

10<sup>èmes</sup> JOURNÉES DE L'HYDRODYNAMIQUE

Nantes, 7, 8 et 9 mars 2005

## **Structures alvéolaires et homogénéisation d'écoulement**

### ***Reduction of turbulence by honeycombs***

**G. Germain<sup>\*</sup>, C. Candelier<sup>\*\*</sup>, S. Blarel<sup>\*</sup>**

<sup>\*</sup> IFREMER, Centre Manche-Mer du Nord, 150 quai Gambetta, BP 699,  
62321 Boulogne-sur-mer, ggermain@ifremer.fr

<sup>\*\*</sup> SAIPEM SA, 1/7 Avenue San Fernando, 78882 Saint Quentin en Yvelines Cedex,  
christophe.candelier@saipem-sa.com

### **Résumé**

Dans ce travail, l'influence du nid d'abeilles sur la tranquillisation et l'homogénéisation d'écoulement est étudiée numériquement et expérimentalement. Nous considérons pour cela des structures alvéolaires dont nous faisons varier les caractéristiques générales (diamètre, épaisseur, longueur). Nous nous attachons ainsi à mettre en évidence l'influence des différents paramètres caractéristiques de la structure sur son fonctionnement global et évaluons son efficacité en terme de réduction du taux et d'échelle de turbulence sur l'écoulement rencontré.

### **Summary**

This paper describes a numerical and experimental studied for the evaluation of the influence of honeycombs on the reduction of turbulence. To assess the evolution of the turbulence through these meshes, we vary the general characteristics of the honeycombs (length, diameter, thickness...). The influence of the structural parameters on the flow are also highlighted. Moreover allow the different calculations evaluating their effectivenesses in term of reduction of rate and scale of turbulence. The calculations are carried out using a CFD code and experimental results are obtained using Laser Doppler Velocimetry and Particle Image Velocimetry..

## 1. Introduction

Les essais expérimentaux, qu'ils soient effectués en soufflerie ou en veine hydrodynamique, nécessitent des conditions optimales de travail, que ce soit en terme d'homogénéité d'écoulement ou de niveau de turbulence. En effet, qualité de mesures, précision, répétitivité dépendent fortement de ces différentes caractéristiques.

Un des moyens pour obtenir un écoulement propre et homogène est d'introduire en amont de la section utile de la veine d'essais un ou plusieurs éléments de tranquillisation et d'homogénéisation d'écoulement, que ce soit grilles, nids d'abeilles et/ou convergents [1], [2]. Si de tels dispositifs sont couramment utilisés, leur implantation n'est pas toujours possible (notamment pour les convergents dont l'encombrement est important [3]) et leurs fonctionnement reste mal connu, principalement pour les nids d'abeilles [4].

Afin de parfaire nos connaissances de l'influence de ce type de structures sur les écoulements auxquelles elles sont soumises, on étudie numériquement et expérimentalement leurs comportements face à diverses catégories d'écoulements. Pour ce faire, le fonctionnement de nids d'abeilles à mailles carrées, hexagonales, de longueur plus ou moins importante, de diamètre hydraulique et épaisseur variables est simulé numériquement à l'aide du code de CFD Fluent. Ainsi, l'influence des principaux paramètres caractérisant la structure est analysée et les résultats obtenus comparés et validés par des données expérimentales (principalement des champs PIV, Particule Image Velocimetry, et des profils de vitesses déterminés par vélocimétrie laser doppler, LDV). L'ensemble des résultats expérimentaux sont issus d'essais réalisés dans la veine d'essais hydrodynamique de l'Ifremer à Boulogne-sur-Mer. Ces essais ont été effectués sur deux types de maquette : une maquette de nid d'abeilles à mailles carrées et à mailles hexagonales de diamètre hydraulique et épaisseur plus faible.

Dans un premier temps, nous présenterons les outils numériques et expérimentaux utilisés pour ce travail. Plusieurs configurations seront ensuite étudiées en faisant varier la valeur des paramètres caractéristiques d'un nid d'abeilles soumis à différents types d'écoulement. On s'attachera particulièrement à valider, dès que possible, les résultats numériques dans le but de limiter les essais expérimentaux et ainsi apporter des éléments de réponse pour la conception et/ou l'amélioration de veine d'essais hydrodynamique, dont le taux naturel de turbulence (i.e. sans dispositifs de tranquillisation particulier) peut atteindre 20 % [5].

## 2. Moyens d'étude

### 2.1. Modélisation numérique du système

Nous avons choisi d'étudier le fonctionnement d'un nid d'abeilles à travers l'analyse de l'influence des paramètres caractérisant de telles structures sur différents écoulements. Ces paramètres sont principalement : a/ le diamètre des cellules (d), b/ l'épaisseur des parois (e), c/ la largeur de la structure (L). L'influence de la structure sur différents écoulements sera étudiée à partir des trois types d'écoulement suivants :

- un écoulement unidirectionnel ( $V_x \in [0,2 ; 1 \text{ m/s}]$  et  $V_y = V_z = 0$ ) comportant un taux de turbulence de 10 à 20 % (type 1);
- un écoulement incident désaxé de l'ordre de  $15^\circ$  ( $V_x = 0,38 \text{ m/s}$ ,  $V_y = 0,1 \text{ m/s}$  et  $V_z = 0$ ) comportant un taux de turbulence de 10 % (type 2);

- un écoulement rotationnel suivant l'axe principal de la structure considérée de 3,5 rad/s ( $V_X = 1$  m/s) comportant un taux de turbulence de 20 % (type 3).

L'étude numérique est réalisée sous Fluent 3D, version 6.1.22. Les maillages des structures considérées, comportant environ un million de mailles, possèdent tous les mêmes caractéristiques : maillage structuré, largeur de maille de 1,5 mm, resserrement proche des parois (suivant les axes transversaux) et des changements de milieux (suivant l'axe longitudinal de la structure),  $Y_+ \in [25; 60]$ ... L'influence du maillage de la structure et du choix des modèles de résolution numérique (ordre de résolution, modèle de turbulence, conditions aux limites...) ne seront pas présentés ici, mais ont été étudiés dans [5]. Les résultats présentés dans la partie suivante ont été obtenus après convergence de simulations réalisées en RSM (Reynolds Stress Model) au 2<sup>e</sup> ordre.

## 2.2. Moyens expérimentaux

Dans la partie 3, l'ensemble des résultats numériques sera confronté, de manière à être validé, à des résultats expérimentaux obtenus sur une maquette de nid d'abeilles à mailles carrées de 48 mm de côté pour une épaisseur de 6 mm (largeur du nid : 500 mm). Cette maquette est placée dans la veine à circulation et surface libre de l'IFRMER à Boulogne-sur-Mer (voir figure 1).

Ce moyen d'essais présente une section utile de  $4 \times 2$  m<sup>2</sup>. L'écoulement généré présente une turbulence inférieure à 5 % dans la gamme de vitesse considérée [ $0,1 ; 2,2$  m.s<sup>-1</sup>] et des vitesses transverses inférieures à 1% de la vitesse axiale lorsque les nids d'abeilles actuels du bassin sont en place (le taux de turbulence peut atteindre 20 à 30 % lorsque le nid d'abeilles supérieur de la veine est retiré). Durant cette étude, nous travaillons dans un repère lié au bassin, dont l'axe X correspond à l'axe principal de la veine, l'axe Y à l'axe vertical (sens positif vers la surface) et un axe Z transversal de manière à obtenir un repère orthonormé direct (représenté figure 2).

Le nombre de Reynolds, basé sur la vitesse moyenne de la veine et sur le diamètre des cellules varient au cours de l'étude entre  $Re = 1,5 \cdot 10^4$  et  $Re = 1,5 \cdot 10^5$ .

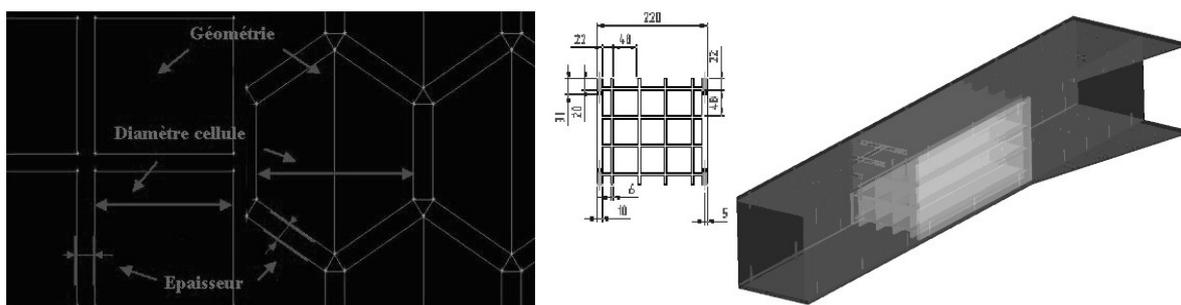


Figure 1 : Présentation de la maquette (paramètres caractéristiques: géométrie, épaisseur...)

Les comparaisons seront principalement effectuées à partir de mesures effectuées à l'aide d'un vélocimètre laser Doppler à deux composantes (LDV) et de plans PIV. Ces deux systèmes de mesure optique permettent de caractériser, de manière non-intrusive, l'écoulement selon deux approches complémentaires : l'une étant ponctuelle et la seconde beaucoup plus globale.

En effet, le système LDV permet de mesurer précisément la moyenne et les fluctuations de chaque composante de vitesse de l'écoulement, permettant ainsi de calculer les paramètres de turbulence. Le système de déplacement de la sonde laser est un système de déplacement trois axes, avec une précision de mouvement inférieure au dixième de millimètre. Son volume de mesure est de 2,5 mm dans la direction du profil (suivant l'axe Y) et de 0,1 mm dans une direction normale à cette dernière. L'écoulement estensemencé de bille de verre d'un diamètre moyen de 15  $\mu\text{m}$ . Les résultats de mesures, réalisées selon différents profils répartis le long de la maquette, sont obtenus pour des vitesses moyennes de veine variant entre 0,2 et 1  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ . La focale de la sonde laser est de 400 mm dans l'air. Les composantes de vitesses mesurées sur l'ensemble des profils sont :

- la composante axiale (suivant l'axe X), notée U ;
- la composante transverse (suivant Z), notée V.

La dépendance du nombre de données enregistrées pendant un intervalle fixé par rapport aux conditions locales de mesures est une des particularités des systèmes de vélocimétrie laser [5]. En effet, les mesures étant basée sur la détection des particules traversant le volume de mesure du système LDV, il existe des régions (zones où l'écoulement est propre) où les mesures effectuées comportent un taux d'acquisition élevé (supérieur à 50 Hz) et des régions (proches des parois ou dans les zones turbulentes) où les taux d'acquisition atteignent des valeurs très basses (inférieures à 10 Hz). De manière à obtenir des séries de données aussi homogènes que possible, nous avons utilisé une technique de mesure basée sur les temps d'acquisition plutôt que sur le nombre de particules détectées. Nous obtenons ainsi, pour des temps d'acquisition de l'ordre de 100 secondes et un nombre de données n'excédant pas 5000 (c'est-à-dire une fenêtre de temps dont l'ordre de grandeur est supérieure à celui de l'échelle de temps des fluctuations de l'écoulement), une estimation précise des différentes caractéristiques de l'écoulement, aussi bien sur les vitesses que sur les intensités de turbulence. Par la suite, les intensités de turbulence, notées  $\sigma$ , seront calculées à partir de la moyenne des fluctuations de vitesses adimensionnée par la vitesse d'entrée :

$$\sigma = \frac{\langle (U(t) - \langle U(t) \rangle)^2 \rangle}{\langle (U_0(t))^2 \rangle} \quad (\text{où } \langle \rangle \text{ désigne la moyenne temporelle}).$$

Le système PIV utilisé est, quant à lui, constitué d'un laser double cavité Nid-Yag 2 x 120 mJ à 15 Hz, d'une caméra Hi-sense 1280 x 1024 pixels<sup>2</sup> et d'un objectif de 60 mm de focale, muni d'un filtre de 3nm de longueur d'onde. La sonde laser utilisée permet de créer des nappes verticales ou horizontales en aval de la zone étudiée (figure 2). Les traitements d'images sont effectués à partir du logiciel FlowMap 1500 de la société Dantec Dynamics, par inter-corrélation d'images sur des zones pouvant être réduites à 32 x 32 pixels<sup>2</sup>, avec des taux de recouvrement de 25%. Ce moyen de mesure permet par conséquent d'obtenir des informations globales, instantanées ou moyennées, sur des zones plus ou moins grandes (ici typiquement de taille : 160 x 160 mm<sup>2</sup>). Ainsi, on peut avoir accès à des informations sur les propriétés spatiales de l'écoulement tels la vorticité, les lignes de courant.

Des mesures de pression ont également été r alis es dans le but d'obtenir les pertes de charges engendr es par la structure. Ces mesures ont été effectu es   l'aide de tube de Pitot. Une prise de pression en amont et une en aval de la structure ont permis de mesurer respectivement la pression dynamique en amont du nid d'abeilles, ainsi que la perte de charge

engendrée par la présence du nid. Les pertes de charge de la structure ( $\Delta P$ ) ont également été déterminées à partir des mesures LDV suivant l'expression :

$$\Delta P = \frac{1}{2} \rho (U_{\text{aval}}^2 - U_{\text{amont}}^2), \quad \rho \text{ étant la masse volumique de l'eau.}$$

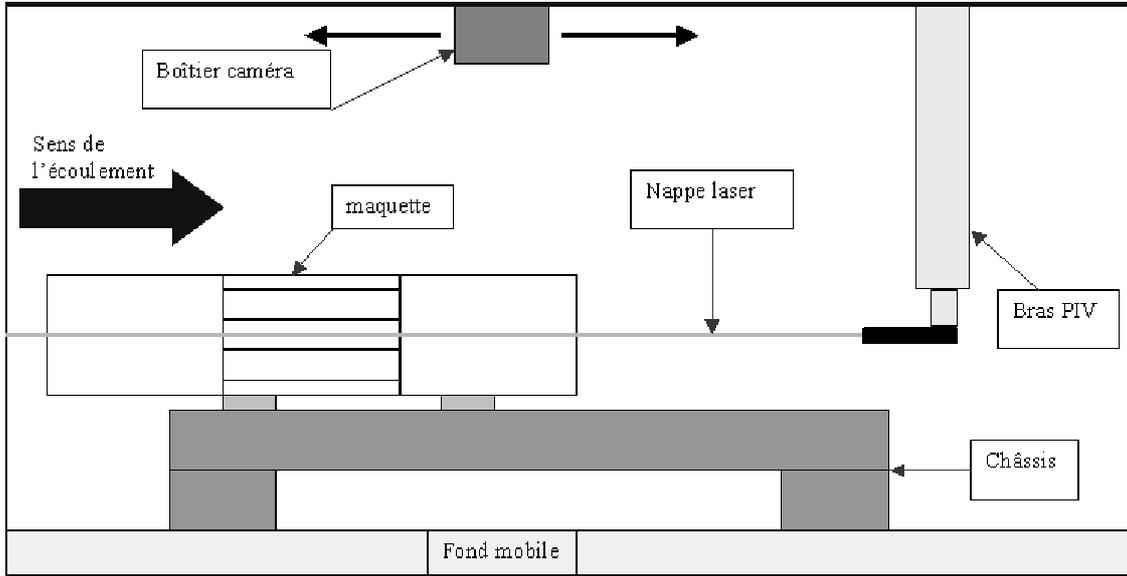


Figure 2 : Schématisation de l'étude expérimentale

### 3. Caractérisation du fonctionnement d'un nid d'abeilles

Avant toute étude de l'écoulement au travers d'un nid d'abeille, il nous a semblé important de vérifier le comportement global du système, qu'il soit modélisé expérimentalement ou numériquement. Cette première approche est réalisée à partir d'une confrontation sur les pertes de charges du système, qu'elles soient déterminées par mesures directes (à l'aide de tube de Pitot), extrapolées des mesures LDV, issues de simulations numériques ou de façon théorique. En effet, pour des structures alvéolaires, les pertes de charges vérifient la relation suivante [6] :

$$\Delta P = \frac{1}{2} \rho \xi U_{\text{pores}}^2$$

où  $\rho$  et  $U_{\text{pores}}$  sont respectivement la masse volumique de l'eau et la vitesse de l'écoulement dans les alvéoles. Pour des nombres de Reynolds inférieurs à  $10^5$ , le coefficient de perte de charge de l'obstacle  $\xi$ , est défini comme suit :

$$\xi = \left( \xi_{\varphi} + \varepsilon_0^{-\text{Re}} \xi_0 + \lambda \frac{l}{d_h} \right),$$

avec  $\lambda = 0.3164 R_e^{-1/4}$  le coefficient de perte de charge par frottement,  $\xi_{\varphi} = 0$ ,  $\varepsilon_0^{-\text{Re}} = f(\text{Re})$

( $\text{Re} = \frac{\rho V_{\text{pores}} d_h}{\mu}$ ), et  $\xi_0 = 0,5(1 - \phi) + (1 - \phi)^2$ ,  $\phi$  étant la porosité de la structure.

Aux vues des résultats reportés figure 3, on note une très bonne concordance sur les pertes de charges obtenues à partir des différentes approches, même si les mesures effectuées à l'aide des tubes de Pitot présentent un degré de précision modeste. En effet, pour les niveaux de pressions considérés, la moindre perturbation du circuit hydraulique de mesure et les variations de surface libre que peut présenter la veine d'essais sont autant de sources perturbatrices pour ce type de mesure.

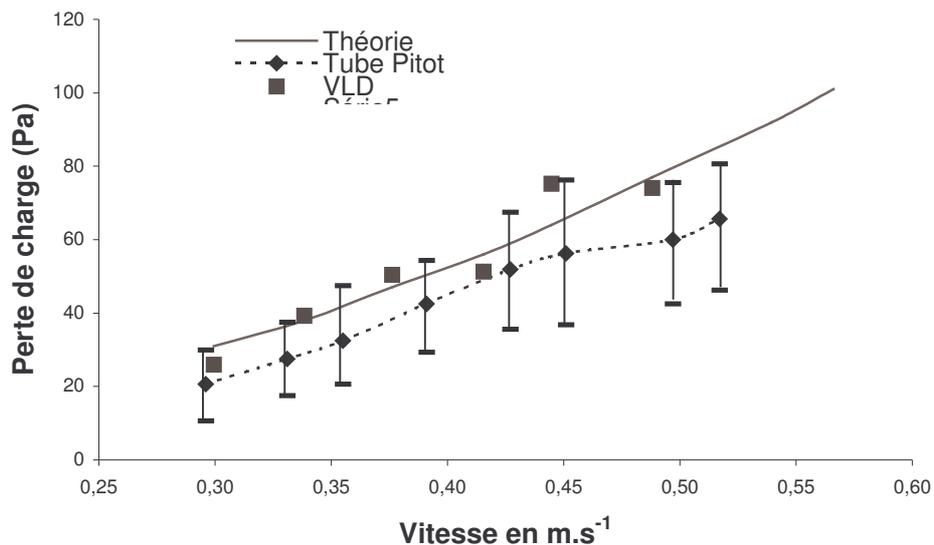


Figure 3 : Evolution des pertes de charge engendrées par un nid d'abeilles

Le comportement global du système considéré étant correctement représenté par les différentes méthodes, nous nous efforcerons dans la suite de ce travail à mettre en évidence l'influence des principaux paramètres caractéristiques du système sur la tranquillisation et l'homogénéisation de l'écoulement considéré. De manière à valider les résultats issus des simulations numériques, l'ensemble des profils de vitesse obtenus sur divers cas de référence est confronté à des résultats expérimentaux (mesures LDV et/ou PIV). Comme le montre les figure 4 et 5, où on a représenté respectivement l'évolution des vitesses axiales suivant l'axe principal de la structure et sur une section transversale à 155 mm en aval du nid d'abeilles (nid à maille carré de porosité  $\phi = 0,89$  et une vitesse d'entrée de  $0,4 \text{ m.s}^{-1}$ ), il existe une très bonne concordance sur la détermination des vitesses axiales, qu'elle soit effectuée numériquement ou expérimentalement.

Ainsi, nous pouvons étudier l'influence sur le redressement et l'homogénéisation des écoulements considérés de :

- la longueur de la structure,  $L \in [0,25 ; 1 \text{ m}]$  ;
- la porosité,  $\phi \in [0,65 ; 0,98]$  , pour des épaisseurs  $e \in [0,5 ; 6 \text{ mm}]$  ;
- la géométrie des alvéoles, cellules carrées et hexagonales, de diamètre  $\in [19 ; 50 \text{ mm}]$  .

L'efficacité d'un nid d'abeilles peut être déterminé à l'aide de l'analyse des champs de vitesses obtenus numériquement et/ou expérimentalement. Un exemple de ce type de résultats est donné figure 6, où on peut comparer deux champs de vitesses en sortie d'un nid d'abeille à maille carrée, l'un issu d'une simulation numérique (à droite) et l'autre de mesures PIV (à gauche). On distingue dans chacun des cas le sillage des parois constituant la structure et l'homogénéisation qui se produit naturellement en aval du nid d'abeilles.

Les taux de redressement de chacune des structures sont calculés à partir des vitesses transversales déterminées en amont et en aval du nid d'abeilles considéré. Les différents résultats obtenus (par exemple figure 7) montrent que pour une longueur importante de structure ou des porosité élevées ( $\phi > 0,92$ ) les composantes rotationnelles d'un écoulement rencontrant un nid d'abeilles sont fortement atténuées au passage de la structure (dans un rapport de 2 à 4).

Les variations du taux de turbulence présent dans l'écoulement peuvent être analysées à partir de champs de vorticité expérimentaux obtenus par PIV et des structures tourbillonnaires rencontrées (analyse conjointe des lignes de courants et des champs de vorticité). En effet, grâce aux différentes caractéristiques de la maquette utilisée, on peut visualiser la réduction de l'échelle de turbulence au passage du nid d'abeilles car des plans PIV ont pu être réalisés et exploités à l'intérieur des canaux constituant la structure (figure 8). Ainsi, pour un écoulement incident présentant un taux de turbulence de l'ordre de 20% et des structures tourbillonnaires supérieures à 4 cm, la présence d'un nid d'abeille réduit de façon non négligeable l'échelle de turbulence (présence de cellules de l'ordre de 1 cm en aval de la structure), pour un taux de turbulence inférieure à 5%. Et ce d'autant plus que le nid d'abeilles comporte des cellules de faible diamètre et faible épaisseur (figure 9), dans la limite d'une perte de charge admissible pour l'installation accueillant le dispositif d'homogénéisation et de tranquillisation de l'écoulement.

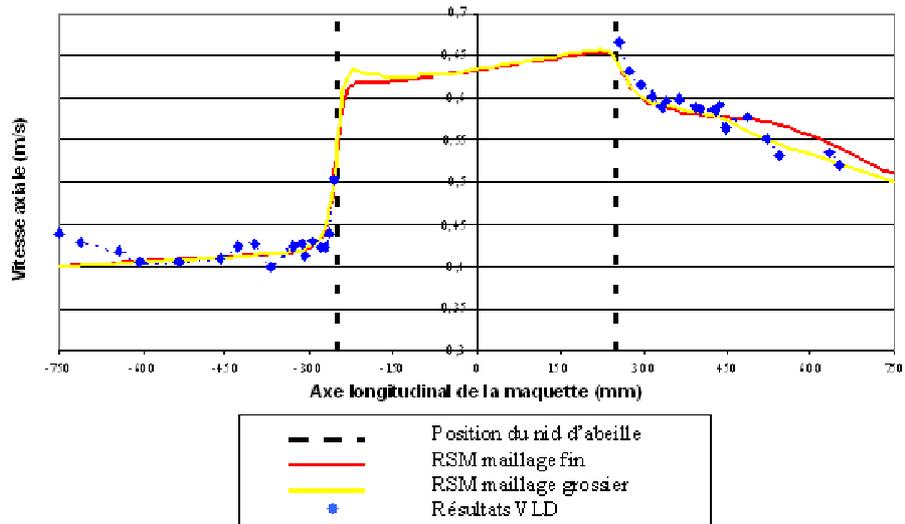


Figure 4 : Comparaison des vitesses axiales le long d'un nid d'abeilles

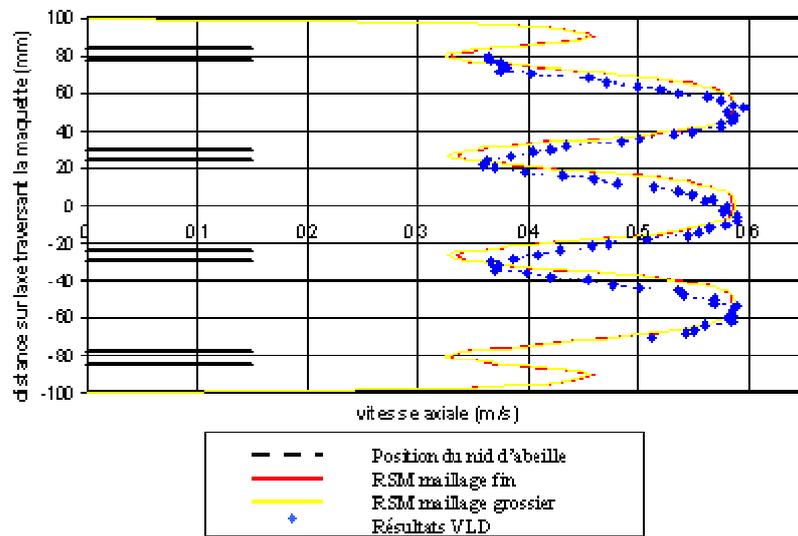


Figure 5 : Comparaison des vitesses axiales à 150mm en aval de la structure

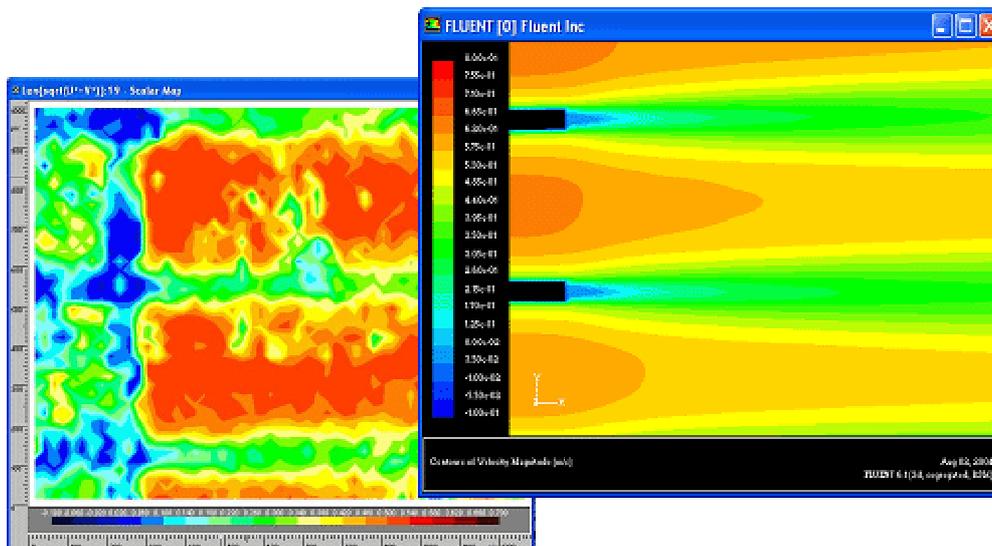
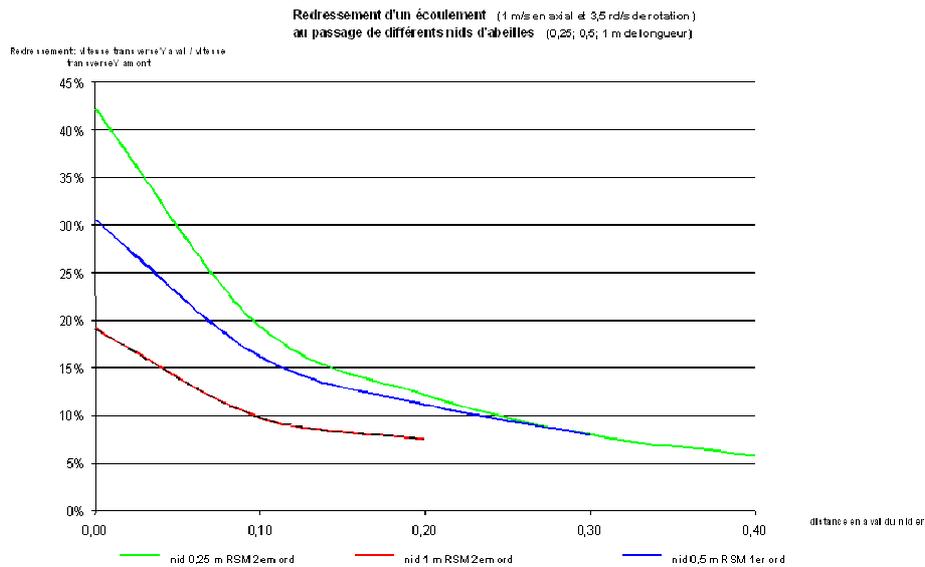
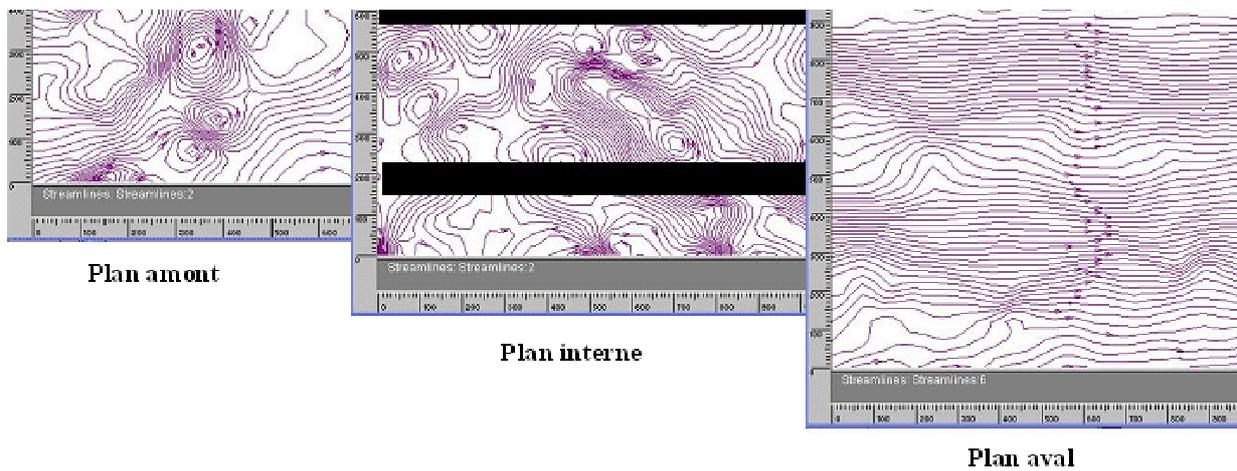


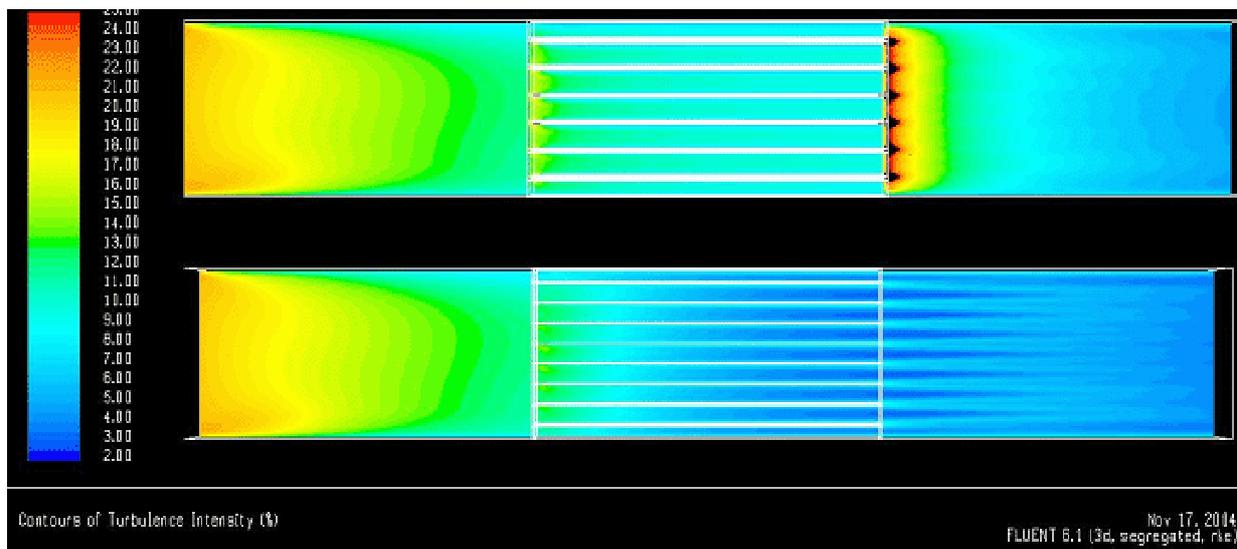
Figure 6 : Comparaison des champs de vitesses PIV et CFD à la sortie du nid



**Figure 7 : Evolution du redressement en fonction de la longueur d'un nid d'abeilles**



**Figure 8 : Lignes de courant au passage de la structure**



**Figure 9 : Comparaison des intensités de turbulence pour un nid d'abeille de porosité 0,89 (en haut) et 0,96 (en bas), pour un écoulement incident du type 3**

## 4. Conclusion

Différentes modélisations numériques simulant le fonctionnement de nid d'abeilles ont été validées à partir de résultats expérimentaux, ce qui nous a permis d'analyser de façon systématique le fonctionnement de structures alvéolaires. La complexité des phénomènes en présence a nécessité une étude approfondie de l'influence des différents paramètres caractéristiques du système. Ainsi, plusieurs recommandations pour le dimensionnement d'un nid d'abeilles répondant à un cahier des charges précis (gamme de vitesses escomptée dans la section utile de la veine, encombrement de la structure...) peuvent être établies. Par conséquent, longueur et porosité minimales de structure peuvent être déterminées, géométrie et épaisseur de cellules recommandées...

L'étude présentée ici ne permettant pas d'analyser précisément l'influence d'un nid d'abeilles sur l'évolution de la turbulence de l'écoulement rencontré, il est envisagé de compléter le travail présenté ci-dessus par l'étude (numérique et expérimentale) du comportement de ce type de structure face à un écoulement turbulent parfaitement maîtrisé (génération de structures tourbillonnaires de diamètre supérieur au diamètre des cellules considérées).

## Références

- [1] J. Scheiman, J.D. Brooks, Comparison of experimental and theoretical turbulence reduction from screens, honeycombs and honeycomb-screen combinations, Journal of Aircraft, 1981;
- [2] M. Raddaoui, R. Schiestel, M-P. Chauve, Le mélanges d'échelles en écoulement turbulent non-cisaillé, C. R. Acad. Sci. Paris, 2000 ;
- [3] H.L. Dryden, Reduction of turbulence in wind tunnels, Report N° 392 1931 ;
- [4] J.L. Lumley, J.F. Mc Mahon, Reducing water tunnel turbulence by means of honeycombs, ASME Journal of basic engineering, 1967;
- [5] G. Germain, S. Blarel, Etude d'une veine d'essais hydrodynamique à surface libre, 7<sup>e</sup> rencontres Fluent, Octobre 2003 ;
- [5] C. Candelier, Etude et dimensionnement d'un nid d'abeilles, Rapport de stage, 2004 ;
- [6] I. E. Idel'cik, Mémento des pertes de charges, 1969.