesure. Un temps mort de 100 s est inséré entre le déplacement du système et le départ de la mesure pour attendre que la perche s'immobilise après le déplacement ; l'immobilisation durait généralement entre 50 et 80 s.

2.4 Conclusions

Ce chapitre est l'aboutissement d'un des objectifs principaux de cette thèse, à savoir la mise en route d'un dispositif expérimental consacré à l'étude de la convection naturelle en canal vertical dans l'eau. Il décrit ce banc d'essais en détail, de sa conception à sa réalisation et son instrumentation.

Une première partie a montré comment ce banc a été conçu et dimensionné par similitude par rapport au canal en air présent au laboratoire. Puis, les choix de conception et les évolutions faits pour respecter les conditions aux limites fixées ont été présentés.

Dans un deuxième temps, l'instrumentation mise en place sur cette expérience a été décrite ainsi que le fonctionnement du dispositif tout entier. Les capteurs et les systèmes développés pour fournir les données nécessaires à la compréhension de la problématique sur le couplage entre cinématique et thermique dans notre écoulement de convection ont été présentés. Pour cela un dispositif de mesure de vitesse par LDV a été couplé à une perche avec un micro-thermocouple pour accéder à la vitesse et à la température en tout point de l'écoulement.

Ce chapitre a aussi été l'occasion de présenter les différents problèmes rencontrés lors de la mise en place et lors du fonctionnement de ce banc. Les principaux ont été les fuites au niveau des blocs parois, qui ont créé plusieurs périodes d'arrêt; et les problèmes au niveau du système de LDV qui ont limité les taux d'acquisition sur la mesure de vitesse.

 $\label{eq:cette} Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0093/these.pdf @ [C. Daverat], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés$

 $\label{eq:cette} Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0093/these.pdf @ [C. Daverat], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés$

On ne devrait pas chercher à savoir pourquoi les écoulements sont turbulents, mais plutôt pourquoi ils peuvent encore être laminaires ; la science vise à interpréter l'ordre dans la nature, pas le désordre. David J. Tritton

 $\label{eq:cette} Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0093/these.pdf @ [C. Daverat], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés$