

## 6e JOURNÉES DE L'HYDRODYNAMIQUE

24, 25, 26 février 1997 - Nantes

### ETUDE NUMERIQUE ET EXPERIMENTALE DE L'ECOULEMENT GUIDE PAR UNE PAROI PERMEABLE AXISYMETRIQUE.

Benoît VINCENT - IFREMER DIT/NPA  
8, rue François Toullec 56100 LORIENT tel: 97 87 73 13 fax: 97 83 41 06  
Dominique MARICHAL - Ecole Centrale Nantes LMF DHN

#### Résumé:

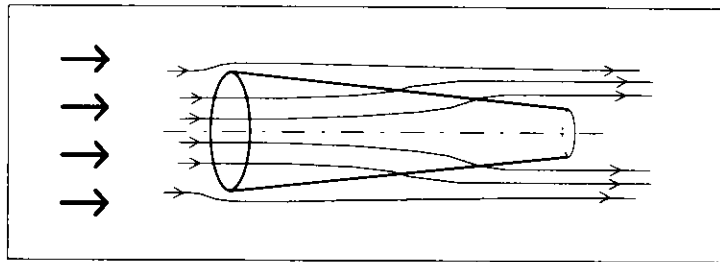
Nous étudions par une approche numérique et expérimentale, l'écoulement interne, externe et au travers d'une paroi perméable. Sa forme est de révolution et son axe est placé parallèlement au courant. La paroi est supposée continue et mince mais perméable. L'écoulement qui la traverse est modélisé par une équation du type perte de charge. Une seconde équation relie la vitesse tangentielle au cisaillement visqueux et turbulent de part et d'autre de la paroi. Par ailleurs, les équations qui régissent l'écoulement dans le domaine fluide sont les équations de Navier-Stokes en écoulement incompressible. Nous utilisons le modèle de turbulence classique K- $\epsilon$ , raccordé à la paroi avec des conditions spécifiques. La deuxième partie de ce travail est une étude expérimentale sur maquettes, menée en bassin de circulation et en soufflerie. La comparaison des vitesses calculées et mesurées montre la validité des modèles retenus.

#### Abstract:

By a numerical and an experimental approach, we study the flow internal, external and through the permeable surface of a net. This surface is revolution shaped and its axis is parallel to the stream. The surface is supposed to be thin and continuous but permeable. Flow modelling through the permeable wall is a loss of pressure equation. A second equation links the tangential speed at the wall to the viscous and turbulent shear stress of each side of the wall. Equations in the fluid media are incompressible Navier-Stokes equations. Turbulent modelling is the classical K- $\epsilon$  model, linked to the wall with specific conditions. Second part of that work is an experimental study, in a flum tank and in a wind tunnel with models. Comparison between computed and mesured speeds shows the validity of our numerical method.

## 1. Introduction

Nous présentons dans cette étude originale<sup>1</sup>, le problème d'un corps de forme axisymétrique à paroi perméable mince. La partie amont de ce corps est ouverte et la sortie peut être ouverte ou fermée. Il est placé dans un courant uniforme de telle façon que son axe de révolution est parallèle à la vitesse incidente. Sa paroi délimite donc un écoulement interne et un écoulement externe au corps. La perméabilité permet l'établissement d'un écoulement au travers de la paroi. Ces écoulements sont représentés de manière schématisée par les lignes de courant ci-dessous. Nous présentons, par exemple sur ce dessin le cas d'une surface perméable tronconique placée dans un courant.



On pressent, à la vue de ce dernier schéma, que deux effets principaux influencent l'écoulement à la paroi perméable:

- Les effets de forme de la paroi perméable. Ceux-ci seraient à l'origine de l'établissement d'un écoulement au travers de la paroi dans le cas d'un fluide parfait. Il s'agirait d'un écoulement "intermédiaire" entre l'écoulement uniforme traversant une paroi infiniment perméable et l'écoulement dans un "entonnoir" formé d'une paroi étanche.
- Les effets visqueux à la paroi perméable. En l'absence d'effets de forme (dans le cas d'un cylindre à section circulaire par exemple), on peut supposer que le ralentissement de l'écoulement interne, par frottement du fluide sur la paroi, provoque l'échappement d'une partie du fluide au travers de la paroi.

Le cas particulier du cylindre circulaire ouvert à ses deux extrémités illustre bien les phénomènes visqueux mis en jeu. Les contraintes visqueuses qui s'exercent sur le fluide à proximité de la paroi perméable entraînent le développement de la couche limite interne (et externe). Ceci provoque un "blocage" de l'écoulement à l'intérieur du tube. Il en résulte qu'une partie du fluide interne s'échappe à l'extérieur en traversant la paroi. Cela a aussi pour conséquence le contournement d'une partie du fluide en amont du tube qui serait donc entré en l'absence de blocage ou dans le cas d'un fluide parfait (figure 1). Nous pouvons donc observer une diminution de débit interne entre l'entrée et la sortie du tube.

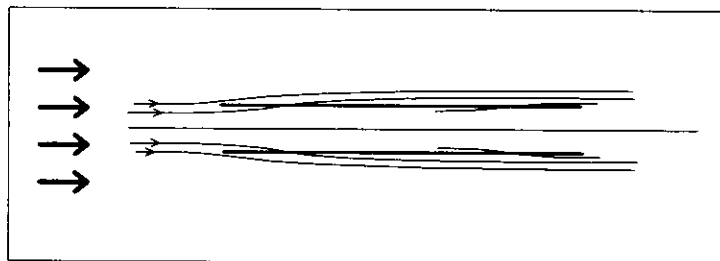


Figure 1  
Cas particulier du cylindre circulaire.

Nous proposons ici une modélisation de ce type d'écoulements dans le cas général, c'est-à-dire pour un obstacle à géométrie axisymétrique quelconque. L'objectif de l'étude est donc de calculer les champs de vitesse et de pression dans l'écoulement. Celui-ci est supposé permanent et axisymétrique en moyenne.

<sup>1</sup> Ces travaux de recherche s'inscrivent dans un projet global d'amélioration de la sélectivité des engins de pêche du type chalut (i.e. leur aptitude à laisser s'échapper les poissons juvéniles). La présente étude sera appliquée à la modélisation des chaluts.

## 2. Etude numérique

### 2.1 Mise en équations du problème

#### 2.1.1 Réduction du domaine physique

La symétrie de révolution du problème et l'absence de composante orthoradiale de vitesse permet de ramener le problème réel tridimensionnel à un problème plan. Nous nous limitons de plus à la résolution des équations dans un demi-plan limité par l'axe de révolution (figure 2).

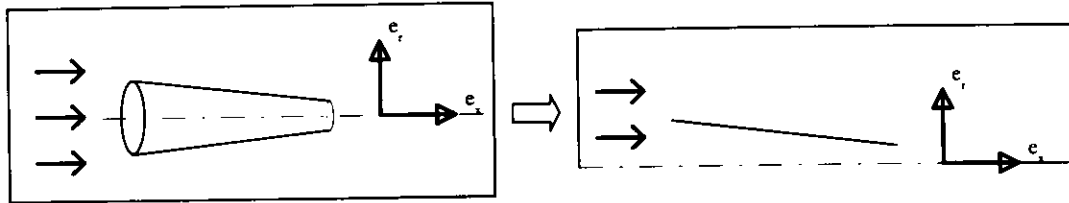


Figure 2

Réduction du domaine physique. Base cylindrique. ( $\vec{e}_x, \vec{e}_r$ ).

#### 2.1.2 Equations générales dans le domaine fluide

L'écoulement à travers les mailles est en partie dû aux effets de viscosité et de turbulence. D'autre part, les remarques faites dans l'introduction sur les effets de forme et les effets visqueux en particulier, nous autorisent à écarter dès à présent les formulations fondées sur des théories de fluide parfait. Nous écrivons donc, dans les coordonnées cylindriques, les équations de Navier-Stokes pour un écoulement de fluide incompressible:

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} + u\nabla u + \nabla p - \nu\Delta u = 0 \\ \nabla \cdot u = 0 \end{cases}$$

où figurent l'équation vectorielle de transport de quantité de mouvement et la contrainte de continuité. L'écoulement étudié est permanent en moyenne mais nous conservons le terme instationnaire par commodité numérique: la convergence vers un état permanent est obtenue par itérations successives sur le temps.

#### 2.1.3 Ecoulement à la paroi perméable

##### 2.1.3.1 Caractérisation de la paroi perméable

La surface dont nous cherchons à modéliser l'influence sur l'écoulement est une alèse de filet. Celle-ci est constituée de fils et de noeuds, formant des mailles. Sa caractéristique principale vis-à-vis de l'écoulement est sa porosité. Cette dernière est définie par le rapport de la surface "vide" à la surface totale d'une cellule périodique du matériau, comme l'illustre la figure 3.

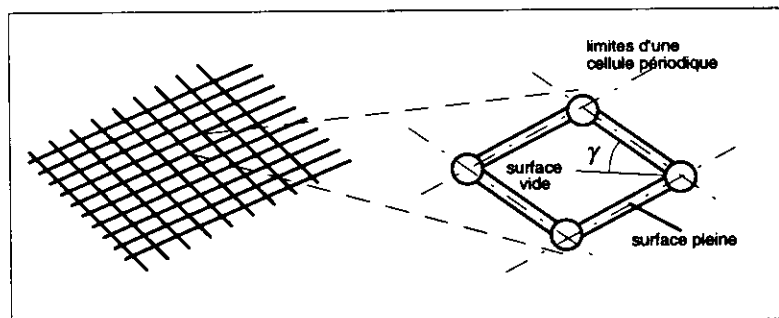


Figure 3

Nappe de filet, vue d'une maille.

Les moyens de calcul disponibles aujourd'hui ne permettraient pas de résoudre un écoulement visqueux de ce type à l'échelle des fils et des noeuds constituant la paroi perméable. C'est pourquoi nous sommes amenés à formuler l'hypothèse suivante:

**La paroi est considérée homogène et sans épaisseur, mais perméable.**

La spécificité de notre problème réside dans l'existence de cette paroi perméable qui délimite un écoulement à la fois interne et externe et qui, de plus, est le lieu d'un transfert de masse. La paroi est caractérisée par:

- une porosité  $\lambda$  pouvant varier de 0 à 1. Dans nos applications  $\lambda$  est souvent proche de l'unité
- une rugosité du fait des discontinuités et des irrégularités du matériau (fils, noeuds, "vides")

Ces caractéristiques, en particulier l'importance des vides à la paroi, nous permettent de supposer qu'il n'y a pas de sous-couche visqueuse à proximité de celle-ci. L'écoulement, quant à lui, est caractérisé par:

- un glissement plus ou moins important du fluide à la paroi (qui dépend de  $\lambda$ )
- un transfert de masse à travers la paroi, généralement de l'intérieur vers l'extérieur

Nous sommes donc confrontés à un problème peu classique. Le modèle d'écoulement à la paroi doit nous donner des relations générales qui, couplées aux autres inconnues du problème, nous permettront de calculer la vitesse à la paroi et éventuellement les valeurs limites ou sources du modèle de turbulence.

### 2.1.3.2 Modèle retenu pour la vitesse normale à la paroi

Lorsqu'on étudie un écoulement dans un milieu poreux, on considère habituellement que l'on peut relier la chute de pression au passage du matériau poreux à la vitesse de l'écoulement. Cette chute de pression correspond à la dégradation en chaleur d'une partie de l'énergie mécanique de l'écoulement. Nous considérons que les effets visqueux sont prédominants. Aussi, nous retenons l'équation linéaire de Darcy:

$$\frac{B_0 \Delta p}{\mu e} = U \quad (1)$$

$B_0$  représente la perméabilité du matériau et  $e$  l'épaisseur du matériau correspondant à la chute  $\Delta p$ . Enfin, le coefficient  $\alpha = \frac{B_0}{e}$  sera supposé ne dépendre que la géométrie de la paroi.

### 2.1.3.3 Modèle retenu pour la vitesse tangentielle

Nous sommes amenés à utiliser une loi intermédiaire entre une loi d'adhérence du fluide sur une surface solide et une loi de glissement à la paroi. En effet, nous distinguons deux phénomènes:

- Le fluide adhère sur les surfaces solides de la paroi perméable (fils, noeuds) et cause ainsi le ralentissement de l'écoulement.
- Le fluide dans les parties "vides" des mailles est entraîné par cisaillement par le fluide à l'extérieur ou réciproquement.

Nous choisissons donc une loi mixte, la loi de Shaffman (1971). Cette condition est intermédiaire entre l'adhérence et le glissement à la paroi, par l'intermédiaire d'un coefficient  $B$ . Elle suppose la proportionnalité entre le taux de cisaillement et la vitesse de glissement de l'écoulement. Cette loi s'écrit:

$$U_t = B \frac{\partial U_t}{\partial n}$$

La condition d'adhérence est obtenue lorsque  $B$  tend vers 0 et la condition de glissement lorsque  $B$  tend vers l'infini.

En présence d'un écoulement turbulent agissant de part et d'autre de la paroi pour entraîner le fluide à la paroi, nous choisissons de réécrire cette relation comme suit:

$$U_t = \tilde{\beta} \frac{\tau_{\text{eff}}^+ + \tau_{\text{eff}}^-}{\rho U_\infty} \quad \text{où} \quad \tau_{\text{eff}} = (\mu + \mu_t) \frac{\partial U_t}{\partial n} \quad (2)$$

où figurent les frottements efficaces (somme des frottements dynamiques et turbulents) sur la face interne (+) et la face externe (-) de la paroi. Le coefficient  $\tilde{\beta}$  dépend essentiellement de la géométrie et de la nature de la paroi, en particulier de sa porosité.

### 2.1.3.4 Modification de l'équation de vitesse à la paroi

Les lois normales et tangentielles de vitesse pourraient être imposées à la paroi sous forme de conditions aux limites classiques. Cependant, cela complique la programmation par l'obligation de traiter des cas particuliers et pose des problèmes numériques lors de la résolution.

On cherche donc plutôt à conserver une structure unique aux équations de vitesse (équation de transport de quantité de mouvement et équation de vitesse à la paroi). Cette idée est fondée sur la décomposition de Rhie & Chow des équations de vitesse. En effet, pour former l'équation de pression, les équations de vitesse seront réécrites de façon à séparer l'influence de la pression, par l'intermédiaire de son gradient, des autres termes de vitesse. Les équations imposées à la paroi perméable sont donc réécrites sous la forme suivante:

$$\bar{U}_{\text{paroi}} = \bar{U}_n + \bar{U}_t \approx -\bar{K} \bar{\nabla}_p + \beta (\bar{\tau}_{\text{eff}}^+ + \bar{\tau}_{\text{eff}}^-) \quad (3)$$

Ceci constitue donc une petite modification de l'expression de la composante normale de vitesse examinée auparavant. Elle est cependant justifiée puisque le gradient de pression en question est quasiment normal à la paroi. Nous constatons que l'erreur relative à la convergence du processus de calcul, entre les lois (1) et (2) et la loi modifiée (3) est inférieure à 1%, même pour des parois à forte pente.

Nous venons d'introduire les lois modélisant l'écoulement à la paroi perméable. Chacune dépend d'un coefficient de perméabilité qu'il faut identifier pour chaque type d'alèse et pour les différentes ouvertures de maille. L'identification de ces paramètres est l'objet de la partie suivante.

### 2.1.3.5 Identification des coefficients de perméabilité

#### 2.1.3.5.1 Approche numérique

Il semblerait naturel, au premier abord, d'étudier l'écoulement sur une paroi perméable à l'échelle "microscopique". L'échelle microscopique est l'échelle du fil et des noeuds constituant la maille périodique du milieu perméable. Par opposition, l'échelle macroscopique (celle que nous avons retenue) est l'échelle du milieu perméable en entier dans lequel ce dernier est supposé homogène. Les conditions aux limites de l'écoulement microscopique sont alors "simples" puisqu'il s'agit des conditions d'adhérence du fluide à la surface des fils. On déduit alors les caractéristiques de l'écoulement macroscopique à partir de l'étude de l'écoulement microscopique (périodique). Pour ce faire, on distingue les méthodes d'homogénéisation et de prise de moyenne.

Néanmoins, la géométrie du pore caractérisant le milieu microscopique doit rester simple pour des raisons évidentes de coût de calcul. Il serait donc très difficile de prendre en compte exactement la géométrie des mailles d'un filet. Enfin, à notre connaissance, ces techniques sont appliquées uniquement à des écoulements laminaires. Il nous a, par conséquent, semblé préférable d'aborder le problème de l'identification des coefficients de perméabilité par une démarche expérimentale.

### 2.1.3.5.2 Approche expérimentale

La démarche choisie, pour identifier et vérifier les coefficients de perméabilité d'une alèse donnée, est la suivante:

- Nous réalisons tout d'abord une maquette avec cette alèse. Il s'agit d'un tube cylindrique circulaire.
- Les deux coefficients de perméabilité sont déterminés, à partir d'un essai unique, selon la méthode que nous décrivons ci-dessous.
- Enfin, les valeurs obtenues peuvent être utilisées pour comparer les résultats des mesures et des calculs dans d'autres conditions (maquettes de formes différentes mais constituées de la même alèse, moyens d'essai différents: soufflerie, bassin de circulation). On vérifie ainsi la validité du modèle numérique et de l'identification des paramètres.

#### Détermination du coefficient $\tilde{\beta}$

Nous avons deux coefficients de perméabilité à identifier. Le coefficient  $\tilde{\beta}$  intervenant dans la loi de vitesse tangentielle est simple à déterminer puisqu'il est lié à la vitesse tangentielle, qui est mesurable. Pour identifier le coefficient  $\tilde{\beta}$ , nous utilisons la forme inverse de l'équation (2) à la position du tube  $x_0$  où est effectuée la mesure de vitesse.

#### Détermination du coefficient $\alpha$

Nous rencontrons une difficulté pour obtenir une valeur du coefficient  $\alpha$  de la loi de vitesse normale. Il est en effet impossible de mesurer une différence de pression de part et d'autre d'une nappe d'alèse à mailles ouvertes placée dans un courant de faible vitesse. D'une part cet écart de pression a une très faible valeur; d'autre part le champ de pression mesuré serait fortement variable entre le sillage d'un noeud et le centre d'une maille par exemple.

Nous choisissons donc d'identifier le coefficient de la loi normale de vitesse à partir de l'étude globale des résultats expérimentaux. Le coefficient  $\alpha$  d'une alèse donnée est donc déterminé une fois pour toutes par "optimisation" des résultats numériques sur un cas expérimental. La valeur de  $\alpha$  est ajustée, en particulier, par comparaison des vitesses calculées et mesurées dans la section d'entrée des tubes, c'est-à-dire par comparaison de la quantité de fluide contournant l'obstacle.

Ces simulations, permettant d'identifier les coefficients de perméabilité, sont réalisées en régime turbulent. Les coefficients (à la paroi) intervenant dans le modèle de turbulence, qui dépendent aussi de la nature de la paroi perméable, sont examinés ci-dessous.

## 2.1.4 Modèle de turbulence

Dans le souci d'une plus grande généralité, nous retenons le modèle de turbulence K- $\epsilon$  standard, version grand Reynolds turbulent, c'est-à-dire sans correction de paroi.

### 2.1.4.1 Conditions à la paroi perméable pour K

La porosité de la paroi proche de l'unité, la relativement grande longueur des mailles du matériau et sa rugosité nous permettent d'affirmer qu'il n'y a pas de sous-couche visqueuse à l'échelle macroscopique. Par conséquent, il n'y a pas non plus de diminution vers zéro de l'échelle de longueur à l'approche de la paroi. Aussi, nous supposons que le niveau de turbulence n'est pas nul à la paroi.

L'énergie cinétique de la turbulence K à la paroi est prise proportionnelle à  $\overline{u_x u_x} + \overline{u_y u_y} + \overline{u_z u_z}$ . On retrouve cette grandeur dans la définition du taux de turbulence dans la direction x de l'écoulement à la paroi. Ce dernier sera mesuré et servira à définir la valeur de K à la paroi perméable.

### 2.1.4.2 Condition à la paroi perméable pour $\epsilon$

Nous faisons l'hypothèse qu'il existe une zone d'équilibre de la turbulence à la paroi perméable. Ceci permet d'obtenir la condition sur le taux  $\epsilon$  de dissipation de l'énergie cinétique: on écrit que le taux de dissipation est égale au taux de production  $G$ .

## 2.2 Résolution numérique des équations

Nous avons développé un code de résolution des équations de Navier-Stokes bidimensionnelle en régime turbulent, pour un écoulement axisymétrique à paroi perméable. Afin d'adapter les équations à l'espace physique  $(\vec{e}_x, \vec{e}_r)$  de l'écoulement, celles-ci sont tout d'abord transformées dans les coordonnées curvilignes  $(\epsilon^1, \epsilon^2)$ , en utilisant la transformation partielle. Les inconnues de vitesse et de turbulence sont localisées aux noeuds du maillage du domaine. Les inconnues de pression sont localisées au centre des volumes de contrôle.

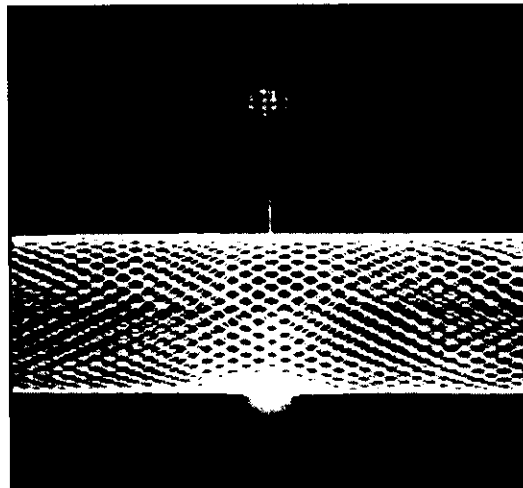
Les opérateurs de dérivation intervenant dans les équations de Navier-Stokes sont transformés dans l'espace de calcul par l'intermédiaire de des coefficients métriques: le jacobien  $J$  de la transformation, le vecteur surface orientée  $\vec{b}^i$  de la facette  $i$  du "volume" de contrôle, le tenseur métrique contravariant  $g^{ij}$  et les fonctions d'étirement  $f^i$ . Les équations de transport linéarisées, ou bien l'équation de vitesse à la paroi perméable, ainsi transformées sont ensuite discrétisées. Pour ce faire nous utilisons le schéma multi-exponentiel pour discrétiser l'opérateur de convection-diffusion et un schéma à deux points pour les gradients de pression.

La disposition colocative des variables de vitesse interdit une reconstruction des flux aux interfaces des volumes de contrôle par simple interpolation (découplage en damier du champ de pression). L'équation pour la pression est obtenue par la méthode de Rhie & Chow. La structure commune des équations de transport et de vitesse à la paroi perméable nous permet alors de traiter ces équations de façon identique.

Le couplage entre les équations de vitesse et de pression est réalisé par l'intermédiaire de l'algorithme SIMPLER. Les systèmes linéaires sont résolus par la méthode du gradient conjugué stabilisé. Le système de pression est préconditionné par une matrice issue de la décomposition incomplète ILU.

## 3. Etude expérimentale

La première expérience permet d'identifier le triplet de coefficients du modèle numérique, pour un type de filet donné. Les expériences qui sont décrites en suite sont effectuées sur des maquettes constituées de la même paroi perméable, les coefficients du modèle restent donc identiques pour chaque expérience.



Vue des faisceaux de l'anémomètre laser à proximité de la paroi de la maquette.

### 3.1 Etude en soufflerie d'une maquette de forme cylindrique de révolution

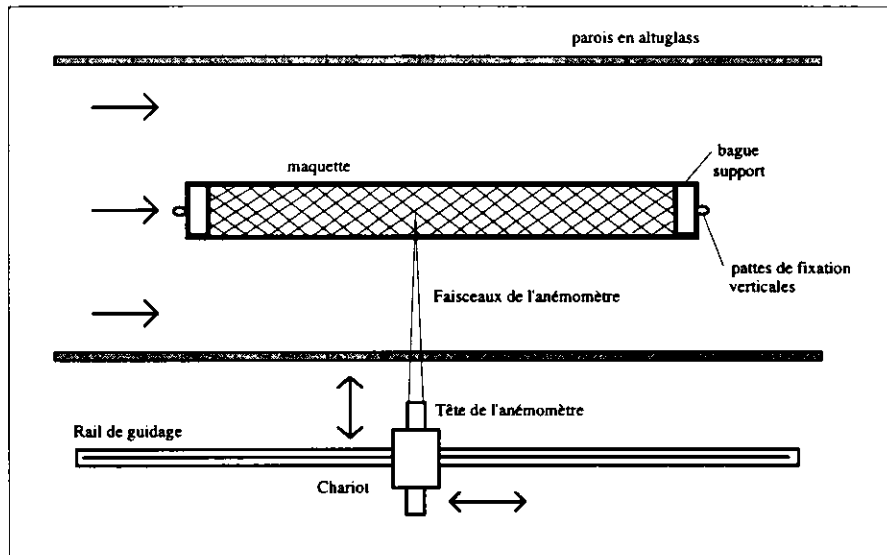


Figure 4  
Dispositif expérimental.

La maquette cylindrique circulaire a une longueur de 66 cm et un diamètre de 7,5 cm. Elle a 12 mailles au périmètre. Elle est maintenue à chaque extrémité de façon rigide par deux bagues métalliques de faible épaisseur. Chaque bague est reliée au bâti de la soufflerie par deux fines lames métalliques.

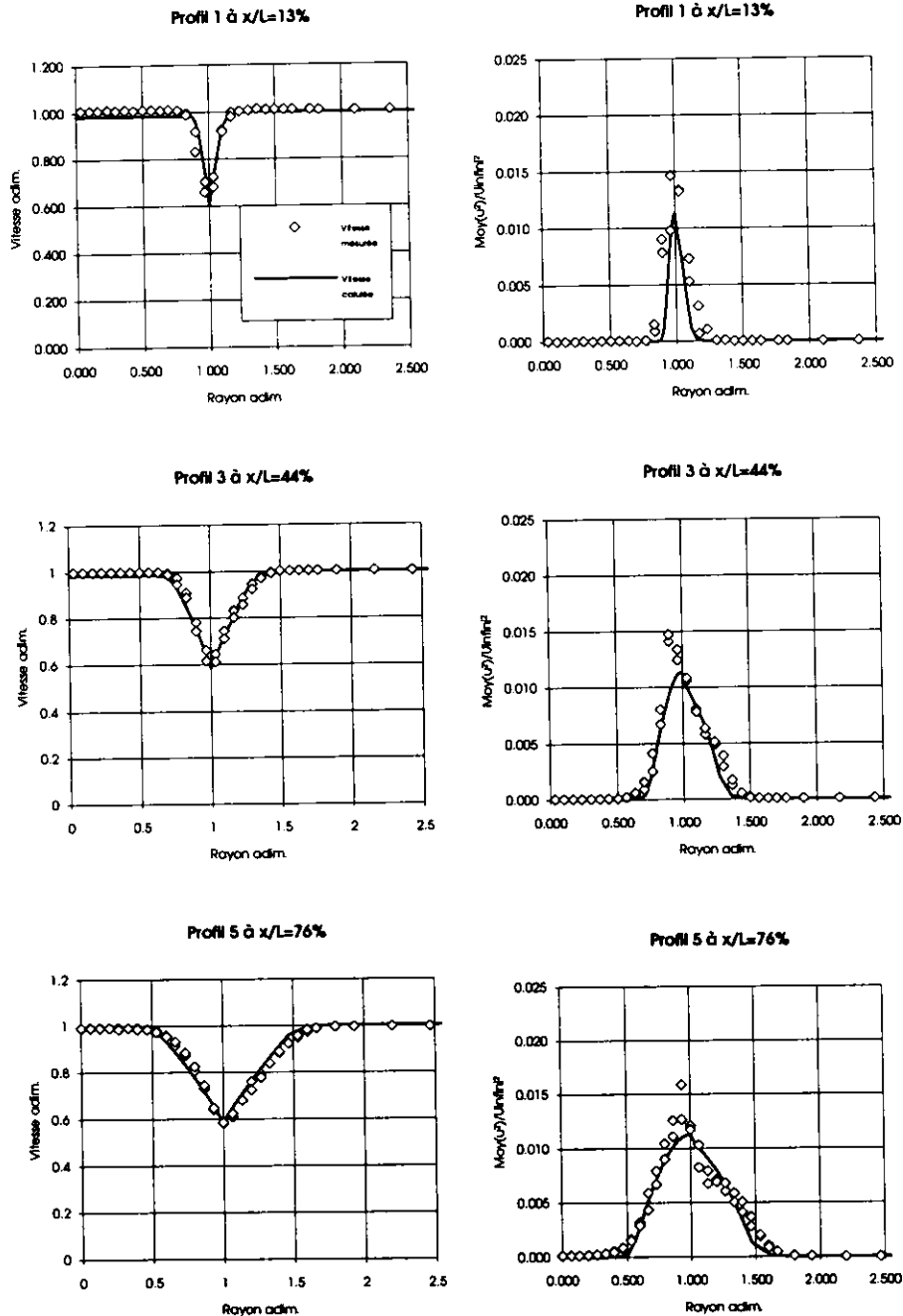
Les mesures de vitesse sont effectuées avec un anémomètre laser Doppler à deux composantes. Une seule composante est utilisée pour mesurer la vitesse axiale. L'autre composante sert à vérifier la bonne orientation du plan de mesure dans l'écoulement. Dans ce cas, la vitesse moyenne donnée par la deuxième composante est nulle. Enfin, l'écoulement est ensemencé par l'intermédiaire d'un générateur de fumée. Les mesures, dans 6 profils horizontaux répartis le long de la maquette, sont effectuées à la vitesse de veine de 15 m/s.

En dépit des précautions prises pour mettre au point cette installation, des doutes relatifs au positionnement subsistent:

- On peut rencontrer des erreurs d'alignement de la maquette dans la soufflerie.
- De même, le banc de la tête de l'anémomètre n'est pas solidaire de la soufflerie. Il faut donc s'assurer de son parallélisme avec l'axe de la maquette.
- La maquette est toujours un peu déformée par les tensions qui la maintiennent ainsi que par son poids. La nature même du matériau constitutif de la maquette la rend très fragile.
- Le volume de mesure de l'anémomètre laser s'étend sur 2 mm environ dans la direction du profil (direction radiale). Cela peut être gênant quand on mesure la vitesse à la paroi. Ainsi, les minimum de vitesse et les taux de turbulence peuvent être surestimés car les particules de fumée qui traversent le volume de mesure n'ont pas toutes la vitesse moyenne minimale.
- Enfin, le centre de la maille ne se situe pas exactement sur la circonférence (fictive) de la maquette. Cette remarque est d'autant plus vraie que le nombre de mailles est petit (dans notre cas, représentation d'un cercle par un dodécaèdre).

Quelques uns des profils de vitesse et de turbulence obtenus sont présentés ci-dessous:





Profils de vitesse et des moyennes des carrés des fluctuations de vitesse mesurées et calculées dans la maquette cylindrique circulaire en soufflerie.

Les vitesses axiales calculées et mesurées se superposent de façon satisfaisante. On a donc pu déterminer un triplet convenable de coefficients. On note en particulier que l'évolution de l'épaisseur des couches limites internes et externes est bien simulée par le modèle numérique.

Les moyennes mesurées des carrés des fluctuations de vitesse dans la direction axiale sont aussi présentées, pour les différentes sections de mesure. Les valeurs mesurées sont assez dispersées au voisinage de la paroi. On remarque surtout le bon recouvrement des valeurs calculées et mesurées alors que les couches limites se développent. On peut avancer une explication, sur la présence des maximum des fluctuations de vitesse assez importants au voisinage de la paroi. En effet, le volume de mesure n'est pas ponctuel. L'intégration des écarts à la vitesse moyenne n'est donc pas uniquement temporelle mais aussi spatiale. Cela explique donc les fluctuations mesurées plus importantes, d'autant plus que le volume de mesure "déborde" de l'épaisseur de la paroi.

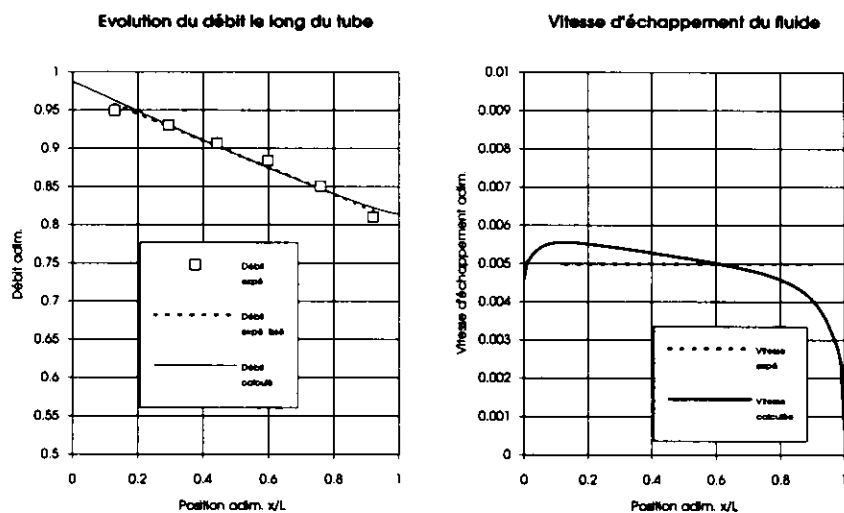
Les profils de vitesse longitudinale ont donc été intégrés pour obtenir le débit axial interne au tube en fonction de l'abscisse dans le tube. Les débits représentés sur le graphe suivant sont des débits adimensionnels. Le débit qui traverse une section du cylindre est rendu adimensionnel en le rapportant au débit au loin dans une section équivalente. Ceci s'écrit donc:  $\bar{Q} = \frac{Q}{\pi r_0^2 U_\infty}$

La courbe expérimentale de débit a ensuite été lissée, au sens des moindres carrés, par une droite. La fonction linéaire obtenue permet donc d'exprimer le débit sans dimension en fonction de la position sans dimension  $x/L$  de la façon suivante:

$$\bar{Q}(\bar{x}) = -0.1752 \bar{x} + 0.9806$$

L'exploitation de ces mesures permet de calculer le débit axial dans le tube et donc d'étudier l'évolution du débit à travers les sections droites de la maquette. Nous en déduisons ensuite la vitesse à laquelle le fluide s'échappe par la paroi perméable.

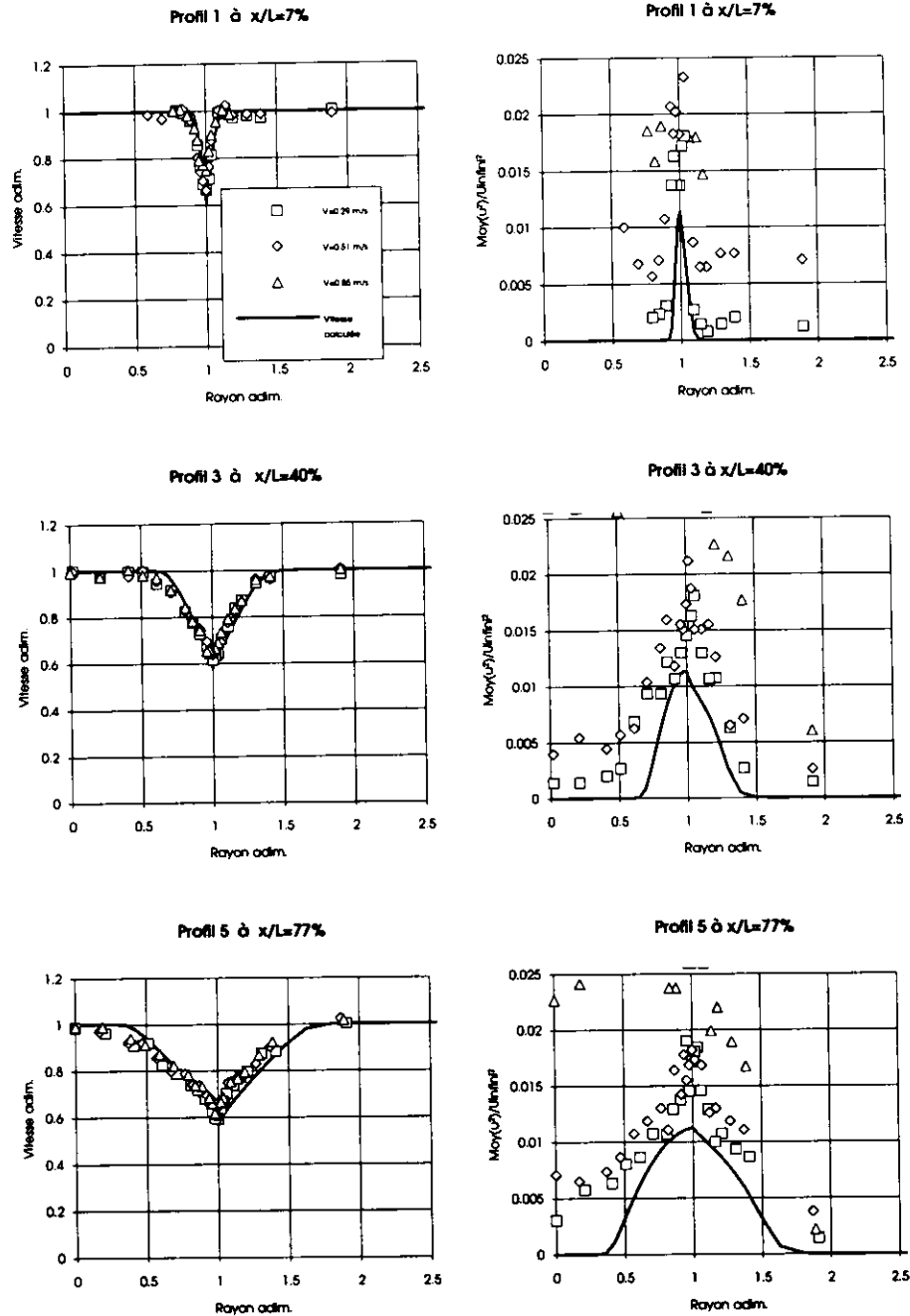
En effet, nous avons essayé, sans succès, de mesurer la composante normale de vitesse à la paroi, c'est-à-dire la vitesse d'échappement. Nous montrons ci-dessous que l'ordre de grandeur de la vitesse d'échappement, est environ 0,5% de la vitesse au loin. Nous nous proposons donc de calculer la vitesse de sortie par la dérivation du débit. On constate alors une bonne coïncidence des valeurs moyennes des vitesses d'échappement calculées et déduites des mesures. Les écarts relatifs sont inférieurs au millième, c'est-à-dire inférieurs aux erreurs de mesure.



Nous observons une diminution sensible du débit au fur et à mesure que l'on approche l'arrière du tube. Ainsi, 20% environ du fluide arrivant par la section d'entrée, ressort par la paroi perméable du tube. Sur le même graphe figure également le résultat des calculs. La très bonne correspondance entre mesures et calculs est due à l'identification du "bon" triplet des paramètres du modèle.

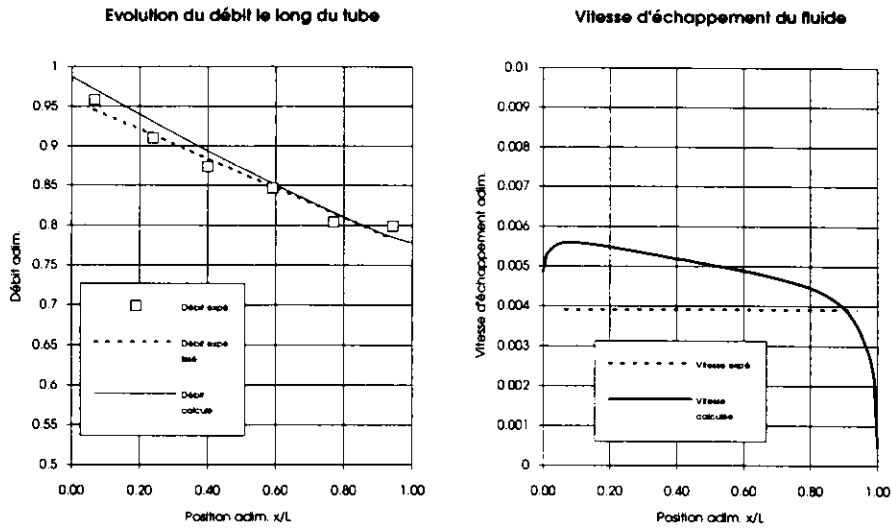
### 3.2 Etude en bassin de circulation d'eau d'une maquette de forme cylindrique de révolution

Ces mesures sont effectuées en bassin de circulation d'eau à Boulogne-sur-Mer (moyens IFREMER). La maquette a cette fois l'encombrement suivant :  $L=2,2\text{m}$ ,  $D=0,2\text{m}$ . Le matériau qui la constitue est le même que pour la maquette en soufflerie. On mesure la vitesse axiale selon des profils verticaux et ceci pour six sections réparties régulièrement le long du tube. Les trois vitesses auxquelles sont effectuées les mesures sont 0,29 m/s, 0,51 m/s et 0,85 m/s. Les nombres de Reynolds des expériences en soufflerie et en bassin de circulation d'eau sont comparables. Une partie des profils de vitesse et de turbulence mesurées et calculées est présentée ci-dessous.



Profils de vitesse et des moyennes des carrés des fluctuations de vitesse calculées et mesurées dans la maquette cylindrique en bassin de circulation d'eau.

Les profils de vitesse sans dimension se recouvrent bien pour les trois différentes vitesses. Les vitesses calculées sont conformes aux vitesses mesurées. On note toutefois un léger défaut de vitesse mesurée sur l'axe, à la sortie du tube. La turbulence naturelle du bassin de circulation utilisé peut expliquer les valeurs importante mesurées des moyennes des carrés des fluctuations de la vitesse axiale. Comme précédemment, nous présentons l'évolution du débit axial le long du tube et de la vitesse d'échappement du fluide à la paroi perméable.

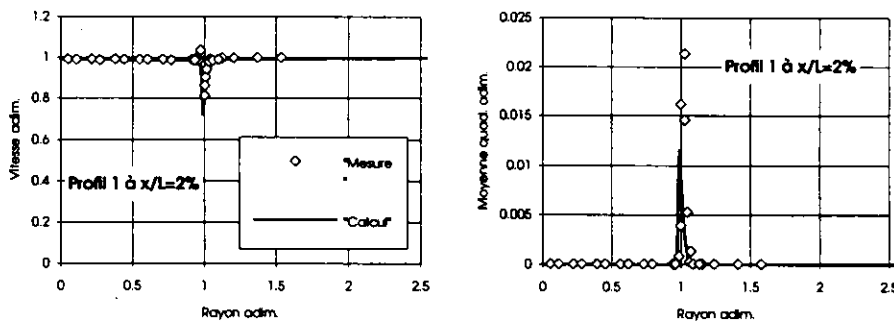


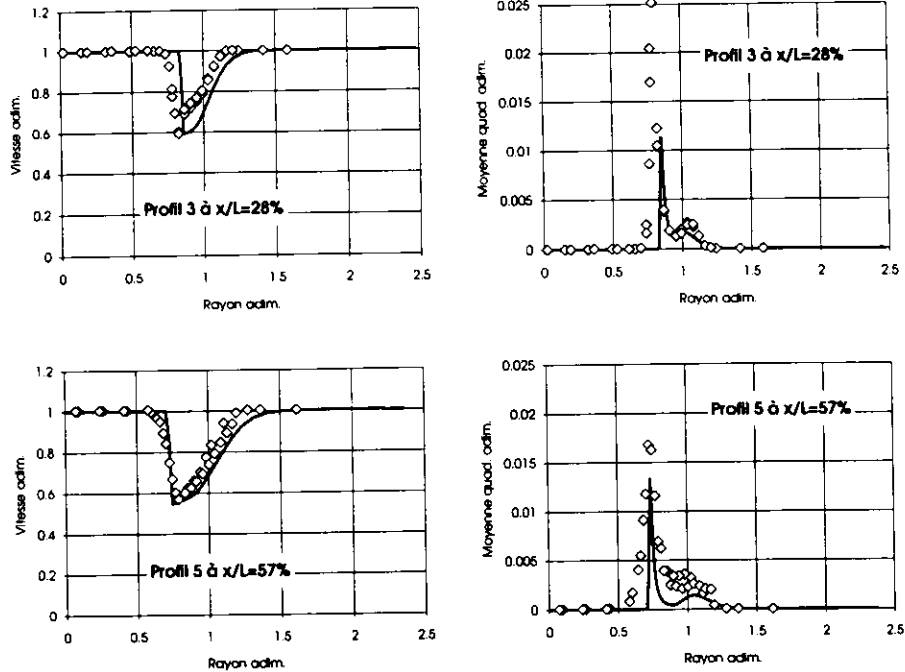
L'écoulement simulé est globalement conforme aux mesures, cela est d'autant plus satisfaisant que les conditions expérimentales sont, cette fois, très différentes. Les débits mesurés et calculés se recouvrent avec des écarts inférieurs à 5%. Les vitesses d'échappement semblent encore très différentes. Cependant, il faut remarquer que les valeurs des vitesses (0,5% de  $U_\infty$ ) sont inférieures aux incertitudes de mesures. De plus, la méthode de calcul des vitesses d'échappement apporte des erreurs d'intégration. Celles-ci proviennent d'incertitudes sur la position de la paroi et sur les valeurs des vitesses mesurées. Il n'est donc pas surprenant d'obtenir ce type de résultats. Par contre, les ordres de grandeur des vitesses d'échappement du cylindre, obtenues par calcul ou par la mesure, sont comparables. Enfin, on pourrait espérer obtenir de meilleurs résultats avec un plus grand nombre de sections de mesure.

De plus, les vitesses de fuite dont nous parlons ici sont des vitesses moyennes. La réalité est toute autre puisque les vitesses à la paroi de la maquette sont nulles au niveau des fils et peuvent avoir des valeurs importantes à l'intérieur des mailles.

### 3.3 Mesures sur une maquette à forme tronconique

Par l'étude d'une maquette de forme "tronconique", nous tentons de nous rapprocher de la forme de la partie terminale d'un chalut ouvert. Cette maquette garde donc, comme les autres, son extrémité arrière ouverte. La maquette a une longueur de 70 cm. Son grand diamètre, à la section d'entrée, mesure 11,8 cm et son petit diamètre 8,0 cm. Le matériau constitutif de sa paroi reste le même filet. Signalons que la forme réelle de la maquette, qui subit des contraintes de la part des organes de maintien dans la veine, est prise en compte dans les calculs. Nous présentons ci-dessous quelques uns des profils obtenus.



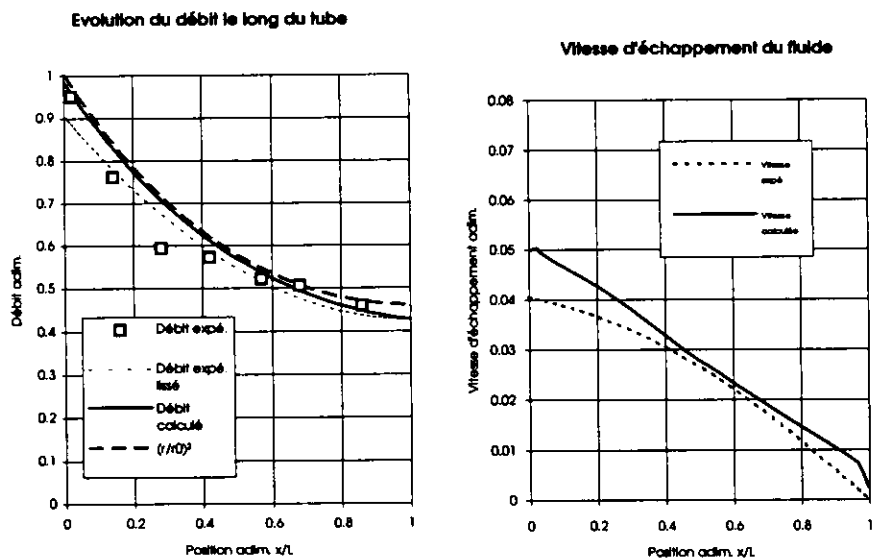


Profils de vitesse et des moyennes des carrés des fluctuations de vitesse calculées et mesurées dans le cas de la maquette tronconique.

Le champ de vitesse calculé est quasiment uniforme dans la première moitié du cône. L'épaisseur de couche limite interne est donc sous évaluée par le modèle numérique. Inversement, les profils de vitesse calculée à l'extérieur sont un peu sous estimés.

On retrouve, sur les profils des moyennes des carrés des fluctuations de vitesse, des valeurs calculées inférieures aux valeurs mesurées. Il peut s'agir des mesures de turbulence qui donnent des valeurs trop importantes pour les raisons qui ont déjà été détaillées. L'allure des profils mesurés est globalement bien reproduite par la simulation. Le maximum local de turbulence calculée est conforme aux mesures.

Nous présentons ensuite l'évolution du débit le long de la maquette conique. Rappelons que le débit adimensionnel s'écrit  $\tilde{Q} = \frac{Q}{\pi r_0^2 U_\infty}$  où  $r_0$  est ici le grand rayon de la maquette. Un effet de forme intervient



donc dans l'évolution du débit. Nous avons ajouté la courbe  $(r/r_0)^2$ . Il s'agit du débit dans la section  $r$  de la maquette dans le cas d'un écoulement uniforme, autrement dit, dans le cas d'une paroi infiniment perméable. Cela montre donc que l'on peut qualifier de très perméable le matériau constitutif de la maquette.

On remarque, sur la dernière figure, que les vitesses normales à la paroi perméable obtenues dans le cas de la maquette "conique" sont supérieures d'un ordre de grandeur aux vitesses d'échappement pour les cylindres. Notons que les vitesses d'échappement "expérimentales" dépendent fortement de la technique de lissage des débits mesurés.

## 4. Conclusion

Nous avons développé un code de simulation numérique des écoulements axisymétriques visqueux et turbulents guidés par une paroi perméable. Nous avons ensuite commencé la validation de ce code de calcul, et en particulier, la validation des lois de perméabilité et de turbulence à la paroi.

Nous venons de présenter une série de mesures sur maquettes, pour un type de paroi que nous pouvons qualifier de très perméable. Nous avons tout d'abord déterminé expérimentalement, à partir d'un cas précis, les paramètres de la paroi, indispensables à la simulation numérique de ces écoulements.

Les valeurs mesurées, au cours de ces premiers essais, et calculées, pour les différents moyens de mesure et les différentes installations expérimentales, se recoupent de façon tout à fait acceptable. Nous pouvons en déduire, à travers ces premières expériences, que les équations écrites à la paroi perméable sont à même de simuler ce type d'écoulement. Nous en déduisons aussi que les conditions à la paroi perméable appliquées au modèle de turbulence, sont significatives.

## Références bibliographiques

- [1] Arquis, Laplace, 1993, "Etablissement d'une condition limite pour une plaque perforée", C.R. Acad. Sci. Paris. t317 SII p727.
- [2] Arquis, Lauriat, Caltagirone, Delmas, 1994, "Convection naturelle dans une cavité partagée par une paroi perforée", Congrès SFT.
- [3] J.Piquet, 1983, "La turbulence et sa modélisation", Polycopié Ecole Centrale de Nantes.
- [4] C. Paichereau, D. Marichal, Le Rouzic, "Etude expérimentale d'un écoulement guidé par une paroi poreuse", Rapport de recherche, juin 1995.
- [5] B. Vincent, D. Marichal, K. Morishita, "Etude expérimentale d'un écoulement guidé par une paroi poreuse", Rapport de recherche, mai 1995.
- [6] M. Répécaud, B. Vincent, DITI/GO/NPA 95 030 "Mesure de vitesse par vélocimétrie laser à proximité d'une paroi poreuse", rapport interne IFREMER 1995.
- [7] D. Marichal, F. Théret, G. Bavouzet, J.S. Bessonneau, M. Meillat, B. Vincent, "Etudes expérimentales et numériques des structures réticulées souples placées dans un écoulement. Application aux chaluts", ATMA 1995.
- [8] B. Vincent, D. Marichal, "Etude numérique et expérimentale de l'écoulement limité par une surface poreuse axisymétrique. Application à la modélisation des chaluts pour en améliorer la sélectivité.", ATMA 1995.
- [9] B. Vincent, D. Marichal, "Etude numérique et expérimentale de l'écoulement limité par une surface poreuse axisymétrique.", AUM 1995.
- [10] D. Marichal, F. Théret, G. Bavouzet, J.S. Bessonneau, M. Meillat, B. Vincent, "Etudes expérimentales et numériques des chaluts.", Equinoxe n°57, 1995.
- [11] B. Vincent, D. Marichal, "Computation of the flow field in the codend", Fishing Technology and Fish Behaviour Working Group, CIEM 1996.