POLYPUBLIE

Simulation numérique de l'écoulement du vent autour des structures complexes : stade olympique de Montréal

Golnaz Baradaran Shokouhi

Document en libre accès dans PolyPublie
Open Access document in PolyPublie

Date	1999
Type	Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis Mémoire de maîtrise/Master's thesis
URL de PolyPublie PolyPublie URL	https://publications.polymtl.ca/8680/
Conditions d'utilisation Terms of use	© Tous droits réservés / All rights reserved
Référence Citation	Baradaran Shokouhi, G. (1999). Simulation numérique de l'écoulement du vent autour des structures complexes : stade olympique de Montréal [Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie. https://publications.polymtl.ca/8680/

Détails de la thèse
Thesis details

Directeurs de recherche Advisors	Marcelo Reggio
Programme Program	Non spécifié

Ce fichier a été téléchargé à partir de PolyPublie, le dépôt institutionnel de Polytechnique Montréal
This file has been downloaded from PolyPublie, the institutional repository of Polytechnique Montréal
https://publications.polymtl.ca

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

SIMULATION NUMÉRIQUE DE L'ÉCOULEMENT DU VENT AUTOUR DES STRUCTURES COMPLEXES: STADE OLYMPIQUE DE MONTRÉAL

GOLNAZ BARADARAN SHOKOUHI
DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE MÉCANIQUE)
AVRIL 1999

© Golnaz Baradaran Shokouhi, 1999.

National Library of Canada
Acquisitions and Bibliographic Services
395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Bibliothèque nationale du Canada
Acquisitions et services bibliographiques
395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file Votre référence

Our file Notre référence

The author has granted a non-exclusive licence allowing the National Library of Canada to reproduce, loan, distribute or sell copies of this thesis in microform, paper or electronic formats.

The author retains ownership of the copyright in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque nationale du Canada de reproduire, prêter, distribuer ou vendre des copies de cette thèse sous la forme de microfiche/film, de reproduction sur papier ou sur format électronique.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur qui protège cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

0-612-46644-2

Canada

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé:

SIMULATION NUMÉRIQUE DE L'ÉCOULEMENT DU VENT AUTOUR DES STRUCTURES COMPLEXES: STADE OLYMPIQUE DE MONTRÉAL

présenté par: BARADARAN SHOKOUHI Golnaz

en vue de l'obtention du diplôme de: Maîtrise ès sciences appliquées

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de:

M. MARCHE Claude, D.sc.a., président

M. MARCELO Reggio, Ph.D., membre et directeur de recherche

M. GHALY Wahid, Ph.D., membre et codirecteur de recherche

M. GARON André, Ph.D., membre

À tous ceux qui me sont chers

Remerciements

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude et mes vifs remerciements à mon directeur de recherche, le Professeur Marcelo Reggio et mon ex-directeur de recherche Ricardo Camarero, dont leur sympathie, leur vitalité et leurs efforts ont été un apport considérable dans la réalisation de ce projet.

Je tiens à remercier mon codirecteur le professeur Wahid Ghaly pour ses précieux conseils et ses remarques judicieuses qui ont beaucoup contribué à l'aboutissement de cette étude.

Mes remerciements vont également à l'endroit de Messieurs Juan Abanto, Paul Labbé, François Guibault, Luc Gravel pour m'avoir aidé à apprendre les matières nécessaires pour la réalisation de ce mémoire. Ils m'ont accordé leur temps et leur connaissance avec beaucoup de générosité.

Je n'oublie pas mes collègues au CERCA qui m'ont aidé dans le moindre problème et m'ont rendu mon séjour agréable. Je n'ose pas citer les noms de crainte d'oublier certains d'entre eux. Mais je ne peux pas m'abstenir de citer le nom de Frédéric Dupont, à qui je dois beaucoup pour l'aide qu'il m'a accordée malgré toutes ses occupations.

Je remercie ma famille pour leur soutien moral tout au long de mes études, mon mari et surtout mon fils de neuf ans qui a supporté avec patience la vie dans une famille étudiante.

Je remercie finalement la régie des installations olympiques (AERIO) pour avoir fourni tous les documents nécessaires à ma recherche.

Résumé

Dans ce travail, l'étude de la faisabilité de la simulation de l'écoulement du vent autour du stade olympique de Montréal est réalisée. Pour ce faire, nous nous sommes servis d'un logiciel commercial appelé STAR-CD. Le maillage est généré en utilisant la méthode des maillages multi-blocs. Le modèle de turbulence utilisé est le $k-\varepsilon$. La discrétisation des équations de base est faite en utilisant une technique de volumes finis. L'algorithme choisi pour la résolution des équations est SIMPLE. Pour la validation du logiciel, nous avons comparé les résultats obtenus pour la simulation d'un écoulement autour d'un cube, avec l'expérience.

Après s'être assuré des résultats obtenus, nous avons préparé le maillage, pour l'assemblage du mât et du stade. Mais les calculs finaux sont effectués que pour le mât tout seul et le stade est considéré comme une grande rugosité. Ceci est logique pour les calculs préliminaires, parce que les autres structures au voisinage de cette zone comme le biôdome sont idéalisées comme étant de "grandes rugosités". Les calculs sont effectués en se servant de différents maillages, facteurs de relaxation, vitesses à l'entrée, rugosité des parois. Par la suite, les effets de ces différentes hypothèses sont

étudiés sur les différentes variables comme la vitesse, le coefficient de la pression C_p, et le y^+. La direction de l'angle de l'incidence du vent à l'entrée est aussi considérée dans un cas.

À la fin, nous avons comparé nos résultats avec certaines études dans la littérature. Les mesures expérimentales dans le futur vont vérifier nos résultats.

Abstract

In the present work, the feasibility study of the simulation of wind flow around the Montreal Olympic Stadium is realized by using the commercial software STAR-CD. The mesh is generated by using the multi-bloc mesh generation. The turbulence method used is $k-\varepsilon$. The discretization of the basic equations is done by using the technic of finite volume. The algorithm choosen for the resolution of the equations is the SIMPLE. For validating the software, we have compared the obtained results for the simulation of a flow around a cube, with the experience.

After being assured by the obtained results, we have prepared the mesh for the Mast and the Stadium itself. The final calculation is done only on the mast, and the Stadium itself is considered as a high rugosity. This idealisation was adopted because other structures in the vicinity of this area like the Biodome, were considered as buildings of high rugosity.

The calculations are repeated for different numbers of grid points and cells, and their effects are investigated in different values such as velocity, pressure coefficient C_p, and

y^+. The effects of rugosity on walls, the effect of velocity at inlet and in addition, the effects of different relaxation factors are compared in different calculations. Also, the direction of wind incidence at inlet is considered only in one case in the present study.

Finaly, we compared our results with certain studies done in the litterature. Future experiences or measurements will verify the present results.

Table des matières

Dédicace iv

Remerciements v

Résumé vii

Abstract ix

Table des matières xi

Liste des tableaux xv

Table des figures xvi

Liste des notations xxi

Introduction 1

0.1 Général 1

0.1.1 L'aspect structurel 1

0.1.2 Aspect environnemental 2

0.1.3 Aspect énergétique 2

0.2 Les méthodes pour la prédiction des effets du vent sur les bâtiments . 3

Chapitre 1 Étude bibliographique **9**

1.1 L'histoire 9

1.2 Justification de l'étude présente 12

Chapitre 2 Formulations mathématiques et modèles numériques . . **14**

2.1 Formulations mathématiques 14

2.2 Modélisation de la turbulence 16

2.2.1 Modèle à viscosité turbulente (Boussinesq) 16

2.2.2 Modèle à une équation 17

2.2.3 Modèle à deux équations 17

2.2.4 La méthode directe 19

2.2.5 La méthode de "Large Eddy Simulation" (L.E.S) 19

2.3 Les lois au voisinage des parois 20

2.3.1 La loi de la paroi 20

2.3.2 Méthode à deux couches 23

2.4 Les conditions frontières 24

2.4.1 Condition à l'entrée (frontière 1) 24

2.4.2 Conditions à la paroi (frontières 6,7,8,10) 28

2.4.3 Plan de symétrie (frontière 3,4,5) 29

2.4.4 Condition à la sortie (frontière 10) 29

Chapitre 3 Solution numérique **32**

3.1 La méthode des volumes finis 32

3.2 L'algorithme de la résolution 37

3.3 Présentation du logiciel STAR-CD 38

Chapitre 4 Le maillage du stade olympique de Montréal **40**

4.1 La conception du domaine d'étude 40
4.2 La géométrie de l'obstacle 43
4.3 Conception des blocs 48
4.4 La génération du maillage 49

Chapitre 5 Validation du code 51
5.1 Introduction 51
5.2 Présentation des différentes simulations 52
5.2.1 Spécification du problème 52
5.2.2 La simulation numérique effectuée par le code PHOENIX . . . 53
5.2.3 La simulation numérique effectuée par STAR-CD 54
5.3 Discussion des résultats et comparaison avec les résultats expérimentaux 55
5.3.1 Description générale de la circulation autour du cube 55
5.3.2 Comparaison des résultats expérimentaux et la simulation . . 57
5.4 Conclusion 60

Chapitre 6 Résultats et discussions 81
6.1 Introduction 81
6.2 Méthodologie 82
6.2.1 Spécification des données du problème 83
6.2.2 Génération du maillage 84
6.2.3 Les conditions frontières 86
6.3 Description détaillée de l'écoulement autour du mât avec un angle d'incidence du vent nul 87
6.3.1 Face frontale 89
6.3.2 Face supérieure : le toit 90
6.3.3 Derrière l'obstacle 92

6.3.4 Les faces latérales 93
6.3.5 Les cellules à proximité du sol 93
6.4 Étude de sensibilité des résultats avec un angle d'incidence du vent nul 94
6.4.1 Étude de l'effet du maillage 95
6.4.2 Étude de l'effet du facteur de relaxation dans les calculs . . . 96
6.5 Étude de l'écoulement avec l'angle d'incidence égal à 180 degrés . . . 96
6.6 Étude de l'effet de la vitesse et de la rugosité sur les calculs 98
6.7 Comparaison des résultats obtenus avec l'étude faite pour simuler le vent autour des batiments avec différentes hauteurs 99
6.8 Conclusion 101

Conclusion **142**

Références **144**

Liste des tableaux

Tableau 2.1 Les différents modèles de turbulence proposés dans Star-CD . . . 31

Tableau 5.1 Concordance et qualité des résultats de la pression et de la vitesse 61

Tableau 6.1 Les différents calculs effectués 103

Table des figures

Figure 2.1 Schéma près de la paroi 22

Figure 2.2 Schéma du domaine et code des frontières 24

Figure 2.3 Caractéristiques des écoulements de vent dans les couches limites d'après Scruton (1981). 26

Figure 3.1 Schéma de discrétisation dans un plan horizontal 33

Figure 3.2 Schéma de discrétisation dans un plan vertical 34

Figure 4.1 Vue aérienne du stade olympique 41

Figure 4.2 Plan du stade olympique 44

Figure 4.3 Vue des blocs construits autour de la structure mât+stade . . . 45

Figure 4.4 Géométrie idéalisée du stade olympique 46

Figure 4.5 Section horizontale du mât du stade olympique 47

Figure 5.1 Dimensions du domaine de calcul 53

Figure 5.2 Vecteurs de la vitesse dans le plan de symétrie. 63

Figure 5.3 Vecteurs de la vitesse dans le plan de symétrie. Maillage fin, grossissement sur le cube. 64

Figure 5.4 Intensité de la vitesse à $z = 0.33 \times H$ 65

Figure 5.5 Vecteurs de la vitesse à $z = 0.33 \times H$ 66

Figure 5.6 Intensité de la vitesse à $z = 0.66 \times H$ 67
Figure 5.7 Vecteurs de la vitesse à $z = 0.66 \times H$ 68
Figure 5.8 Intensité de la vitesse à $z = 0.99 \times H$ 69
Figure 5.9 Vecteurs de la vitesse à $z = 0.99 \times H$ 70
Figure 5.10 Valeur du C_p sur la première couche de cellule sur la paroi. Vu de l'avant. 71
Figure 5.11 Valeur du C_p sur la première couche de cellule sur la paroi. Vu de l'arrière. 72
Figure 5.12 Intensité de la vitesse sur la première couche de cellule sur la paroi. Vu de l'avant. 73
Figure 5.13 Intensité de la vitesse sur la première couche de cellule sur la paroi. Vu de l'arrière. 74
Figure 5.14 Valeurs de y^+ sur la première couche de cellule sur la paroi. Vu de l'avant. 75
Figure 5.15 Valeurs de y^+ sur la première couche de cellule sur la paroi. Vu de l'arrière. 76
Figure 5.16 Variations de U selon la verticale à $0.5 \times H$ derrière l'obstacle. Courbe 1, résultats expérimentaux de Castro et Robins(1977) ; 2, résultats avec le code PHOENIX ; 3, STAR-CD, maillage fin, mêmes conditions frontières que PHOENIX ; 4, STAR-CD, maillage fin, conditions frontières proposées par PHOENIX ; 5, STAR-CD, même maillage que PHOENIX, mais conditions frontières proposées par STAR-CD ; 6, STAR-CD, maillage fin, conditions frontières proposées par STAR-CD. 77
Figure 5.17 Variations de U selon la verticale à $1.5 \times H$ derrière l'obstacle. Voir fig.5.16 pour les légendes. 78

Figure 5.18 Schéma indiquant la position des lignes le long du cube pour la comparaison entre les observations et les deux codes. 78
Figure 5.19 Valeur de C_p suivant la ligne A. Voir fig.5.16 pour les légendes. . 79
Figure 5.20 Valeur de C_p suivant la ligne B. Voir fig.5.16 pour les légendes. . 79
Figure 5.21 Valeur de C_p suivant la ligne C. Voir fig.5.16 pour les légendes. . 80
Figure 5.22 Valeur de C_p suivant la ligne D. Voir fig.5.16 pour les légendes. . 80

Figure 6.1 Maillage 1- dans le plan de symétrie de l'obstacle 104
Figure 6.2 Maillage 2- dans le plan de symétrie de l'obstacle 105
Figure 6.3 Maillage 3- dans le plan de symétrie de l'obstacle 106
Figure 6.4 Probabilité du vent évaluée sur 10 ans en fonction de la direction et de l'amplitude à 300 m au dessus de Montréal pendant la période de l'hiver extrapolé à partir de mesures prises à 10 m au-dessus du sol à l'aéroport Dorval 107
Figure 6.5 Maillage 1- intensité de la vitesse pour le dans le plan $y = 0$ . . . 108
Figure 6.6 Vecteurs vitesse dans le plan $y = 0$ 109
Figure 6.7 Intensité de la vitesse dans le plan $z \sim H$ 110
Figure 6.8 Intensité de la vitesse dans le plan $z = 2/3 \times H$ 111
Figure 6.9 Intensité de la vitesse dans le plan $z = 1/3 \times H$ 112
Figure 6.10 Vecteurs vitesse dans le plan $z = 1/3 \times H$ 113
Figure 6.11 Vecteurs vitesse dans le plan $z = 2/3 \times H$ 114
Figure 6.12 Maillage 3- coefficient de pression C_p sur la première couche de cellule sur la paroi 115
Figure 6.13 Maillage 3- C_p sur la première couche de cellule sur la paroi . . . 116
Figure 6.14 Maillage 3- intensité de la composante U de la vitesse sur la premiere couche de cellule sur la paroi, face frontal (amont) 117

Figure 6.15 Maillage 3- intensité de la composante U de la vitesse sur la premiere couche de cellule sur la paroi, face frontal (amont) 118
Figure 6.16 Vecteurs vitesse 119
Figure 6.17 Maillage 3- C_p sur la première couche de cellule sur la paroi, derrière l'obstacle (aval) 120
Figure 6.18 Maillage 3- C_p sur la première couche de cellule sur la paroi . . . 121
Figure 6.19 Maillage 3- intensité de la vitesse sur la premiere couche de cellule sur la paroi 122
Figure 6.20 Maillage 3- C_p sur la première couche de cellule sur la paroi, derrière l'obstacle (aval) 123
Figure 6.21 Maillage 3- intensité de la vitesse sur la premiere couche de cellule sur la paroi, derrière l' obstacle (aval) 124
Figure 6.22 Coefficient de pression C_p 125
Figure 6.23 Vitesse 126
Figure 6.24 Profil de la vitesse à $0.5 \times H$ derrière le mât 127
Figure 6.25 Profil de la vitesse à $1.5 \times H$ derrière le mât 127
Figure 6.26 effet du maillage sur la convergence 128
Figure 6.27 effet du facteur de relaxation sur la convergence 128
Figure 6.28 Maillage 6. Intensité de la vitesse dans le plan de symétrie . . . 129
Figure 6.29 Maillage 6. Intensité de la vitesse sur la première couche de cellule sur les murs 130
Figure 6.30 Maillage 6. Intensité de la vitesse sur la première couche de cellule sur les murs 131
Figure 6.31 Maillage 6. Vecteurs de vitesse à $y = 0$ 132
Figure 6.32 Maillage 6. Vecteurs de vitesse à $z = 1/3H$ 133
Figure 6.33 Maillage 6. Vecteurs de vitesse à $z = 2/3H$ 134

Figure 6.34 Maillage 6. Vecteurs de vitesse à $z = 0.99H$ 135
Figure 6.35 Maillage 6. C_p sur la première couche de cellules sur les murs . . 136
Figure 6.36 Maillage 6. C_p sur la première couche de cellules sur les murs . . 137
Figure 6.37 Calcul 9. Intensité de la vitesse dans le plan de symétrie de l'obstacle 138
Figure 6.38 Vecteurs vitesse dans le plan de symétrie de l'obstacle 139
Figure 6.39 Intensité de la vitesse sur la première couche de cellules sur les murs 140
Figure 6.40 À gauche : coefficient de pression C_p sur la face frontale et à droite sur le toit en terme de valeur moyenne, maximum et écart-type Stathopoulos(1989) 141

Liste des notations

Notations

a	: coefficient de discrétisation de transport
C_D	: constante pour le calcul de L(y)
C_1, C_2, C_3	: constantes du modèle de turbulence
C_p	: coefficient de pression
f_μ	: coefficient de viscosité turbulente
I	: intensité de la turbulence
K_S	: paramètre désignant la rugosité de la surface du terrain en amont
k	: énergie cinétique de la turbulence
$L(y)$	: valeur de la longueur échelle longitudinale de l'atmosphère à l'entrée
l	: longueur de la turbulence
p	: pression
S_L	: le terme de source
T	: temps
t	: temps
u, v, w	: vitesses dans les directions x,y,z
U, V	: vitesses axiales en coordonnées locales
v	: vitesse
u^*, v^*, w^*	: vitesses estimées
u', v', w'	: vitesses corrigées
x	: coordonnée axiale
x, y, z	: coordonnées locales
y^+	: distance adimensionelle du premier point du
y_p	: distance du point P à la paroi maillage à la paroi

Lettres grecques

α	: exposant moyen de la vitesse du vent
λ	: facteur de proportionnalité entre vitesse et taux de cisaillement
μ	: viscosité dynamique laminaire
μ_t	: viscosité dynamique turbulente
ν	: viscosité
ω	: taux spécifique de la dissipation
Φ	: variable scalaire
ρ	: densité
τ	: taux de cisaillement
τ_w	: taux de cisaillement à la paroi
ε	: dissipation

Indices

eff	: valeur effective due à la turbulence
max	: valeur maximale
P	: au point P, adjascent à la paroi solide
ω	: sur la paroi solide

Symboles

$\bar{.}$	: moyenne
$\vec{.}$	: vecteur
$.'$	: fluctuations

Introduction

0.1 Général

Le vent est l'un des phénomènes naturels que l'être humain a essayé de maîtiser pendant des années. Les problèmes causés par le vent peuvent être classés dans trois catégories :

0.1.1 L'aspect structurel

Cet aspect suppose l'effet du vent comme étant une force transversale sur les batiments. Mal conçue, une structure risque de connaître la rupture d'éléments non-principaux comme les fenêtres, le toit... ou, dans certains cas des dommages plus importants, comme la rupture d'éléments principaux (une colonne par exemple).

Un deuxième aspect structurel du vent est l'effet vibratoire du vent sur les structures. Cet effet peut se manifester de façon locale ou globale. La vibration et le bruit causé par celle-ci dans les éléments non-structuraux des batiments est l'un des résultats les plus courant de l'effet vibratoire local sur les immeubles.

L'effet vibratoire global du vent dans les structures élancées peut causer des vibrations plus graves. L'effet vibratoire du vent se manifeste surtout dans les étages supérieurs où l'on sent ces oscillations de manière plus prononcée. Parfois, une concordance de la fréquence du vent avec la fréquence naturelle d'une structure peut causer des mouvements très importants. C'est pourquoi l'effet vibratoire du vent sur les bâtiments élancés forme une partie importante des études d'un concepteur.

0.1.2 Aspect environnemental

Le progrès dans l'industrie entraîne toujours ses propres problèmes dans la nature. L'un de ces problèmes est la pollution causée par les milieux industriels. Cette pollution, bien qu'elle se centralise dans les zones industrielles, est dans certains cas dispersée par le vent et déplacée vers les milieux urbains. Par conséquent, les ingénieurs de chimie s'interessent de nos jours, de plus en plus, à l'ingéniérie du vent.

Une autre importance de l'ingéniérie du vent est dans l'architecture urbaine. Dans les zones où existent des bâtiments élancés, peuvent être créées des couloirs du vent à cause de la configuration des structures. Ceci peut gêner les piétons et briser les plantes du milieu. Dans certains pays, il existe même des lois qui exigent une expérience de soufflerie pour les milieux urbains avec des bâtiments élevés.

0.1.3 Aspect énergétique

Les différentes études ont confirmé que le vent est l'une des causes des pertes d'énergie dans les immeubles . Les nouvelles recherches font des investigations pour améliorer l'étanchéité des immeubles et perfectioner les matériaux de construction des

bâtiments.

À part des effets négatifs du vent, cette énergie est utile dans différents cas : la ventilation des immeubles, le transport de la pollution de l'air vers l'extérieur des zones urbaines et l'écoulement naturel de l'air à travers les réfrigérants dans les centrales éléctriques sont des exemples des avantages du vent. Il est donc important de connaître le comportement du vent, pour pouvoir le maîtriser et dans certains cas, le rendre utile dans notre vie.

Il existe différents outils pour connaître scientifiquement ce phénomène et évaluer les effets de cette énergie. Ceux-ci sont expliqués dans le chapitre suivant.

0.2 Les méthodes pour la prédiction des effets du vent sur les bâtiments

Les premières méthodes pour la prédiction des effets du vent sur les structures étaient les mesures sur place de la vitesse du vent et par la suite l'estimation des forces dûes à celui-ci.

Les mesures en grandeur nature "full scale measurement " sont basées sur cette méthode. Cette approche est encore utilisée présentement et est l'une des bases de la validation numérique. Mais obtenir les informations en utilisant cette méthode nécessite une longue durée. De plus, les instruments et les étalonnages pour la réalisation de cette expérience sont coûteux. D'autre part, les mesures en grandeur nature, nécessitent la construction de la structure elle-même, ce qui peut devenir très compliqué pour ne pas dire encore une fois coûteux.

Bien que cette méthode ait ses propres défauts, elle garde toujours une importance cruciale dans l'estimation des forces dûes au vent.

La simulation du vent, en utilisant les souffleries est une autre solution pour l'estimation des effets du vent sur les bâtiments. Cette méthode a été utilisée pour la première fois en 1956 par Cermac pour le modèle du "World Trade Center". Son coût est beaucoup plus inférieur à la méthode précédente mais reste toutefois élevé.

Il est à ajouter que les "normes", pour la conception des bâtiments en tenant compte du vent sont basées sur les expériences de la soufflerie. Comme celles-ci sont faites pour un grand nombre de constructions, elles utilisent un grand facteur de sécurité. En outre, elles ne sont généralisées que pour les bâtiments ayant des formes habituelles et simples. Par conséquent, les structures inhabituelles de point de vue de la forme ne doivent pas être conçues en se servant des normes.

Le développement de la technologie des ordinateurs a crée une nouvelle méthode pour le calcul des paramètres nécessaires pour la conception. Le calcul numérique est une solution assez rigoureuse dans un grand nombre de cas et offre certains avantages par rapport aux deux premières méthodes. Les avantages majeurs que l'on peut citer sont les suivants :

- Coût : L'avantage le plus important de la simulation numérique est le coût. Les instruments et la réalisation d'un modèle pour simuler la réalité sont normalement très chers, et dans des problèmes physiques compliqués le facteur de coût devient extrêmement important. D'autre part la tendance des coûts des mesures expérimentales montrent une augmentation, tandis que l'utilisation des ordinateurs coûte de moins en moins cher.

- Rapidité : Les calculs numériques se font avec une rapidité remarquable. Grâce à l'ordinateur différents calculs peuvent être effectués en changeant les valeurs de divers paramètres pour trouver une solution optimale. Il est bien clair que changer la valeur d'un paramètre dans un calcul numérique n'est qu'un "autre" calcul pour l'ordinateur tandis que ce même changement dans une expérience nécessite la construction d'une autre maquette, et de nouveaux essais.

- Information complète : La solution obtenue par un calcul numérique est normalement complète et détaillée. Un calcul numérique effectué par un ordinateur peut donner normalement les valeurs de la vitesse, pression, température, concentration, turbulence... Tandis que les résultats expérimentaux sont ponctuels et très limités.

- Simulation des conditions idéales : L'ingénieur s'intéresse parfois aux cas idéaux. Par exemple, l'étude peut nécéssiter le fait qu'un calcul soit supposé bidimensionnel, ou bien une densité constante, ou encore une surface adiabatique. Ces conditions peuvent être facilement considérées dans le calcul, tandis qu'une expérience, même si elle est faite très précisément ne peut pas être idéalisée de manière absolue.

Bien que les théories analytiques soient très impressionantes, elles ne répondent pas à toutes les situations :

- Les calculs numériques sont basés sur des modèles mathématiques, donc les calculs numériques sont utiles si et seulement si, la discrétisation du modèle mathématique est précise, sinon les meilleurs calculs numériques seront inutiles pour la résolution des phénomènes physiques. Or, les modélisations mathématiques n'existent que pour les phénomènes simples comme le transfert de chaleur, les écoulements laminaires,

les couches limites turbulentes simples. Les phénomènes comme certains écoulements non-Newtoniens... manquent de modèles mathématiques.

- Dans les cas simples les résolutions numériques peuvent être utilisées sans souci. Mais dans les cas complexes un support expérimental ou une validation suffisante est d'une importance cruciale pour la validité des résultats.

Le travail présent étudie l'exemple du stade olympique de Montréal, qui a une forme très irrégulière.

La structure est composée d'un mât avec une hauteur d'environ 175 m et le stade lui-même est situé à proximité avec une hauteur d'à peu près 1/5 du mât, et avec une coupe elliptique. L'architecture du mât est complètement irrégulière et les contours de celui-ci sont formés par des courbes qui divergent vers la base. Le mât lui-même est incliné et est même la plus haute structure inclinée du monde.

La structure du stade est située à l'est de Montréal, où la vitesse du vent atteint des valeurs d'environ 25 m/s. En supposant une longueur de référence comme étant la moitié de la somme de la hauteur et la largeur de l'obstacle, le problème se situe dans une marge de la valeur du nombre de Reynolds d'environ 10^8. Les années passées ont montré que le toit du stade a été déchiré régulièrement à cause des écoulements du vent. Par conséquent, des frais énormes ont été attribués pour la réparation du toit. Cette recherche a été faite suite aux problèmes de la déchirure du toit pendant plusieurs années consécutives. Elle est supposée être une étude de la faisabilité pour évaluer les contraintes dûes à l'écoulement du vent autour du stade avec des méthodes numériques.

Ce mémoire est organisé en sept chapitres :

Les chapitres 1 à 3 constituent la partie théorique. Dans le chapitre 1 une étude bibliographique sera faite pour discuter les différentes recherches qui ont été faites dans le passé.

Le chapitre 2 parle des formulations mathématiques. L'écoulement est modélisé à l'aide des équations de Navier-Stokes en écoulement tri-dimensionnel. Dans ce même chapitre, les modèles de la turbulence vont être cités. Comme les modèles de la turbulence sont conçus pour les nombres de Reynolds élevés, ils ne peuvent pas prédire le comportement du fluide à proximité des parois. Donc, les lois de la paroi seront présentées dans ce même chapitre.

Le chapitre 3 présente la discrétisation numérique des équations gouvernant l'écoulement. C'est cette méthode que STAR-CD utilise pour résoudre les équations. Le chapitre 3 discute aussi les possibilités du logiciel, en relation avec l'étude présente.

Le chapitre 4 représente la méthodologie du travail. Dans ce chapitre les différents paramètres qui influencent les calculs seront discutés.

Le chapitre 5 discute de la validation du code. Dans ce chapitre, l'écoulement du vent est étudié autour d'un cube et est comparé avec les résultats expérimentaux de Castro et Robins(1977).

Le chapitre 6 présente les résultats obtenus pour le mât du stade. Dans ce chapitre, l'influence du maillage sur les résultats, la direction du vent, l'influence du nombre de Reynold va être discutée. Ensuite, les résultats vont être comparés qualitativement avec les résultats de la simulation du vent autour du cube.

La conclusion fera le point sur les résultats des études et proposera les futurs essais dans cette recherche.

Chapitre 1

Étude bibliographique

1.1 L'histoire

Dans le chapitre précédent, nous avons mentionné l'utilité des calculs numériques dans les études de l'écoulement du vent autour d'un obstacle. Dans ce chapitre, une étude de la littérature pertinente à ce sujet sera présentée, et servira à justifier la nécessité de cette étude.

L'une des premières études est celle de Vasilic-Melling(1977), qui a étudié un écoulement dans deux dimensions sur un cube et, qui a comparé les résultats avec les résultats expérimentaux. Il s'est servi des équations R.A.N.S. ("Reynold's averaged Navier Stokes equations") et le modèle de la turbulence $k-\varepsilon$. Dans ses recherches, il s'est rendu compte que la pression moyenne sur la surface supérieure du cube n'était pas cohérente avec les résultats expérimentaux de Castro et Robins(1977). Il a attribué ce défaut au maillage grossier utilisé. De plus, il n'a pas pu expliquer l'absence

de la zone de recirculation à l'aval.

Bien que le calcul manquait beaucoup de précision, toutefois celui-ci fût une base pour les études futures.

Après quelque années, Paterson et Apelt (1986, 1987 et 1990), en utilisant les équations R.A.N.S. et le modèle $k-\varepsilon$, ont étudié l'influence de la pression du vent sur le toit d'un batiment cubique. Ils ont montré que les résultats obtenus confirmaient assez bien les valeurs obtenues par l'expérience de Castro et Robins(1977), sauf pour la région de l'arête du toit en amont, où la dépression était sous-estimée par les calculs.

Plus tard, en 1990 Baskaran et Stathopoulos ont modifié le modèle $k-\varepsilon$ en se tenant compte des effets visqueux dans les cellules à proximité des parois. Cette modification a donné une bonne prédiction des pressions moyennes sur le toit. Mais celle-ci ne prédisait pas la séparation sur le toit et sur les murs latéraux.

En 1989, Han a utilisé le maillage "body-fitted",le modèle $k-\varepsilon$ et les équations R.A.N.S. pour simuler l'écoulement de l'air autour d'un véhicule. Les résultats obtenus correspondaient bien avec l'expérience. Dans la même année, Haggkvist et al(1989) ont simulé le vent autour d'une maquette de maison en se servant du logiciel commercial PHOENIX. Ils ont montré que les résultats obtenus correspondaient seulement qualificativement avec les mesures expérimentales. Plus tard, différentes études ont été faites en se servant de ce logiciel. Richard et Hoxey (1991) , Gadilhe et Hoxey (1991) . Mais les résultats obtenus ne correspondaient pas très bien avec l'expérience.

En 1990, Murakami a utilisé différents maillages pour montrer l'effet du nombre de noeuds au voisinage des parois d'un cube. Il a montré que les résultats obtenus pour un maillage fin correspondaient beaucoup mieux avec l'expérience, tandis que dans

un maillage grossier les dépressions sur le toit du cube était sous-estimée. Dans ses calculs il a utilisé les équations R.A.N.S. et le modèle $k-\varepsilon$ pour la turbulence .

Dans une autre recherche, Murakami, Hibi, et Moshida (1990) ont simulé l'écoulement du vent autour d'un batiment en cube en utilisant le modèle L.E.S. ("Large Eddy Simulation").Ils ont comparé leurs résultats avec ceux obtenus par le modèle $k-\varepsilon$ pour un vent normal à l'obstacle. Les résultats obtenus ont montré que le modèle L.E.S. prévoit mieux la zone de recirculation de l'écoulement moyen après la séparation au niveau du toit.

Dans la même année, Baetke et al. (1990) ont évalué numériquement la pression du vent sur la surface d'un batiment avec l'angle d'incidence du vent égal à 45 degrés et 0 degré. Ils ont conclu que les résultats obtenus avec l'incidence du vent normal à l'obstacle étaient raisonnables et correspondaient bien avec l'expérience de Castro et Robins(1977). Mais, pour le vent oblique les calculs étaient faits pour un profil uniforme, donc n'étaient pas comparables avec l'expérience.

En 1991, Selvam et Paterson ont étudié la simulation de l'écoulement du vent en écoulement tridimensionnel autour d'un batiment élancé, pour lequel il y avait des données expérimentales et des résultats obtenus par des mesures en grandeur nature. Ils ont utilisé les maillages décalés et non-décalés dans leurs calculs. Les résultats ont montré que l'utilisation du maillage décalé donnait une bonne concordance avec les résultats obtenus par la soufflerie, tandis que le maillage non-décalé ne pouvait pas prédire la pression sur le toit.

En 1992, les chercheurs comme Paterson et Holmes ont commencé à travailler sur des géométries plus compliquées ; ils ont simulé l'écoulement du vent autour d'un toit arché. Les résultats n'étaient pas très comparables avec l'expérience.

En 1993, Hikkelsen et Livesey ont étudié l'effet de l'angle d'incidence sur un batiment rectangulaire. Les résultats obtenus correspondaient bien avec les résultats expérimentaux pour la face frontale et la face de l'arrière. Mais ceux du toit et les faces latérales ne confirmaient pas l'expérience.

En 1994, He et al. ont développé un code qui utilisait un maillage multi-bloc au lieu d'un maillage simple. Ils ont montré que dans un maillage très fin le temps CPU utilisé était 100 fois moins qu'un maillage habituel.

En 1995, Zhou et Stathopoulos ont fait une étude sur des batiments avec une forme en L. Ils ont utilisé les équations R.A.N.S. et le modèle $k - \varepsilon$. Les résultats sont comparés avec les expériences faites avec différents angles d'incidences. Il ont vu qu'il existe une bonne concordance des résultats avec l'expérience.

1.2 Justification de l'étude présente

Nous venons de voir que les développements sont plutôt faits au niveau des maillages, et des modèles de la turbulence. Dans ces calculs, les géométries utilisées ont des formes simples. Un cube simple, des parallélipipèdes ou dans des cas extrêmes des formes sphériques ou en L sont sujets de recherches.

L'étude présente débute une nouvelle phase sur des géométries complexes. Le stade olympique de Montréal est formé de deux structures : un mât et une structure avec une coupe en ellipse et un toit courbé. Le mât lui-même est idéalisé par quatre courbes sur son élévation. Deux courbes parmi ces quatre courbes sont hyperboliques, tandis que les deux autres ont une forme combinée à partir d'autres formes géométriques.

L'objectif de cette recherche est une étude de la faisabilité; c'est pourquoi, bien que le maillage soit fait même pour la combinaison des deux structures, mât+stade, les calculs sont effectués pour le mât uniquement. Dans ces calculs une étude quantitative n'est pas le but de la recherche, mais plutôt le comportement du fluide autour de l'obstacle est l'intérêt de la thèse. C'est pourquoi les méthodes et les modèles utilisés sont des méthodes relativement classiques.

Dans ce mémoire, nous avons utilisé un logiciel commercial : STAR-CD, qui est une implantation d'un schéma en volumes finis. Nous allons utiliser un maillage multi-bloc et respecter le maillage décalé pour la discrétisation des relations. Aucun des calculs effectués, auparavant n'ont été faits avec ce logiciel. Ceci pourra être aussi un bon début pour l'évaluation de ce logiciel dans le domaine de l'aérodynamique.

Chapitre 2

Formulations mathématiques et modèles numériques

2.1 Formulations mathématiques

Les problèmes de l'écoulement et du transfert de la chaleur sont exprimés en se servant des principes de la conservation de la masse, du mouvement et de l'énergie.

Les équations de Navier-Stokes sont obtenues à partir de l'équation du mouvement. Couplées avec l'équation de continuité, elles forment un système de base pour l'écoulement d'un fluide Newtonien. Dans notre cas, le nombre de Reynolds calculé sur la base de vitesse du vent (25 m/s) et la longueur de référence (prise comme la moyenne de la hauteur et de la largeur maximale mouillée de l'obstacle face au vent) $\sim$ 85 m, est environ 10^8.Ce nombre de Reynolds montre que notre étude est dans la marge d'un écoulement complètement turbulent.

Dans le cas d'un écoulement turbulent, comme celui-ci a un aspect tridimensionnel à très courte échelle en temps et en espace, il faudrait avoir une résolution spatiale de l'ordre moléculaire, sans parler du pas de temps qui devra être lui-même très petit. La simulation de tels phénomènes prendrait donc un très grand espace de temps de calcul et de mémoire. Comme ceci semble impossible avec les disponibilités informatiques actuelles, pour pallier à ce problème, on décompose alors les variables qui décrivent le phénomène en une quantité moyenne et une fluctuation. Donc, on peut écrire :

$$\overline{\phi} = \frac{1}{T}\int_0^T \phi(\vec{v}, t)dt \tag{2.1}$$

T étant assez grand pour pouvoir inclure les fluctuations que l'on veut filtrer. Alors :

$$\phi = \overline{\phi} + \phi' \tag{2.2}$$

où ϕ est une variable qui peut remplacer la vitesse, la pression, etc ... [Patankar, 1980]

En remplaçant les variables, par la somme de leur moyenne et la fluctuation dans le système couplé des équations de Navier-stokes originales, les équations Navier-Stokes moyennées sont obtenues :

$$U_j\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{1}{\partial x_j}\left[\nu\left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i}\right) - \overline{u_i' u_j'}\right] \tag{2.3}$$

$$\frac{\partial U_j}{\partial x_j} = 0 \tag{2.4}$$

Le système ci-dessus n'est pas un système fermé car le terme $\overline{u_i' u_j'}$ qui exprime les flux turbulents doit être exprimé grâce à des variables calculables.

Dans les théories de la turbulence, on s'efforce de rechercher des lois qui permettent d'exprimer les tensions de Reynolds, par exemple, en fonction des caractéristiques du mouvement moyen. Différentes approches sont faites pour résoudre ce problème. Mais les plus connues sont décrites ci-dessous :

2.2 Modélisation de la turbulence

Toutes les méthodes pour la modélisation de la turbulence cherche à approximer le terme de la fluctuation dans les formules ci-dessus. Il existe plusieurs méthodes de modélisation de la turbulence, mais, généralement,elles sont divisées en 5 groupes importants qui sont discutés dans les sections suivantes.

2.2.1 Modèle à viscosité turbulente (Boussinesq)

Dans ce modèle, introduit par Prandtl (1945) , une certaine longueur de mélange l_m est définie le long de laquelle les caractéristiques de la turbulence sont conservées. Dans ce modèle un paramètre μ_t est défini comme étant :

$$\mu_t = \rho l_m^2 \left| \frac{d\overline{u}}{dy} \right| \tag{2.5}$$

μ_t joue le même rôle que μ dans un écoulement non-turbulent.

Cette méthode s'avère très simple et utile pour des calculs préliminaires. La longueur l_m est donnée d'une manière empirique ou semi-empirique (Rodi 1980). L'inconvénient

de ce modèle est qu'il ne tient pas compte de l'effet de l'écoulement en amont et ne calcule pas l'énergie cinétique de la turbulence.

2.2.2 Modèle à une équation

Ce modèle, proposé par Prandtl (1945), calcule la valeur de k à partir d'une équation de transport, dérivée des équations de Navier Stokes moyennées

$$\frac{\partial \rho_k}{\partial t} + U_j \frac{\partial \rho_k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\frac{\mu_t}{\sigma_k}\frac{\partial k}{\partial x_i}\right) + \mu_t\left(\frac{u_i}{\partial x_j} + \frac{u_j}{\partial x_i}\right)\frac{u_i}{\partial x_j} - c_\mu \frac{k^{3/2}}{l} \tag{2.6}$$

σ_k et c_μ sont établies empiriquement.

l est une longueur caractéristique de turbulence et est déterminée expérimentalement. μ_t est la viscosité turbulente et est donnée par la formule suivante :

$$\mu_t = f_\mu \rho c_\mu k^{1/2} l \tag{2.7}$$

Cette méthode est relativement simple, et ne coûte pas chère. Le seul problème est la détermination de l qui doit être obtenu empiriquement.

2.2.3 Modèle à deux équations

Pour éviter le problème de la détermination de la longueur l empiriquement, les modèles à deux équations sont proposées. Kolmogorov (1942) a été la première personne

à résoudre le problème en définissant ω, le taux spécifique de la dissipation("specific dissipation rate") et en posant :

$$\mu_t \sim \rho k/\omega \quad ; \quad l \sim k^{1/2}/\omega \quad ; \quad \varepsilon \sim \omega k \tag{2.8}$$

Chou (1945) , Rotta (1951) , Zeirman et Wolfshtein (1986) , Speiziale, Abid et Anderson (1990) ont proposé d'autres relations pour fermer les équations de la turbulence. Dans toutes ces études, la dissipation, la viscosité turbulente et l'échelle de longueur sont les paramètres essentiels dans leurs calculs.

Parmi les modèles à deux équations, le modèle le plus populaire est celui de $k-\varepsilon$. Ce modèle est initialement proposé par Harlow et Nakayama (1968) et ensuite complété par Jones et Launder (1972) , Launder et al (1972) , puis Launder et Spalding (1974) . Ce modèle est basé sur les équations de Navier-Stokes moyennées. Les différentes équations de ce modèle sont les suivantes :

Viscosité turbulente : $\mu_t = \rho c_\mu k^2/\varepsilon$. L'énergie cinétique turbulente :

$$\rho\frac{\partial k}{\partial t} + \rho U_j\frac{\partial k}{\partial x_j} = \tau_{ij}\frac{U_i}{\partial x_j} - \rho\varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[(\mu + \mu_t/\sigma_k)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right] \tag{2.9}$$

Le taux de dissipation :

$$\rho\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho U_j\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = C_1\frac{\varepsilon}{k}\tau_{ij}\frac{U_i}{\partial x_j} - C_2\rho\frac{\varepsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[(\mu + \mu_t/\sigma_\varepsilon)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right] \tag{2.10}$$

où les valeurs suivantes sont recommandées par Hutchinson et al (1976) $C_1 = 1.44$,

$C_2 = 1.92$, $c_\mu = 0.09$, $\sigma_k = .90$, $\sigma_\varepsilon = 1.3$, $\omega = \varepsilon/(c_\mu k)$ et $l = c_\mu k^{3/2}/\varepsilon$.

Il faut noter que le modèle $k - \varepsilon$ est valable dans la zone où l'écoulement est complètement turbulent.

2.2.4 La méthode directe

Cette méthode est utilisée dans le cas des écoulements simples avec des nombres de Reynolds en dessous de 10000, comme dans le cas des canaux (Kim et al (1987)). Elle est basée sur les équations originales de Navier-stokes en régime instationnaire. Comme cette méthode n'est efficace que dans une gamme de nombres de Reynolds relativement petits, elle n'est pas utilisée dans l'ingéniérie du vent.

2.2.5 La méthode de "Large Eddy Simulation" (L.E.S)

Comme dans la méthode directe, cette méthode est basée sur les équations originales de Navier-Stokes en régime instationnaire. Elle peut être appliquée sur les écoulements de base dans l'ingéniérie du vent (Deardorff (1970), Schumann (1975) , Horiuti (1982) , Moin et Kim (1982) , Murakami et al. (1984) , Murakami et al. (1985)). L'avantage de ce modèle est qu'il dépend du temps et est plus précis que le modèle $k - \varepsilon$. Comme il dépend du facteur de temps, elle demande un nombre très élevé de mémoire.

D'après la littérature (Ferziger 1990), dans les écoulements complexes deux méthodes ont le potentiel pour prédire des estimations relativement précises des contraintes. Ces deux méthodes sont celles basés sur les équations moyennées de Navier-Stokes et le modèle L.E.S.

D'après Ferziger, les modèles basés sur les équations moyennées de Reynolds sont relativement plus testés sur différents problèmes et coûtent moins cher. Mais, toutefois ils ne sont pas très précis pour les calculs en trois dimensions et dans les écoulements où il existe des zones de séparation et réattachement.

La méthode L.E.S., dépend du temps et donc éxige une grande quantité de mémoire vive. Mais elle prédit mieux les zones de recirculation et les zones à proximité des parois. Elle est en voie de développement et promet de meilleurs résultats dans le domaine de la simulation numérique des fluides.

2.3 Les lois au voisinage des parois

Dans la section précédente (2.2.3), nous avons vu que le modèle $k-\varepsilon$ n'est pas valable pour les nombres de Reynolds faibles. Donc, au voisinage des parois on est obligé de faire de nouvelles hypothèses (voir fig. 2.1).

2.3.1 La loi de la paroi

Cette méthode utilise des formules spéciales pour la valeur de la vitesse, les paramètres de la turbulence dans ia couche limite formée au voisinage de la paroi. Elle considère que la région proche de la paroi est divisée en deux sous-couches :

- Une sous-couche laminaire où les effets visqueux sont considérables.

- Une sous-couche turbulente où les effets visqueux peuvent être négligés.

Les formules correspondant à cette méthode sont les suivantes :

$$u^+ = \begin{cases} y_p^+ & y_p^+ \leq y_m^+ \\ \frac{1}{\kappa}\ln(Ey_p^+) & y_p^+ > y_m^+ \end{cases} \tag{2.11}$$

où $u^+ = (v_p - v_w)/u_\tau$

v_p : Vitesse tangentielle du fluide

v_w : Vitesse du mur (de la paroi)

$u_\tau = (\tau_w/\rho)^{1/2}$

τ_w : Contrainte de cisaillement du mur, $\vec{\tau_w} = -\lambda\vec{v_p}$

$y_p^+ = \rho c_\mu^{1/4} k^{1/2} y_p/\mu$: Distance adimensionnelle du premier point du maillage P à la paroi

Dans un écoulement visqueux, la valeur de y_p^+ est située entre 12 et 800. Si les calculs effectués ne satisfont pas cette condition, le maillage considéré au voisinage de la paroi doit être raffiné et ceci doit être continué autant que cette condition soit satisfaite.

$\kappa = 0.42$, $E = 9.0$: Coefficients empiriques

ρ : Densité du fluide

$\lambda = \frac{\rho c_\mu^{1/4} \kappa^{1/2}}{u^+}$

y_n^+ satisfait l'équation suivante : $y_n^+ - \frac{1}{\kappa}\ln(Ey_m^+) = 0$

La valeur de E est uniquement pour une paroi lisse. Dans le cas d'une paroi rugueuse u^+ varie avec y_p^+ d'après les relations suivantes :

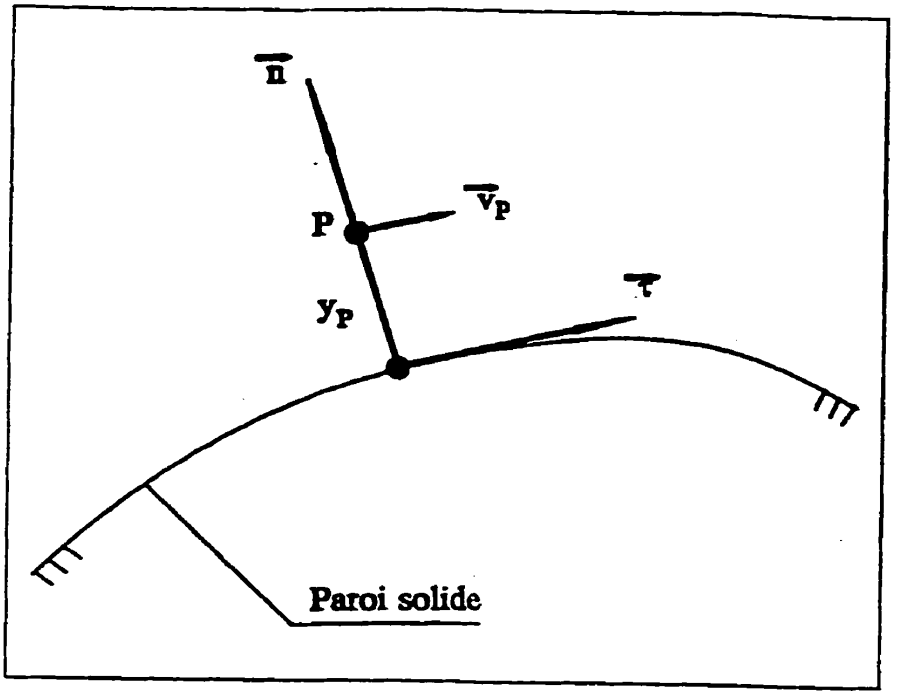


Figure 2.1: Schéma près de la paroi

$$u^+ = \begin{cases} y_p^+ & y_p^+ \leq y_m^+ \\ A + \frac{1}{\kappa} \log \frac{y_p^+ - D^+}{B + CR^+} & y_p^+ > y_m^+ \end{cases} \tag{2.12}$$

$$D^+ = \rho c_\mu^{1/4} k^{1/2} \frac{D}{\mu} \tag{2.13}$$

$$R^+ = \rho c_\mu k^{1/2} \frac{y_o}{\mu} \tag{2.14}$$

A, B, C sont des constantes, D est l'épaisseur du déplacement et y_0 est la hauteur équivalente de la rugosité. y_m^+ dépend de la hauteur. Pour un mur complètement rugueux la valeur de $y_m^+ = 0$. Les valeurs des constantes dépendent de l'écoulement et du type de rugosité.

Pour les paramètres de la turbulence

$$k^+ = c_\mu^{-1/2} \quad \varepsilon^+ = c_\mu^{3/4}/k \tag{2.15}$$

2.3.2 Méthode à deux couches

Cette méthode est suivie de la formulation algébrique du modèle à une équation pour la couche intérieure :

Ce modèle comme le modèle précédent subdivise le domaine de calcul en deux zones ; la zone au voisinage de la paroi solide et la zone à l'extérieur de celle-ci. Dans la dernière zone le modèle $k - \varepsilon$ est utilisé pour trouver la valeur de k au voisinage de la couche interne et la condition frontière pour celle-ci.

Dans les modèles à une équation on calcule k dans la zone interne à partir de l'équation normale du transport. Dans ce modèle une fonction du coefficient de viscosité turbulente f_μ est définie qui prend la valeur de zéro sur la paroi et qui atteint la valeur 1 où l'effet de la viscosité devient négligeable. Différentes personnes comme Norris et Reynolds (1975), Wolfstein (1969), Hassid et Poreh ont donné des fonctions empiriques pour calculer ce facteur. Ce facteur est utilisé pour relier les deux modèles dans la région où l'effet visqueux devient important. Ce modèle est plus efficace dans la plupart des cas, mais souvent demande un maillage plus raffiné. Donc, dans les cas où les disponibilités informatiques sont limitées ou bien dans les cas des calculs préliminaires, cette méthode n'est pas conseillée.

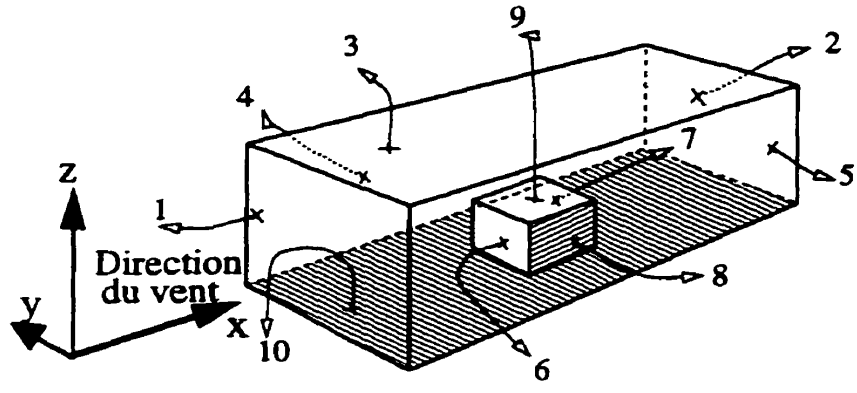


Figure 2.2: Schéma du domaine et code des frontières

Dans l'étude présente la loi de paroi est choisie pour les mêmes raisons.

2.4 Les conditions frontières

La modélisation des conditions frontières du domaine d'étude de l'écoulement du vent autour d'un obstacle est très importante pour obtenir une modélisation physique de l'écoulement. Dans la simulation d'un écoulement autour d'un bloc, il existe 9 frontières qui doivent être spécifiées pour les calculs numériques. Ces frontières sont numérotées dans la figure ci-dessous (2.2).

2.4.1 Condition à l'entrée (frontière 1)

D'après les définitions de ce logiciel une entrée est un des types de frontière où les conditions de l'entrée sont imposées par l'utilisateur. Dans un fluide compressible subsonique l'option de "entrée" peut être utilisé en fixant la vitesse ou le flux de la masse. En fixant le flux de la masse, on peut obtenir la densité à l'entrée par extrapolation des calculs de la pression de l'intérieur. Dans l'étude présente on a fixé

la valeur de la vitesse.

Dans l'entrée on a :

$$\begin{cases} u = u_{\text{entrée}} \\ v = v_{\text{entrée}} \\ w = w_{\text{entrée}} \end{cases} \tag{2.16}$$

Dans la présente étude, comme l'écoulement a une nature turbulente, le modèle $k-\varepsilon$ a été choisi pour la résolution du problème. Les valeurs de k et de ε à l'entrée ont été calculées par des formules empiriques utilisées dans la littérature.

Dans le cas des calculs pour le k et ε le profil "power law velocity" est utilisé. Pour la vitesse à l'entrée nous nous sommes servis de ce même profil pour la simulation du vent autour d'un cube et d'un profil uniforme pour le cas du stade. La relation est la suivante :

$$\frac{U(y)}{U_{ref}} = \left(\frac{y}{h_{ref}}\right)^{\alpha} \tag{2.17}$$

Où $U(y)$ est la composante de vitesse moyenne horizontale à une hauteur donnée y (en mètre) au dessus de la surface de la terre et U_{ref} est la vitesse moyenne horizontale du vent à une élévation de référence h_{ref}. L'exposant α est l'exposant moyen de la vitesse du vent qui dépend de la rugosioté du terrain à l'amont. Les valeurs de α pour les différents terrains sont données dans les différentes références, Scruton (1981).

La figure 2.3 montre la nature de cette variation pour la rugosité qui varie entre $1/n = 0$ (surface sans frottement) jusqu'à $1/n = .45$ (centre ville par exemple). La séléction de $1/n$ et du profil représentant un site spécifié provient des analyses empiriques développées par Davenport (1960) et Hanna (1969) .

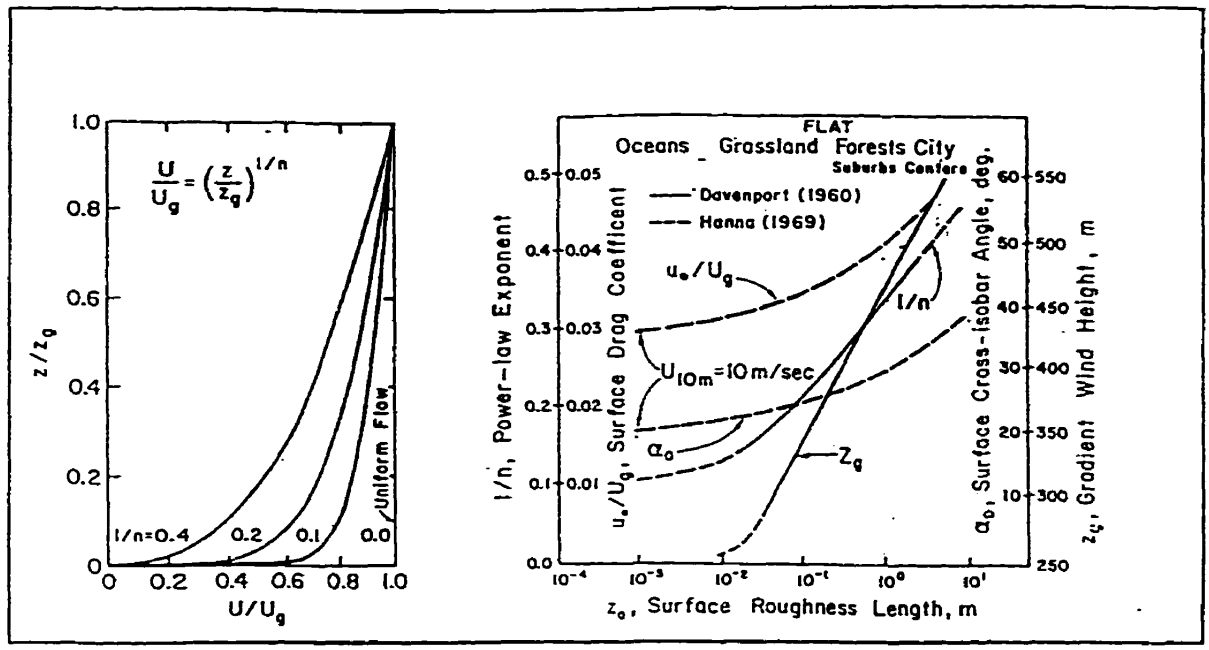


Figure 2.3: Caractéristiques des écoulements de vent dans les couches limites d'après Scruton (1981).

D'après la courbe 2.3 et en considérant que le cas du stade est approximativement entre milieux suburbains et centre-villes ("Forest suburbs" et "City Centers"), la valeur $1/n = .35$ a été choisie.

D'après Scruton la valeur de la longueur échelle longitudinale de la turbulence de l'atmosphère à l'entrée (L) est estimée par la relation suivante.

$$L(y) = 151(y/10)^{\alpha} \text{ (en système métrique)} \tag{2.18}$$

Dans ce cas la valeur de la dissipation de l'énergie turbulente est calculée d'après la relation suivante :

$$\varepsilon(y) = [c_D \rho k(y)^{1.5}]/L(y) \text{ (en système métrique)} \tag{2.19}$$

c_D est une constante qui est égale à 0.07, pour la turbulence atmosphérique en pleine échelle. Une relation empirique peut être utilisée pour calculer l'intensité de la turbulence $I(y)$ du vent à l'entrée.

$$I(y) = (6.7\kappa_s)^{1/2} u_{ref}/U(y) \quad \text{(en système métrique)} \tag{2.20}$$

Dans cette formule κ_s est le paramètre désignant la rugosité de la surface du terrain en amont.

La valeur pour l'énergie cinétique de la turbulence $k(y)$ au niveau de la rentrée peut être obtenue par la relation suivante :

$$k(y) = 0.5[I(y)U(y)]^2 \tag{2.21}$$

Les calculs sont effectués pour deux vitesses d'entrée différentes égales 10 m/s et 25 m/s

Dans les calculs du stade en supposant que $\alpha = 0.35$, et $y = 85$ m (à peu près le centre du mât).

$$\begin{aligned} L(y) &= 151(85/10)^{0.35} \\ &= 319.35m \end{aligned} \tag{2.22}$$

On suppose une intensité de turbulence égale approximativement à 15 % comme prévu dans plusieurs exemples dans la littérature (Stathopoulos et Zhou, 1997). Dans

ce cas :

$$\begin{aligned} k(y) &= 0.5[0.15 \times 10]^2 \\ &= 1.125\ m^2/s^2 \end{aligned} \tag{2.23}$$

et

$$\begin{aligned} \varepsilon(y) &= [0.07 \times 1.205 \times 1.125^{1.5}]/319.35 \\ &= 3.151715 \times 10^{-4}\ m^2/s^3 \end{aligned} \tag{2.24}$$

Dans le cas de $U(y) = 25$ m/s

$$\begin{aligned} k(y) &= 0.5[0.15 \times 25]^2 \\ &= 7.031\ m^2/s^2 \end{aligned} \tag{2.25}$$

et

$$\begin{aligned} \varepsilon(y) &= [0.07 \times 1.205 \times 7.031^{1.5}]/319.35 \\ &= 3.151715 \times 10^{-4}\ m^2/s^3 \end{aligned} \tag{2.26}$$

Puisque l'effet de la direction du vent doit être considéré dans tous les sens, alors différents calculs doivent être effectués en décomposant la vitesse du vent dans toutes les directions. Par la suite, l'effet critique de chaque cas doit être considéré pour la dernière décision.

2.4.2 Conditions à la paroi (frontières 6,7,8,10)

Dans les calculs présents, le modèle $k - \varepsilon$ standard couplé avec la loi de la paroi est utilisé. D'après la section 2.3, ce modèle utilise les équations du mouvement et de la continuité pour calculer k et ε dans tout le domaine sauf dans la zone à proximité

des parois dans laquelle l'effet visqueux de cette zone rend les calculs du modèle $k-\varepsilon$ classique inadéquats. Par conséquent, la loi de la paroi est utilisée, ce qui donne en général de bons résultats.

2.4.3 Plan de symétrie (frontière 3,4,5)

STAR-CD désigne un plan de symétrie ("Symetry plane"), comme étant une surface où la vitesse normale et les gradients normaux de toutes les autres variables sont nuls. Ce type de frontière est utilisé soit pour réduire le volume des calculs en plaçant la frontière le long de l'axe de symétrie de la géométrie et de l'écoulement, soit pour estimer un écoulement libre.

Dans les calculs présents, pour le problème du stade, les frontières autre que l'entrée et la sortie et les murs sont considérées comme étant des plans de symétrie. Mais, pour le cas du cube, les calculs sont répétés une autre fois, en considérant la frontière supérieure du domaine , comme étant une surface à pression constante égal à la pression atmosphérique ("pressure boundary"). Il est évident que pour pouvoir assumer cette condition, la distance entre le toit de l'obstacle et la frontière supérieure du domaine doit être assez grande. Sinon, une condition irréelle sera imposée, ce qui donnera des résultats éronnés.

2.4.4 Condition à la sortie (frontière 10)

D'après le code STAR-CD, la sortie est la section où le gradient de toutes les variables suivant les lignes du maillage qui intersectent la surface de la sortie est nul. C'est à

dire :

$$\frac{\partial u}{\partial n} = \frac{\partial v}{\partial n} = \frac{\partial w}{\partial n} = \frac{\partial k}{\partial n} = \frac{\partial \varepsilon}{\partial n} = 0 \qquad (2.27)$$

Tableau 2.1: Les différents modèles de turbulence proposés dans Star-CD

Modèle	Taux de dissipation turbulente	f_μ	Constantes
Norris et Reynolds	$\varepsilon = \frac{k^{3/2}}{l}\left(1 + \frac{C_\varepsilon}{Re_y}\right)$	$f_\mu = 1 - \exp\left(-\frac{1}{A_\mu} Re_y\right)$ $Re_y = \frac{\sqrt{k}y}{\nu}$ $l = \kappa C_\mu^{-0.75} y$	$A_\mu = 50.5$ $C_\varepsilon = 5.3$
Wolfstein	$\varepsilon = \frac{k^{3/2}}{l} \frac{1}{1-\exp\left(-\frac{1}{A_\varepsilon} Re_y\right)}$	$f_\mu = 1 - \exp\left(-\frac{1}{A_\mu} Re_y\right)$ $Re_y = \frac{\sqrt{k}y}{\nu}$ $l = \kappa C_\mu^{-0.75} y$	$A_\mu = 70.0$ $A_\varepsilon = 2\kappa C_\mu^{-0.75} = 5.1$
Hassid et Poreh	$\varepsilon = \frac{k^{3/2}}{l}\left(C_{D1} f_\mu + \frac{C_{D2}}{Re_l}\right)$	$f_\mu = 1 - \exp\left(-\frac{1}{A_\mu} Re_y\right)$ $Re_l = \frac{\sqrt{k}y}{\nu}$ $l = \kappa y$	$A_\mu = 34.48$ $C_{D1} = C_\mu^{0.75} = 0.164$ $C_{D2} = 0.336$

Chapitre 3

Solution numérique

Dans le chapitre 2 nous avons représenté les équations nécessaires pour présenter l'écoulement du vent autour d'un obstacle. Ces équations sont ensuite discrétisées et écrites sous forme d'équations algébriques.

Il existe plusieurs méthodes pour discrétiser les équations de Navier-Stokes. La méthode des différences finies (FDM), la méthode des éléments finis (FEM) et la méthode des volumes finis (VF) sont utilisées pour cet objectif.

Dans ce travail, le choix a été porté sur la méthode des volumes finis. Dans ce chapitre, nous décrirons brièvement cette approche.

3.1 La méthode des volumes finis

Dans la méthode des volumes finis, le domaine du calcul est divisé en volumes de contrôle. Le centre de chaque volume forme un noeud du maillage qui conserve la

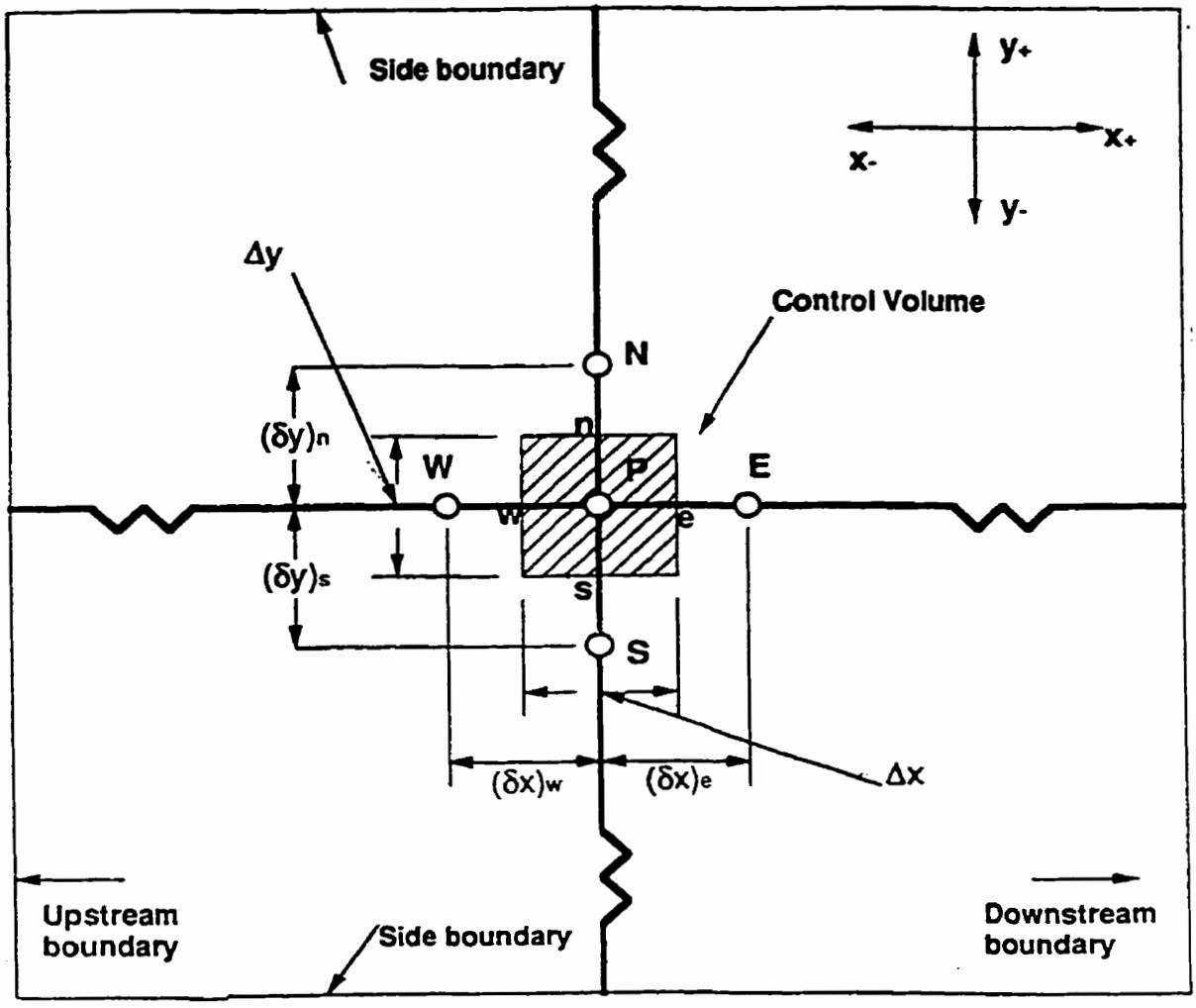


Figure 3.1: Schéma de discrétisation dans un plan horizontal

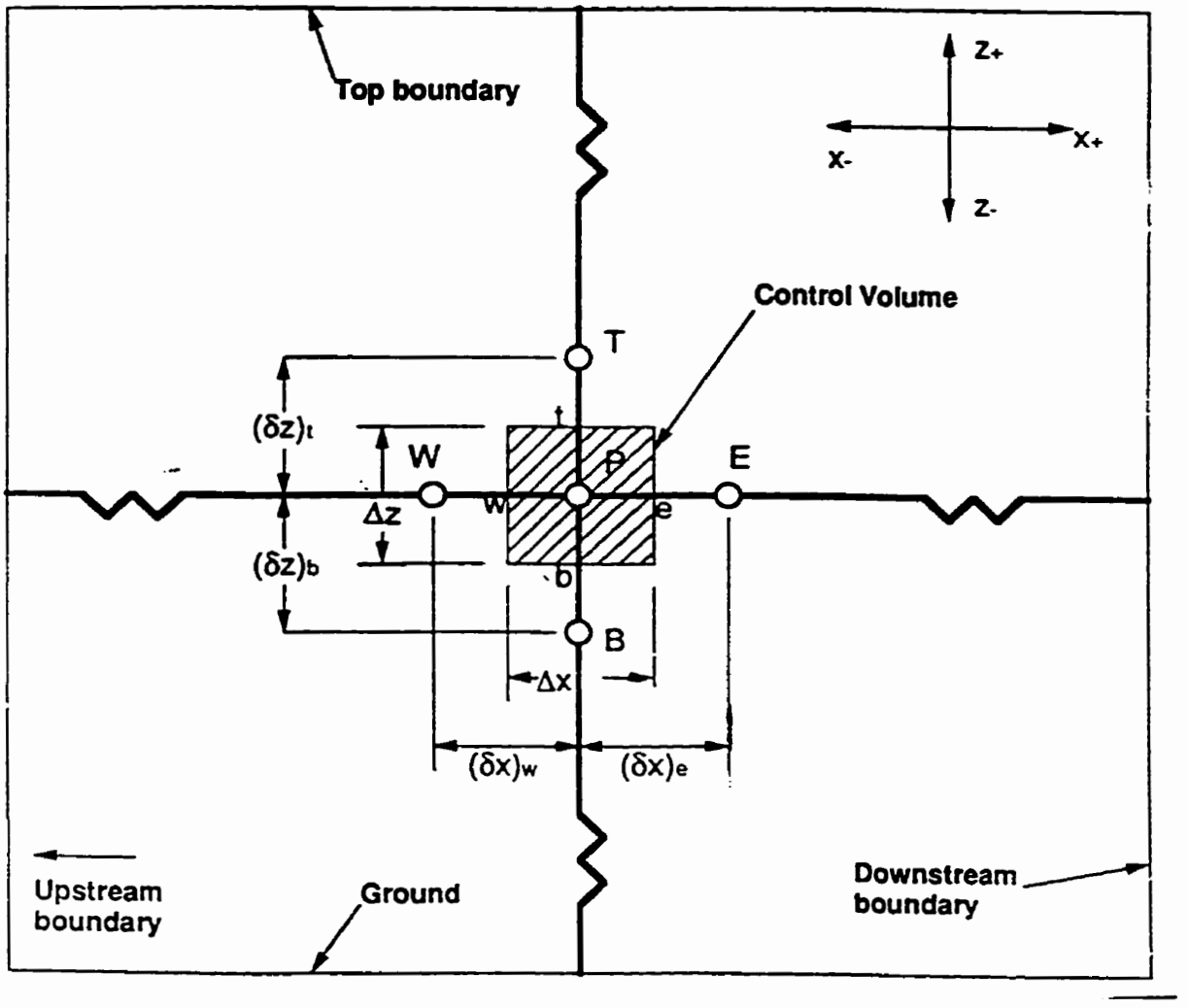


Figure 3.2: Schéma de discrétisation dans un plan vertical

moyenne de la quantité de la propriété de ce volume. La variation de la propriété entre deux cellules adjascentes est évaluée grâce aux différentes fonctions.

Pour expliquer la méthode des volumes finis regardons la figure 3.1. Dans cette figure P est le centre d'une cellule. E, N, W, S désignent les noeuds des cellules à droite, en haut, à gauche et en bas du noeud P. Sur ces quatre noeuds, les valeurs de k et ε et P sont calculées. Par contre, les valeurs de U, V, et W sont calculées sur les points e,w,n et s. Ces points sont situés à mi-chemin entre P et les points voisins E, W, N, S. Dans un domaine en trois dimensions la même procédure va être appliquée sur le plan XZ.

Cet arrangement du maillage, dans lequel les composantes de la vitesse sont calculées dans des points différents des valeurs scalaires, s'appelle le "maillage décalé". L'avantage d'un maillage décalé est que le découplage entre la pression et les vitesses est éliminé dû au décalage ainsi que dans ce type de maillage la spécification des valeurs de la pression dans les frontières n'est pas nécessaire, car on fait coïncider les frontières du domaine de calcul avec les noeuds où on calcule la vitesse .

Selon la nomenclature de Patankar (1980) la forme compacte de ces équations s'écrit sous la forme suivante :

$$a_P \phi_P = \left[\sum_{m=1}^{n_P} a_m \phi_m \right] + S_L \tag{3.1}$$

P est le noeud du maillage dans lequel ϕ est déterminé. m est le nombre de noeuds entourant le point P. a_i est un paramètre du schéma. S_L est le terme de source.

Pour l'équation du mouvement, le terme source correspond au gradient de la pression.

Par exemple, pour l'équation du mouvement unidimensionnelle du mouvement :

$$U\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\Gamma_\phi \frac{\partial u}{\partial x}\right) + S \tag{3.2}$$

le terme de source est :

$$S = -\frac{\partial p}{\partial x} \tag{3.3}$$

En trois dimensions, on a quatre inconnues, les trois composantes de la vitesse et la pression. Cependant, cette dernière n'apparait pas dans l'équation de la continuité. Pour résoudre ce problème, souvent on utilise un couplage de vitesse-pression du type correction en pression. Ici, nous présentons un résumé de cette méthode. Les détails peuvent être trouvés dans la littérature, Patankar [1980]

Fondamentalement, on considère les relations suivantes :

pression réelle = pression estimée + pression corrigée où $p = p^* + p'$

et vitesse réelle = vitesse estimée + vitesse corrigée

$$\begin{aligned} u &= u^* + u' \\ v &= v^* + v' \\ w &= w^* + w' \end{aligned} \tag{3.4}$$

où u^*, v^*, w^* sont des vitesses estimées et u', v', w' sont des corrections de vitesses de sorte que u,v,w satisfont l'équation de continuité de la masse.

Dans un domaine en trois dimensions l'équation généralisée pour la correction de la pression est écrite sous la forme suivante :

$$a_P p'_P = a_E p'_E + a_W p'_W + a_S p'_S + a_N p'_N + a_T p'_T + a_B p'_B + S_L \tag{3.5}$$

3.2 L'algorithme de la résolution

Il existe quelques algorithmes pour calculer les corrections pour les vitesses et pour la pression. L'algorithme utilisé dans nos calculs est celui de SIMPLE. Cet algorithme suit les étapes suivantes :

1- calcul de u^*, v^* et w^*

2- calcul des corrections sur la pression en résolvant :

$$u'_e = (p'_P - p'_E)d_e \tag{3.6}$$

et similairement

3- calcul de la correction des vitesses

4- mise à jour de la vitesse $u = u + \delta u$, $v = v + \delta v$ et $w = w + \delta w$

5- calcul de l'erreur et comparaison avec le critère de la convergence

6- fin des calculs si le critère est satisfait, sinon retour au départ

3.3 Présentation du logiciel STAR-CD

Les calculs effectués dans ce mémoire, sont faits à l'aide du logiciel commercial STAR-CD. À la connaissance de l'auteur de ce mémoire, ce logiciel n'a jamais été utilisé dans le domaine de l'ingéniérie du vent.

Cette section présente et décrit les capacités de ce code, de manière générale et dans le domaine de l'ingéniérie du vent.

STAR-CD a été écrit en Fortran 77, par une compagnie britannique nommée "computational Dynamic Limited". Essentiellement, il s'agit d'une application en volumes finis des équations de Navier-Stokes. Ce code a diverses domaines d'applications comme la résolution des écoulements des fluides, le transfert de la chaleur et de la masse dans différents domaines comme le transport, l'aérospatial, la marine, la production de l'énérgie(hydro-éléctrique, nucléaire, solaire...), la chimie, les batiments, l'environnement, le génie civil, l'éléctronique et éléctrique, les mines ...

Dans le domaine des écoulements des fluides, STAR-CD est appliquable à une gamme d'écoulements très variées. Il peut analyser des écoulements stationnaires et instationnaires, laminaires et turbulents en utilisant différents modèles. En plus, il résout tout écoulement compressible et incompressible incluant les écoulements transsoniques et supersoniques.

Typiquement, une simulation numérique comprends trois étapes :

1-La génération de maillage("pre-processing")

2-Le calcul CFD

3- La présentation graphique de la solution STAR-CD accomplit ces trois tâches.

Dans l'étape de "processing', ce logiciel génère le maillage. Il peut construire des mailles structurées et non-structurées. Les cellules qu'il crée peuvent avoir des géométries variées comme des hexahèdres, tetrahèdres et des prismes. L'une des importantes possibilités de ce logiciel est qu'il peut diviser les domaines avec des géométries complexes en géométries simples et mailler chacun de ces blocs simples en gardant la cohérence que doivent avoir les blocs entre eux. Cette méthode qui s'appelle le maillage multi-bloc a énormément fait évoluer le système du maillage des géométries complexes et a visiblement diminué le temps de calcul. Une autre possibilité dans le domaine du "processing" est le raffinement local du maillage dans les zones où il existe des changements rapides dans les forces, au voisinage des parois...

Le calcul procède de la manière suivante :

Au début, le logiciel prend la vitesse du vent avec un profil, soit uniforme ou non-uniforme. Puis, il récupère les conditions du terrain d'une part et les dimensions et la configuration de l'obstacle d'une autre part. Les conditions du terrain peuvent être exprimées par un facteur de rugosité propre à chaque topologie. Ensuite, en utilisant les conditions initiales de l'écoulement, le modèle de la résolution demandé pour la turbulence et les conditions frontières, les équations discrétisées sont résolues en se servant de l'un des différents algorithmes qu'il possède pour la résolution des équations et en utilisant l'approche du volume fini. Après la résolution des équations pour U,V,W,p,k,ε, les résultats sont présentés par des graphiques en 2D et 3D en utilisant des lignes de courants ou des vecteurs, ou bien des contours.

Chapitre 4

Le maillage du stade olympique de Montréal

La première étape pour un calcul numérique est la modélisation de l'obstacle en idéalisant sa géométrie, ensuite le choix d'un domaine d'étude et son dimensionnement, la conception des blocs du domaine d'étude et finalement la génération du maillage. Le but de ce chapitre est d'expliquer ces étapes :

4.1 La conception du domaine d'étude

L'étude du domaine de calcul et la topologie de l'environnement autour de l'obstacle est très importante. Parfois, dans l'ingéniérie du vent, la configuration d'autres structures aux alentours de l'obstacle peut être la cause principale des problèmes; par exemple : les couloirs entre les édifices. De plus, le relief et la couverture végétale du secteur étudié, peuvent changer les données du problème. Ces facteurs influencent le

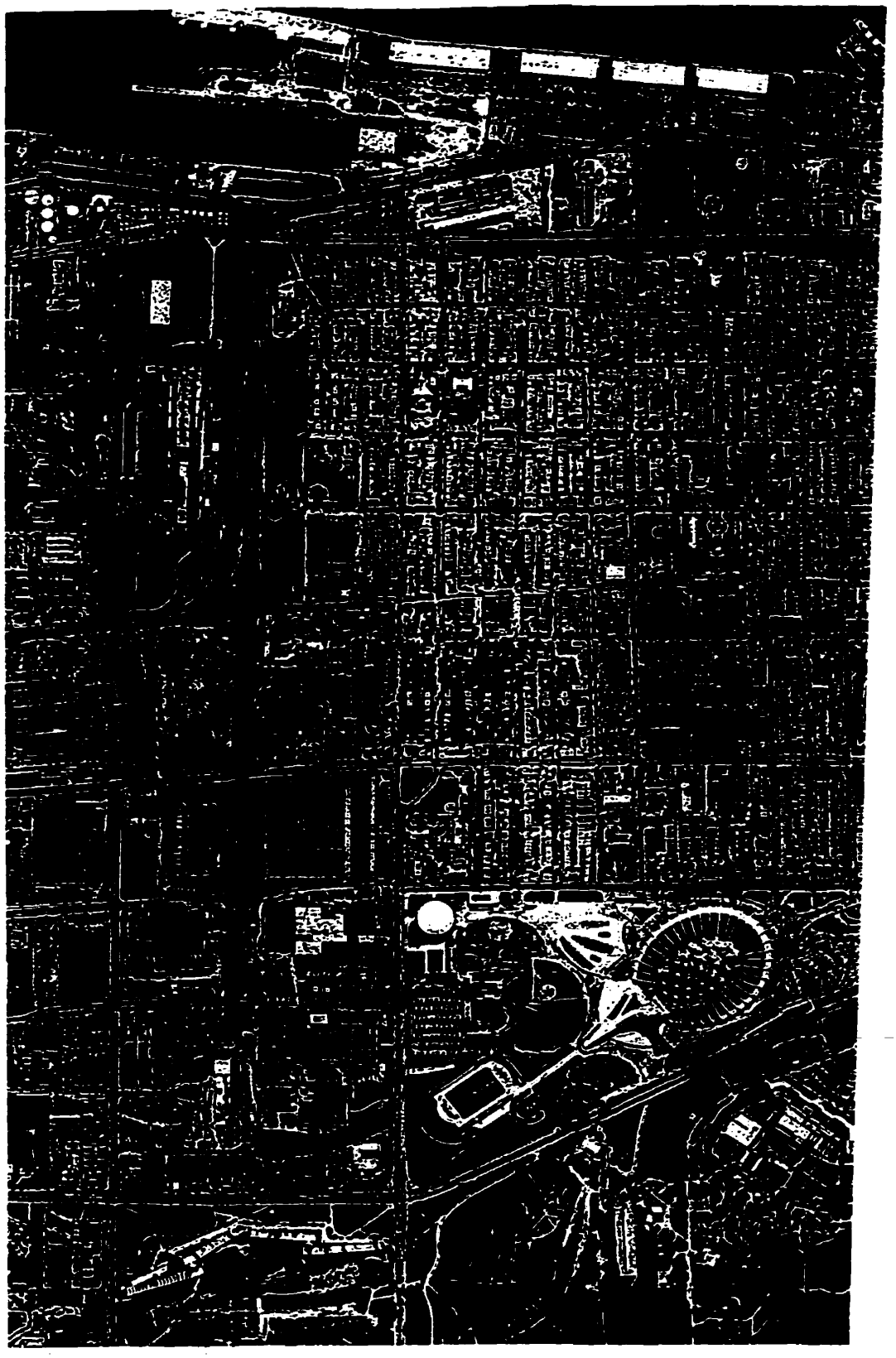


Figure 4.1: Vue aérienne du stade olympique

profil du vent et la rugosité du domaine.

Dans le cas du stade olympique, la structure est située dans le parc olympique, où elle est entourée par l'avenue Sherbrooke à l'Ouest, Viau au Nord, Hochelaga à l'Est et le boulevard PieIX au Sud (voir fig4.1). Le parc lui-même est situé dans une zone urbaine et possède sa propre topographie. En plus d'espaces vertes à l'intérieur du parc, il existe d'autres structures comme le Biôdome, l'Insectarium, le Jardin Botanique, etc...

Dans une première étude, tous les dénivellements dûs à la topographie du secteur et les structures aux alentours vont être ignorés, mais ceux-ci vont être remplacés par une "rugosité intensive" et, de même, tous les paramètres désignant la rugosité, qui vont servir pour calculer les valeurs de k et de ε, correspondront à une situation "très" rugeuse.

Pour les géométries simples, les dimensions du domaine de calcul sont données en fonction de la hauteur par des règles empiriques, définies selon l'expérience de l'ingénieur. Dans les géométries complexes, il est conseillé de commencer par un domaine avec des dimensions calculées par les règles empiriques, puis de répéter au moins trois fois les calculs en changeant une seule dimension à chaque fois et pour un côté. Lorsque les résultats deviennent indépendants de la dimension de ce côté, on conserve celle-ci. Dans nos calculs, nous avons pris la taille du domaine aussi généreuse que possible. La raison pour ceci est que, comme la taille des éléments vers l'extérieur du domaine d'étude est plus grande, le nombre de noeuds augmente peu ; en fait, ce qui influence beaucoup le nombre des noeuds est le raffinement au voisinage des parois.

4.2 La géométrie de l'obstacle

L'étude géométrique de l'obstacle a une grande importance dans les calculs. Un ingénieur en aérodynamique doit pouvoir étudier attentivement la géométrie de l'obstacle et de son environnement afin de l'idéaliser pour la modélisation et les calculs. L'idéalisa-tion dépend beaucoup de l'objectif du travail. Dans les études préliminaires, on peut être indulgent pour les détails. Mais, plus les études avancent, plus elles demandent des informations détaillées.

Pour générer la géométrie du stade, nous avons utilisé des fichiers donnant les coordonnées des points. Ceux-ci ont été fournis par la régie des installations olympique sous forme des fichiers d'excel. Ces fichiers ont été modifiés afin d'idéaliser la géométrie pour nos calculs.

Dans le calcul d'une structure comme le stade olympique de Montréal, la modélisation de l'obstacle a une importance cruciale. Elle doit être faite de telle manière que si la géométrie complexe est simplifiée, celle-ci garde les dimensions principales.

Le stade et le mât sont installés sur une superficie approximative de 300 × 420 m. La géométrie est composée du mât avec une hauteur d'environ 175 m et une base trapézoidale ($L \sim 130m$, $l \sim 6m$, $h \sim 275m$). Le stade lui-même a une hauteur d'environ 75m, et comprends 38 consoles dont leur plan est réparti sur la surface d'une ellipse (4.2). La répartition des consoles est symétrique par rapport à l'axe des ordonnées et l'origine des coordonnées est située sur le centre de l'ellipse. Le mât comprend des dénivellements sur sa surface. Le dénivellement important est le canal de l'ascenceur.

Comme nous avons mentionné au début, notre étude est une étude de faisabilité, donc

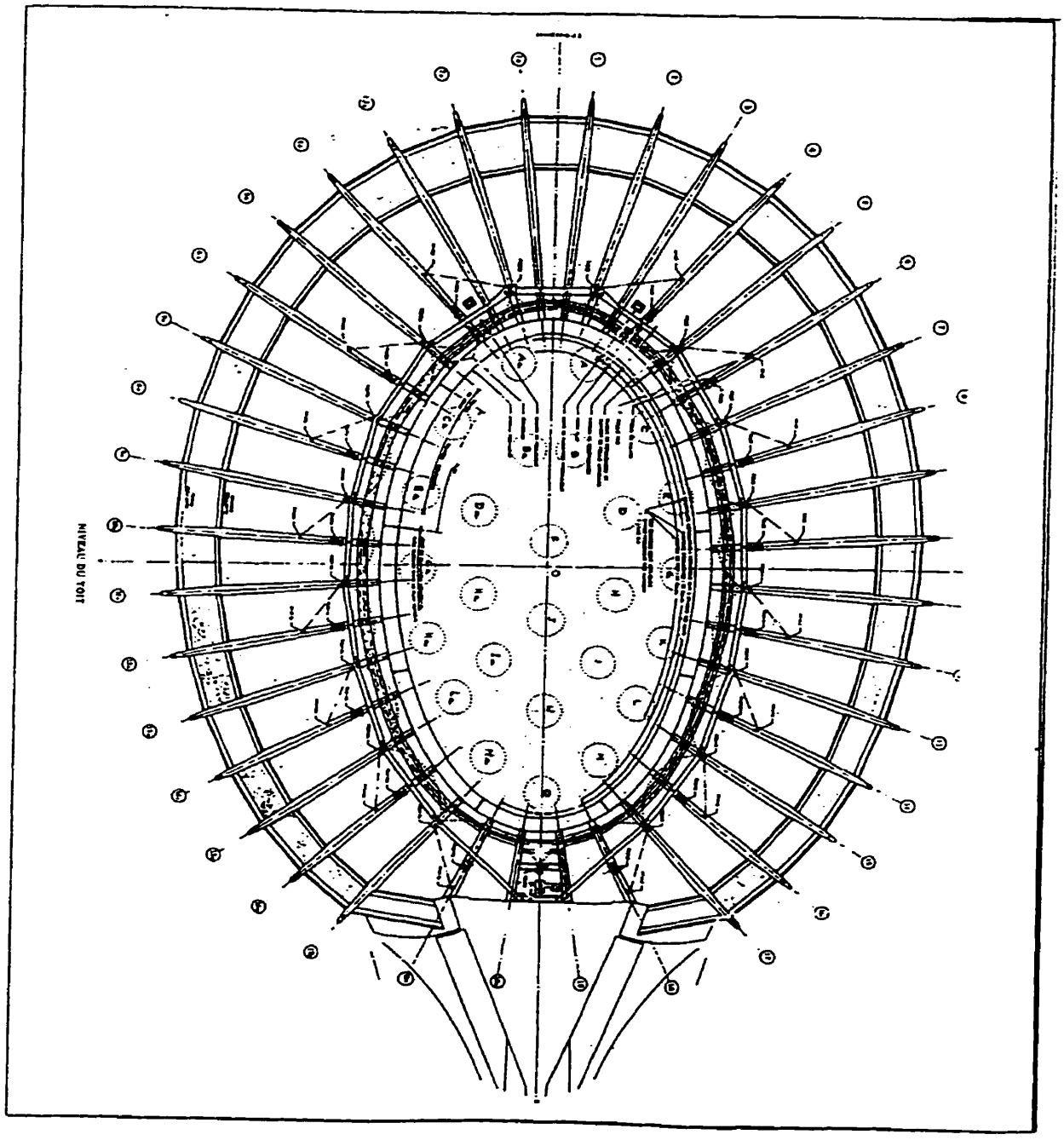


Figure 4.2: Plan du stade olympique

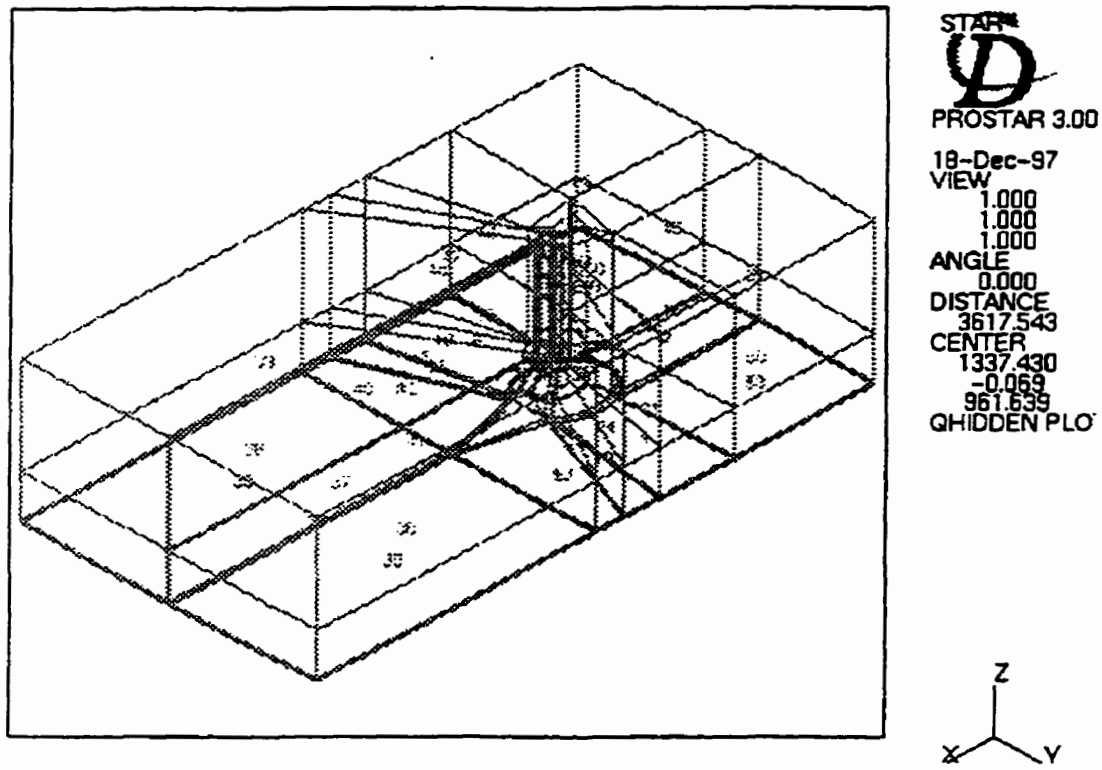


Figure 4.3: Vue des blocs construits autour de la structure mât+stade

dans une première étape, étant donné que nous avons ignoré les structures comme le Biôdome, l'Insectarium, et les dénivellements topologiques, nous allons éliminer aussi le stade lui-même pour nous concentrer sur le mât (toutefois, la géométrie et le maillage (fig.4.3 et 4.4) pour la combinaison stade+mât sont préparées par l'auteur et sont disponibles si nécessaire.) Le maillage de cette combinaison comprend 50 blocs qui sont raffinés au fur et à mesure qu'on s'approche de l'obstacle(1200000 cellules)

La figure 4.5 montre une coupe latérale du mât dans sa base. Pour un calcul préliminaire, la géométrie du mât est idéalisée en éliminant ou en ajoutant certaines lignes. Par exemple dans un premier calcul le canal de l'ascenseur est ignoré. Les deux arêtes au niveau de l'arrière du mât ont été extrapolées. Finalement, seulement quatre arêtes

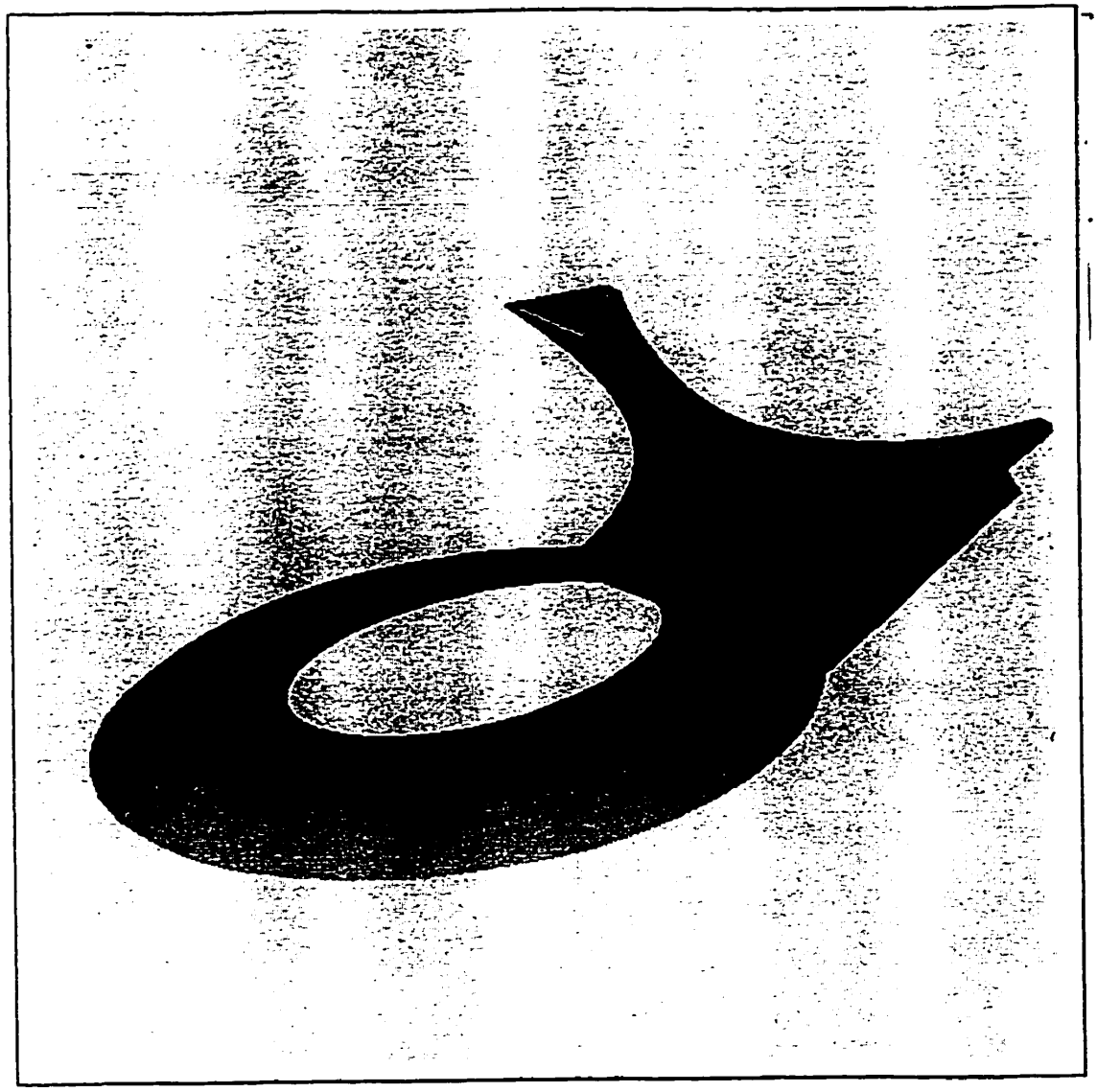


Figure 4.4: Géométrie idéalisée du stade olympique

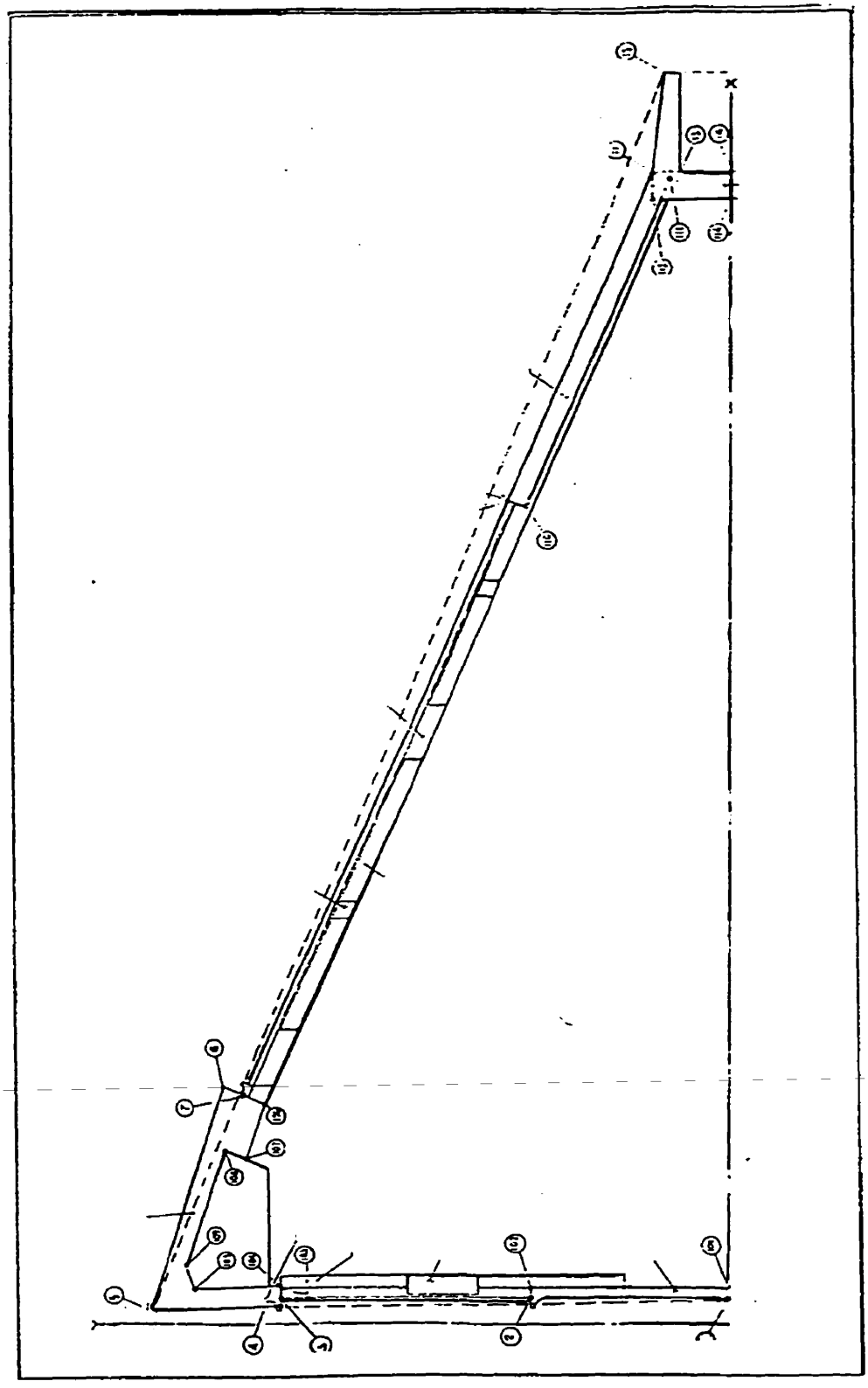


Figure 4.5: Section horizontale du mât du stade olympique

sont considérées pour la géométrie de la tour. Ces quatres arêtes sont considérées des courbes splines et le reste des arêtes intermédiaires est considéré comme des droites.

4.3 Conception des blocs

La troisième phase pour générer un maillage est la conception des blocs. Plusieurs choix sont possibles pour la conception des blocs. Comme nous avons mentionné auparavant, l'ingénieur doit pouvoir étudier attentivement la géométrie de l'obstacle afin de l'idéaliser pour ces calculs. Dans ce but, il doit penser à trouver le nombre optimal de blocs pour ses calculs. Cependant, le nombre minimal de blocs n'est pas toujours une bonne solution pour la simulation numérique. La raison est que la forme des blocs joue un rôle important dans l'exactitude des calculs. L'un des facteurs les plus importants dans l'exactitude des résultats est la discrétisation des équations. Pour réduire les erreurs de discrétisation, il faut éviter les angles trop obtus ou aigus et des formes trop tordues : En d'autres mots, un bon bloc est un bloc qui est plus proche d'un parallélipipède. Par conséquent, une bonne conception n'est pas forcément un nombre minimum de bloc, mais un groupe de blocs avec des formes ' acceptables'. Les blocs doivent être étanches, ceci veut dire qu'aucune fissure ne doit exister entre les blocs, sauf pour des frontières définies. S'il existe une distance entre les blocs, par défaut, le logiciel va considérer celle-ci comme un mur. D'autre part, les blocs ne doivent pas s'entre-couper. Ceci veut dire que deux côtés voisins de deux blocs doivent avoir tous les deux sommets de ce côtés en commun. Un autre point à remarquer est que les blocs doivent couvrir tout le volume à étudier.

Pour assurer l'étanchéité, et la régularité des blocs, le logiciel possède un détecteur

qui vérifie ceci et avertit de la présence des cellules critiques en les désignant par leur numéro. Le contour des trous dans le maillage est montré sous forme de mur.

4.4 La génération du maillage

La simulation numérique de l'écoulement du vent autour d'un obstacle, même très simple comme un cube, a besoin d'un maillage très bien construit afin d'obtenir des solutions acceptables. Dans le chapitre portant sur les modèles numériques de la turbulence, nous avons vu que le modèle $k - \varepsilon$ ne pouvait pas donner de bons résultats dans les zones où la valeur de la viscosité était élevée et donc, la loi de paroi, ou d'autres méthodes comme la méthode à deux couches, était nécessaire pour donner une bonne évaluation de différentes variables au voisinage des murs. Or, toutes ces lois ont besoin des maillages fins à proximité des parois. Dans nos calculs, pour raffiner la zone au voisinage des parois, nous avons divisé par deux la première couche des cellules au voisinage des parois dans les trois directions. Pour raffiner encore plus, nous avons continué la même méthode jusqu'à ce que le maillage obtenu soit acceptable. Nous allons décrire de façon plus détaillée les différents maillages que nous avons utilisés dans le cas de chaque calcul.

STAR-CD utilise la méthode transfinie pour la génération du maillage. Pour minimiser les erreurs de discrétisations, l'élancement des dimensions des cellules ne doit pas être trop grand et les angles doivent rester proches d'un angle droit. Dans le calcul présent, nous avons essayé de garder les angles entre 45 degrés et 135 degrés, et nous avons limité l'élancement des dimensions à 20. Il est de plus recommandé de garder une proportion raisonnable entre les dimensions des cellules voisines. Un saut important

entre les dimensions des cellules voisines peut causer la divergence des résultats ou au moins donner des résultats non physiques.

Chapitre 5

Validation du code

5.1 Introduction

La recherche dans la littérature, montre que les calculs effectués pour la simulation de l'écoulement du vent autour d'un obstacle n'ont jamais été faits à l'aide du logiciel STAR-CD. D'autre part, les différentes investigations confirment qu'aucun résultat de soufflerie ni de mesures en grandeur nature n'ont été publiés jusqu'à cette date pour la structure du stade. Par conséquent, nous devons nous assurer de la validatité des résultats obtenus avec ce code. Dans ce cadre, nous allons simuler l'écoulement du vent autour d'un cube, dans un domaine en forme de parallélipipède. Les conditions de calcul, vont être similiraires à celles de l'expérience de Castro et Robins(1977), qui est l'une des références les plus utilisées pour la validation des écoulements en 3D (voir aussi [Martinuzzi, 1992]). Dans la même étape, nous allons comparer les résultats avec les mêmes données, mais pour des calculs effectués avec un autre code commercial PHOENIX. Ces derniers calculs ont été réalisés par Delaunay et ses collègues (1995).

Bien que le cas du stade est différent du cube du point de vue de la forme et des dimensions, ces calculs seront quand même une bonne référence pour la comparaison des résultats obtenus dans le cas du stade.

5.2 Présentation des différentes simulations

5.2.1 Spécification du problème

L'une des expériences les plus utilisées pour la validation des codes dans le domaine de l'ingénérie du vent est celle de Castro et Robins (1977). Cette expérience consiste à étudier l'effet du vent dans une soufflerie sur un cube de 20 cm de côté. La direction du vent est normale à une face du cube et la vitesse du vent est 7.5 m/s à l'entrée et à la hauteur du cube. Le profil de la vitesse moyenne correspond à un profil logarithmique de vitesse avec des conditions de turbulence faible et pour une hauteur de déplacement d de 2 cm et une longueur de rugosité z_0 de 4 mm. D'après Castro et Robin(1977) :

$$\frac{U}{U_n} = \frac{1}{\kappa} \ln\left(\frac{z-d}{z_0}\right) \tag{5.1}$$

D'après les données ci-dessus, nous pouvons voir que le nombre de Reynolds a une valeur approximative de $Re = (7.5 \times 1.02 \times .2) \times 10^5 = 1.53 \times 10^5$,et l'écoulement est supposé turbulent dans tout le domaine.

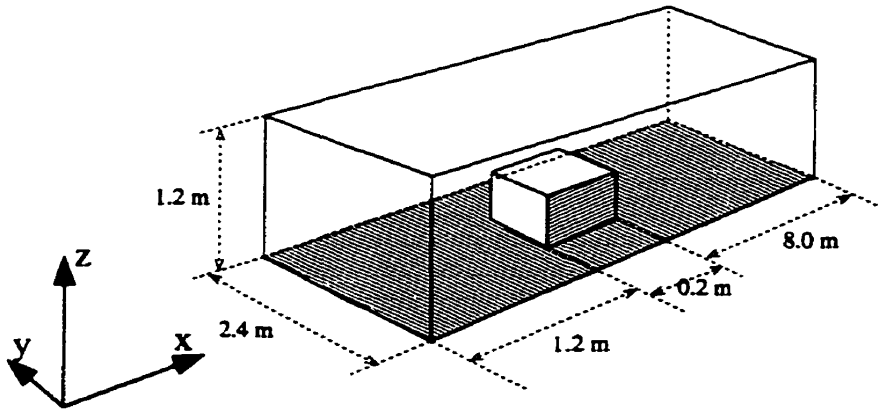


Figure 5.1: Dimensions du domaine de calcul

5.2.2 La simulation numérique effectuée par le code PHOENIX

Le domaine de calcul supposé par Delauney et ses collègues est montré sur la figure 5.1. Les paramètres employés pour la simulation ont été les suivants :

Le maillage a été de 50 × 41 × 21 noeuds respectivement dans les directions entrée-sortie, transversale et verticale. Le maillage est raffiné au voisinage des parois.

Les conditions frontières :

- Entrée : Dans l'entrée, le profil de la vitesse est considérée à avoir une forme logarithmique donnée par la formule (5.1). La valeur de la vitesse moyenne, l'énergie et le taux de la dissipation correspondent bien à une couche limite avec une hauteur de rugosité 4 mm et une hauteur de déplacement de 2 cm. Les formules suivantes sont utilisées pour le calcul de k et ε :

$$k = \frac{U_*^2}{\sqrt{C_{mu}}} \tag{5.2}$$

$$\varepsilon = \frac{U_*^3}{\kappa z} \tag{5.3}$$

- Plan de symétrie : Les deux plans latéraux du domaine sont considérés comme des plans de symétrie. Dans ce cas on considère que

$$\frac{\partial u}{\partial y} = 0\ ,\quad v = 0\ ,\quad \frac{\partial k}{\partial y} = 0\ ,\quad \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} = 0 \tag{5.4}$$

- Frontière à pression constante ("Pressure boundary") : La frontière supérieure du domaine , ainsi que la frontière à la droite sont considérées à avoir une pression fixe égale à la pression de l'atmosphère.

- Murs : Toutes les parois de l'obstacle, ainsi que le sol sont des murs où les composantes de vitesse sont nulles.

5.2.3 La simulation numérique effectuée par STAR-CD

Dans cette simulation, nous avons essayé au début de respecter la même géométrie avec le même maillage qu'à la section précédente. Pour les conditions frontières, au début, la frontière supérieure et les deux frontières latérales ont été considérées comme plan de symétrie. Dans ce cas, une "entrée" et une "sortie" complètent les conditions frontières. Dans un deuxième calcul, la sortie et la frontière supérieure sont remplacées par une frontière en "pression fixe" et nous avons considéré que sur ces deux plans la pression est égale à la pression ambiante. Le nombre de cellules dans le calcul a été considéré comme étant 43000. Deux autres calculs avec un maillage plus fin (342000 cellules) ont été effectués pour montrer l'effet du maillage sur les résultats

avec chacune des conditions frontières.

5.3 Discussion des résultats et comparaison avec les résultats expérimentaux

5.3.1 Description générale de la circulation autour du cube

Les figures 5.2-5.9 montrent les valeurs de l'intensité de la vitesse et les vecteurs de la vitesse aux niveaux $Z = .33H$ et $.66H$ et $.99H$ de l'obstacle. (H étant la dimension du côté du cube). D'après ces figures, nous pouvons voir de façon approximative, les variations de l'intensité et les vecteurs de la vitesse dans le domaine d'étude et sur le plan de symétrie. Comme on peut le constater sur les deux premières figures, le profil de la vitesse correspond au profil logarithmique à l'entrée et se conserve en amont de l'obstacle. En rencontrant l'obstacle, une partie de l'écoulement s'arrête devant celui-ci (zone de stagnation), et le reste dévie : une partie passe sur les côtés et une autre sur le toit de l'obstacle, où il se détache de la paroi. Les essais faits dans la soufflerie, par Lamberg (1973) montrent que la séparation de l'écoulement au niveau de l'arête du toit en amont cause une zone de recirculation qui se développe normalement dans différents cas, sur une distance de 2.5 à 3.5 fois la hauteur de l'obstacle. Dans nos calculs la longueur de la zone de recirculation a une valeur approximative de $3 \times H$. Ce point est défini comme étant le point où le rapport de la vitesse longitudinal à la vitesse de l'écoulement est quasiment nul (Vasilic-Melling, 1977). D'après Vasilic-Melling, l'épaisseur de la zone de séparation est définie comme étant la hauteur où ce rapport est égal à .75. Dans nos calculs, cette hauteur est approximativement située

aux environs de $2 \times H$. Ce résultat n'est pas loin du résultat de Robin et Castro(1977) qui est entre 2.5 à $3 \times H$.

Il est utile à ajouter que d'après les nouvelles études faites pour la comparaison de la méthode $k - \varepsilon$ couplée avec la loi de paroi et celle couplée avec la méthode à deux couches, la première ne donne pas la position précise du point de détachement. Nous en concluons donc que les résultats peuvent être améliorés en utilisant la méthode de deux couches pour la couche visqueuse.

En observant les figures 5.10 et 5.11 , nous remarquons que l'écoulement normal à la face frontale crée une zone de pression positive sur celle-ci. La valeur de cette pression atteint son maximum environ à 85% - 90% de sa hauteur et sa valeur minimale se situe au 25% de sa hauteur. L'écoulement en passant au-dessus du toit et au voisinage des faces latérales crée une zone de pression négative avec un gradient très élevé. Cette différence de pression cause une déviation des lignes du courant et la séparation de l'écoulement. L'arrière de l'obstacle reste toujours immergé dans une pression négative.

D'après les figures 5.2, 5.3, 5.5, 5.7 et 5.9 nous pouvons constater qu'il existe une zone de recirculation devant l'obstacle au niveau de la terre une autre à l'arrière, et finalement, deux autres sont produits sur les côtés, au voisinage du sol. Ceci est le phénomène de "Horse Shoe Vortex"qui est très connu dans la mécanique des fluides et qui se produit sur les deux côtés de l'obstacle. Un détachement se produit sur le bord du toit en amont.

En observant les figures 5.12 et 5.13 nous constatons que la valeur de la vitesse de l'écoulement est à peu près située entre 1.0 à 2.5 m/s dans les élévations de 2/3 et 1/3 sur la face frontale. Comme les valeurs montrées correspondent aux vitesses au

centre des cellules de la première couche, , celles-ci ne sont pas tout à fait nulles. Par conséquent, si le maillage était plus fin cette valeur diminuerait encore plus. La vitesse de l'écoulement augmente de valeur aux bords de la face frontale et diminue de valeur au centre du toit.

Les figures 5.14 et 5.15 montrent les valeurs de y^+ (distance adimensionelle du premier point du maillage à la paroi) sur la première couche de cellules sur la paroi. Cette valeur varie entre 20 et 820. Ceci est à peu près acceptable. La raison est que, d'après ce que nous avons étudié, dans la section se rapportant aux valeurs de y^+, la loi de la paroi n'est valable que dans la région visqueuse et transitoire. C'est à dire pour des valeurs de y^+ de moins de 500 environ. Comme ici, la région où la valeur de y^+ dépasse 500 n'est pas considérable, nous supposons que les calculs sont suffisants à ce niveau.

5.3.2 Comparaison des résultats expérimentaux et la simulation

À propos de cette analyse qualitative, on effectue une comparaison quantitative avec les résultats expérimentaux de Castro et Robins(1977). Le graphique 5.16 montre les variations de la composante U de la vitesse sur une distance $0.5 \times H$ (H : le côté du cube) derrière l'obstacle. Dans cette figure, la composante adimensionelle de la vitesse est donnée par rapport à l'élévation adimensionelle du domaine. Pour l'adimensionalisation, nous avons divisé l'élévation de chaque coupe par la valeur de la dimension de l'arête de l'obstacle (le côté du cube H). Pour la vitesse, elle est adimensionalisé en divisant la valeur de la vitesse U de l'écoulement par la vitesse au niveau de la frontière supérieure du domaine qui est égale à $10 \times H$ dans ce calcul.

Comme nous pouvons le constater, sur cette coupe, toutes les courbes suivent la même forme de variation ; c'est à dire après une diminution de vitesse jusqu'à une élévation d'à peu près $0.15 \times H$, la courbe commence à monter lentement jusqu'à une élévation $1.2 \times H$ et ensuite le gradient de la vitesse diminue de manière importante. Dans tous les cas, sous une élévation $0.75 \times H$, la vitesse a une valeur négative, ce qui traduit l'existance d'une zone de recirculation dans cette zone.

D'après ces courbes, nous voyons bien que les calculs effectués par les deux logiciels correspondent avec l'expérience. Surtout, sur une élévation entre $0.2 \times H$ et $0.6 \times H$, cette concordance est plus prononcée. Tous les résultats obtenus par les calculs ont une tendance à sous-estimer légèrement les valeurs de la vitesse dans cette coupe.

Finalement, on peut constater que le fait de changer de type de condition frontière ne change pas beaucoup les résultats.

La figure 5.17 montre les variations de la composante U de la vitesse sur une distance $1.5 \times H$ derrière l'obstacle. Nous voyons que sur cette coupe la valeur de la vitesse U est très proche de zéro. Ceci montre que nous sommes très proche du point de la séparation. Comme dans le cas précédent, la forme des courbes sont similaires : elles montent lentement jusqu'à une hauteur environ $1.3 \times H$, mais là s'arrête leurs croissance rapide et ils stagnent. Comme dans le graphique précédent, les calculs avec PHOENIX et STAR-CD ont tendance à s'approcher des résultats expérimentaux en en les sous-estimant toutefois.

Le graphique 5.19 montre la valeur de C_p suivant la ligne A (Voir la figure 5.18 pour l'identification des lignes).

Comme nous pouvons le constater, la valeurs de C_p est toujours positive sur cette

coupe. La raison est que l'écoulement est arrêté devant l'obstacle et la vitesse atteint une valeur égale à zéro (point de stagnation). Par conséquent, ceci résulte une zone de pression élevée. Cette pression atteint sa valeur maximale, dans toutes les courbes à environ $0.8 \times H$-$0.9 \times H$. Une grande chute de la pression se situe au niveau de la hauteur de l'obstacle où la vitesse atteint sa valeur maximale et peut se détacher de celle-ci. C'est à ce niveau que l'écoulement a tendance à avoir un mouvement circulaire et une force centrifuge est créée sur celui-ci. Une chute relative de la pression est aussi observée sur une hauteur de $0.2 \times H$-$0.4 \times H$ où le coefficient de la pression atteint une valeur approximative de 0.6-0.7. Au niveau du sol, la valeur de C_p varie entre 0.6 et 0.8.

D'après ce graphique, nous constatons qu'à peu près toutes les courbes, sauf une (courbe du calcul 4), correspondent assez bien aux résultats expérimentaux, mais sous-estiment la pression jusqu'à une élévation égale à $0.5 \times H$ et surestiment celle-ci dans les élévations plus grandes que cette hauteur.

Le graphique 5.20 montre la valeur de C_p suivant la ligne B. nous pouvons constater que les valeurs de C_p sur cette ligne sont à peu-près toutes négatives. Ceci implique que le toit est dans une zone de dépression. Ce phénomène, dans la réalité, menace dans la plupart des cas, les toits des batiments qui ne sont pas bien conçus ou construits. La valeur maximale de C_p se situe sur l'arête vers l'amont, ensuite elle baisse rapidement et atteint sa valeur minimale à une distance de 0. à $0.2 \times H$. Ensuite, cette valeur augmente, mais toutefois ne dépasse pas la valeur 0. Nous constatons que les courbes des résultats numériques sont assez loin des résultats expérimentaux, ceci peut se traduire en ce que la condition frontière supérieure du domaine n'est pas très réaliste, ou bien, comme nous avons déjà vu dans l'étude bibliographique, les résultats obtenus

par les calculs sur le toit de l'obstacle ne correspondent pas bien avec l'expérience de Robin et Castro(1977).

Le graphique 5.21 montre la valeur de C_p suivant la ligne C. D'après les courbes, nous pouvons voir toutes les courbes sauf une, ont des valeurs négatives suivant toute la longueur de la ligne. Dans toutes les courbes, il existe une faible variation de la valeur de C_p. Cette valeur, est située entre -0.25 et 0.05. Sur tous les courbes une hausse relative de C_p est observée au voisinage du sol. La concordance des résultats est relativement bonne.

Le graphique 5.22 montre la valeur de C_p suivant la ligne D. D'après les courbes, nous pouvons constater que toutes les courbes ont des valeurs négatives suivant toute la longueur de la ligne. Dans tous les courbes il existe une faible variation de la valeur de C_p. Cette valeur est située entre -0.35 et 0.

5.4 Conclusion

Pour avoir une idée de l'erreur des calculs numériques, nous avons calculé cette valeur pour C_p suivant différentes lignes A, B, C, D. Pour ce faire, nous avons choisi les courbes correspondant à l'expérience et le calcul 4, dont les conditions frontières sont semblables à celles du stade. Dans ce but, nous avons trouvé le rapport de la différence des aires sous les courbes à celle de l'expérience. D'après ces calculs nous trouvons un erreur de 54% pour la ligne A, 36% pour la ligne B, 14% pour la ligne C et 22% pour la ligne D. La table 5.1 montre la concordance des résultats obtenus dans les six graphiques avec les résultats expérimentaux. Nous désignons par B, les résultats qui

Tableau 5.1: Concordance et qualité des résultats de la pression et de la vitesse

Courbes	Graph. 1	Graph. 2	Graph. 3	Graph. 4	Graph. 5	Graph. 6
2	B	B	B	M	B	M
3	B	B	B	M	B	A.B
4	B	B	M	M	B	M
5	B	B	A.B	M	B	A.B
6	B	B	B	M	A.B	A.B

correspondent bien avec l'expérience, A.B., ceux qui correspondent assez bien, et, M ceux qui correspondent pas du tout.

D'après les résultats, nous pouvons voir que la concordance des courbes obtenues par les calculs est assez bonne. D'après les pointages données pour chaque cas de calcul, nous voyons que les calculs effectués ne sont pas très loin l'un de l'autre, mais, ceux faits avec la frontière supérieure comme étant à pression constante sont plus proches de l'expérience. En plus, nous voyons que les résultats d'aucun calcul ne s'approchent de l'expérience pour la zone au-dessus du toit. Ceci confirme les différents résultats que les autres chercheurs ont trouvé dans leur calcul et que nous avons cité dans l'étude bibliographique. Il existe d'autres raisons pour lesquelles les calculs ne correspondent pas exactement avec l'expérience. Ces raisons peuvent être les suivantes :

- Le modèle de la turbulence utilisé n'est pas très adéquat dans ce cas et les valeurs expérimentales pour k et ε sont inconnues, ce qui ajoute une incertitude concernant le modèle de turbulence.

- Les paramètres de la turbulence ne sont pas proches de la réalité.

- Les résultats expérimentaux ne sont pas suffisamment précis à cause des erreurs de

mesure.

Un autre point à remarquer dans les courbes est que le raffinement du maillage après une certaine limite n' influence pas les résultats. Dans ce calcul c'est le cas.

L'estimation de l'erreur est très importante dans un travail numérique. L'importance de l'erreur dépend du domaine dans lequel on travaille. Une erreur de 10% est une erreur très grave dans le calcul de la traînée d'une aile d'avion, tandis que l'ingéniérie du vent se contente de 25% d'erreur. Par conséquent, nous pouvons nous permettre de travailler à l'intérieur de cette marge d'erreur Ferziger(1990).

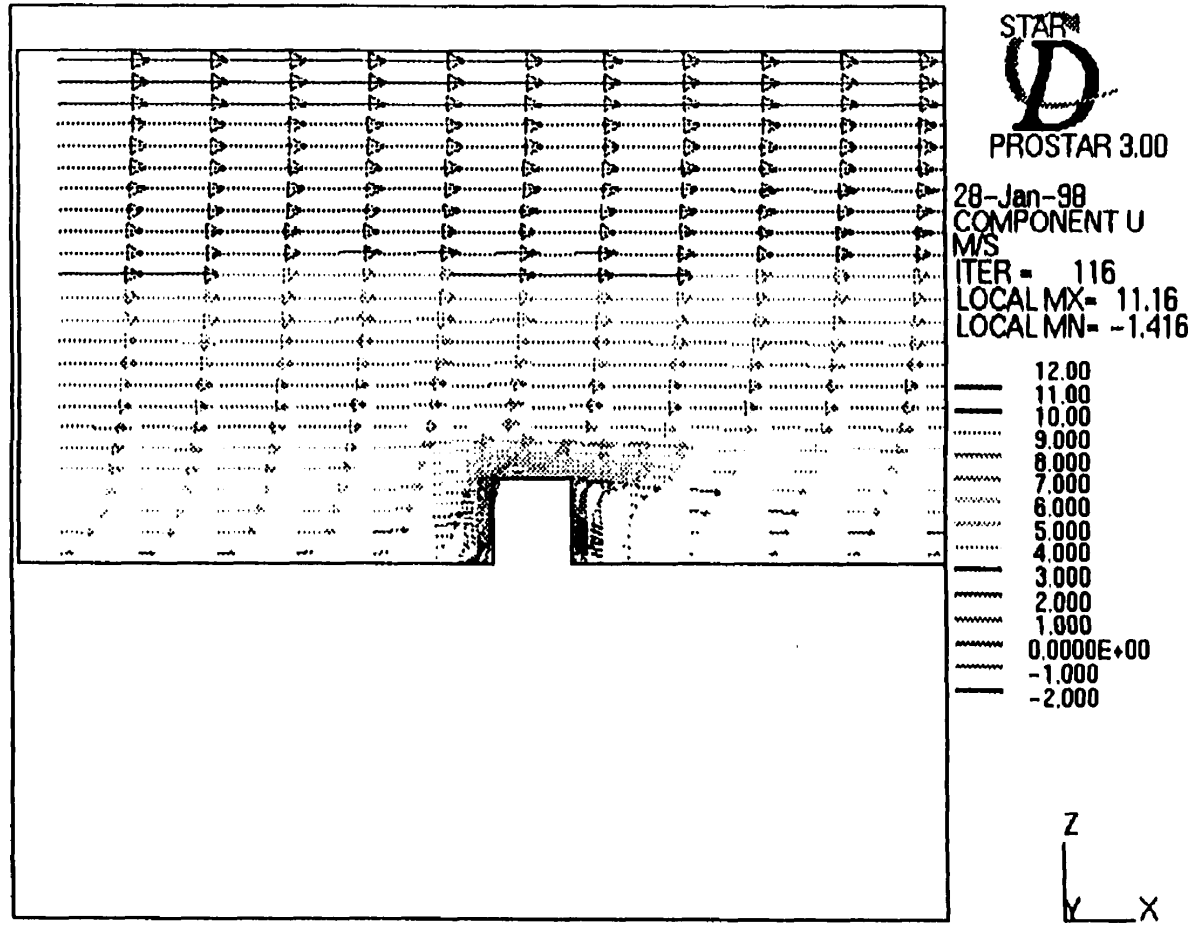


Figure 5.2: Vecteurs de la vitesse dans le plan de symétrie.

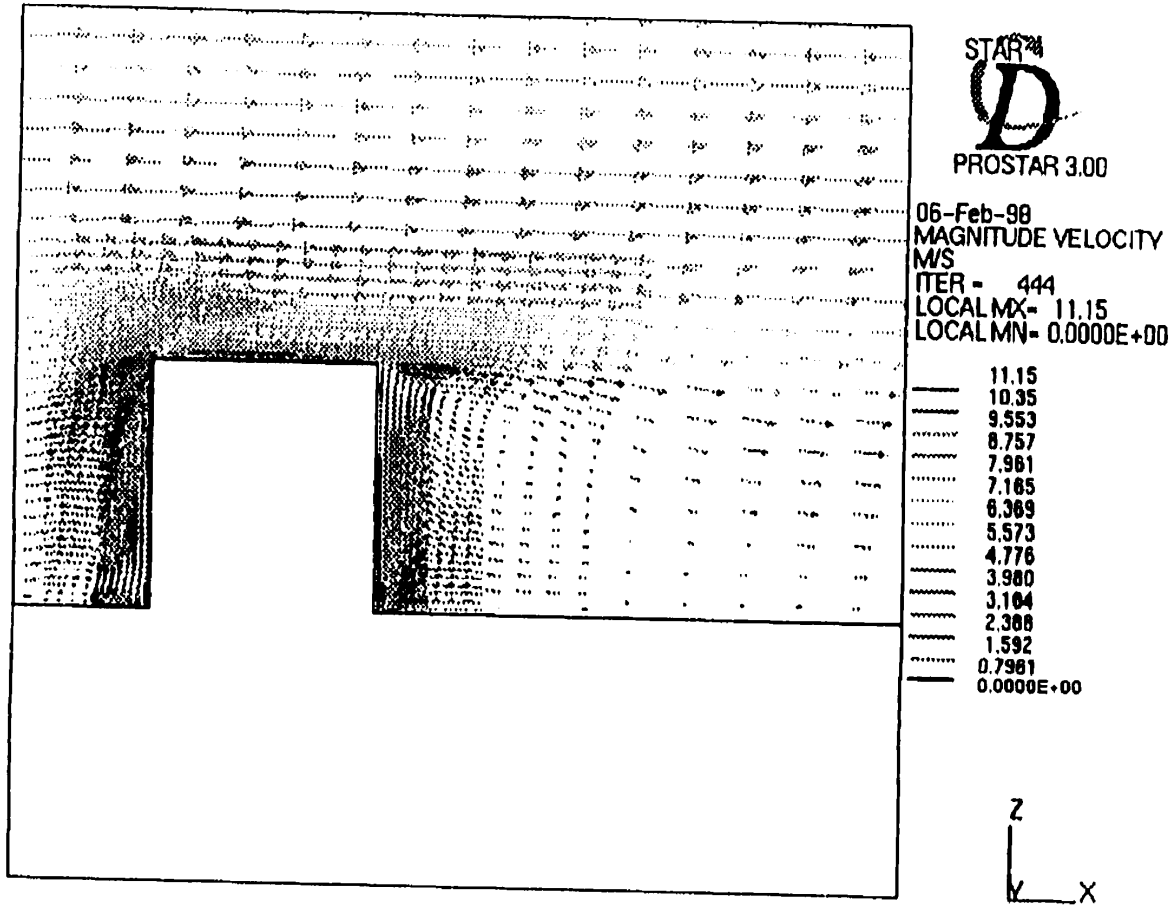


Figure 5.3: Vecteurs de la vitesse dans le plan de symétrie. Maillage fin, grossissement sur le cube.

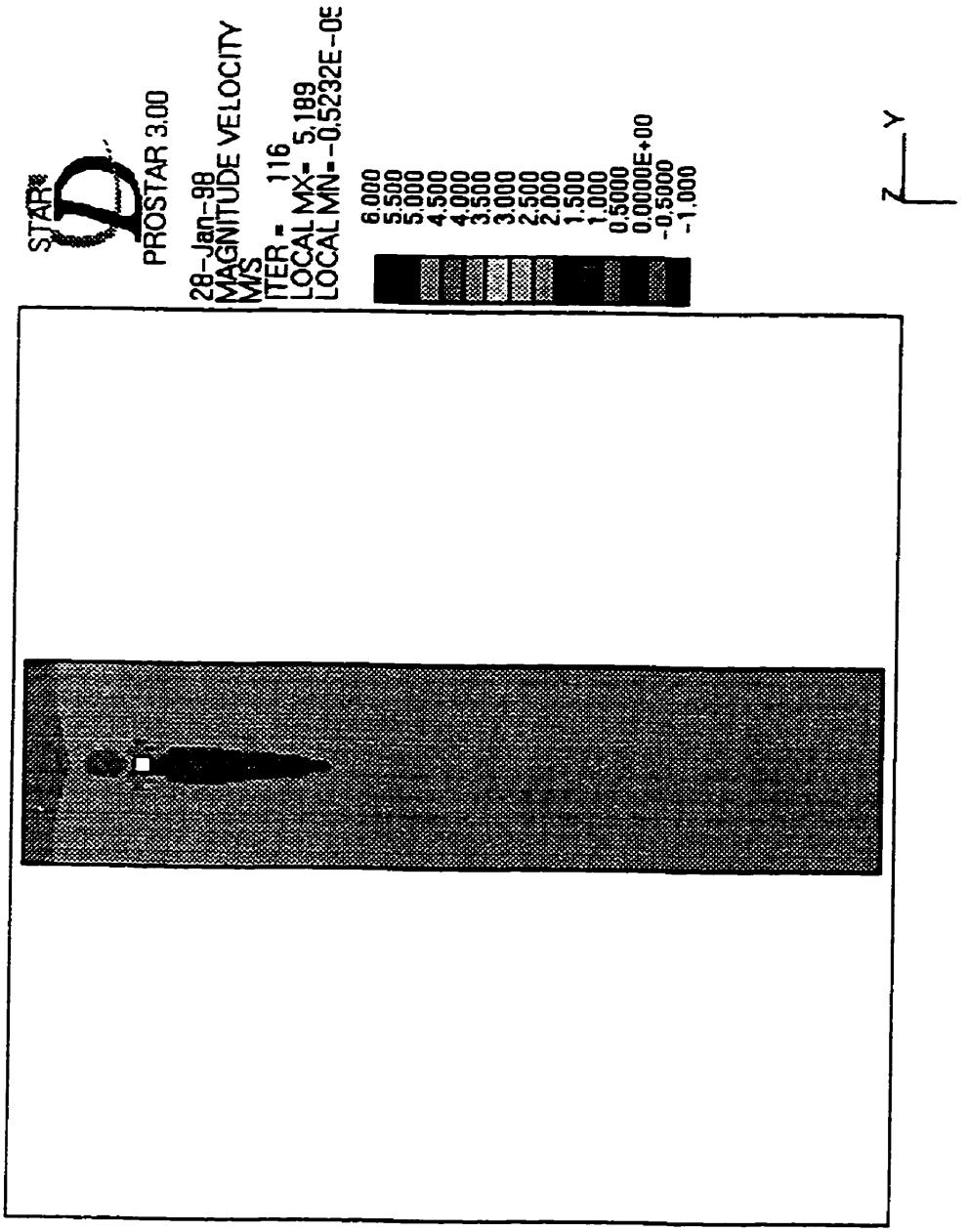


Figure 5.4: Intensité de la vitesse à $z = 0.33 \times H$

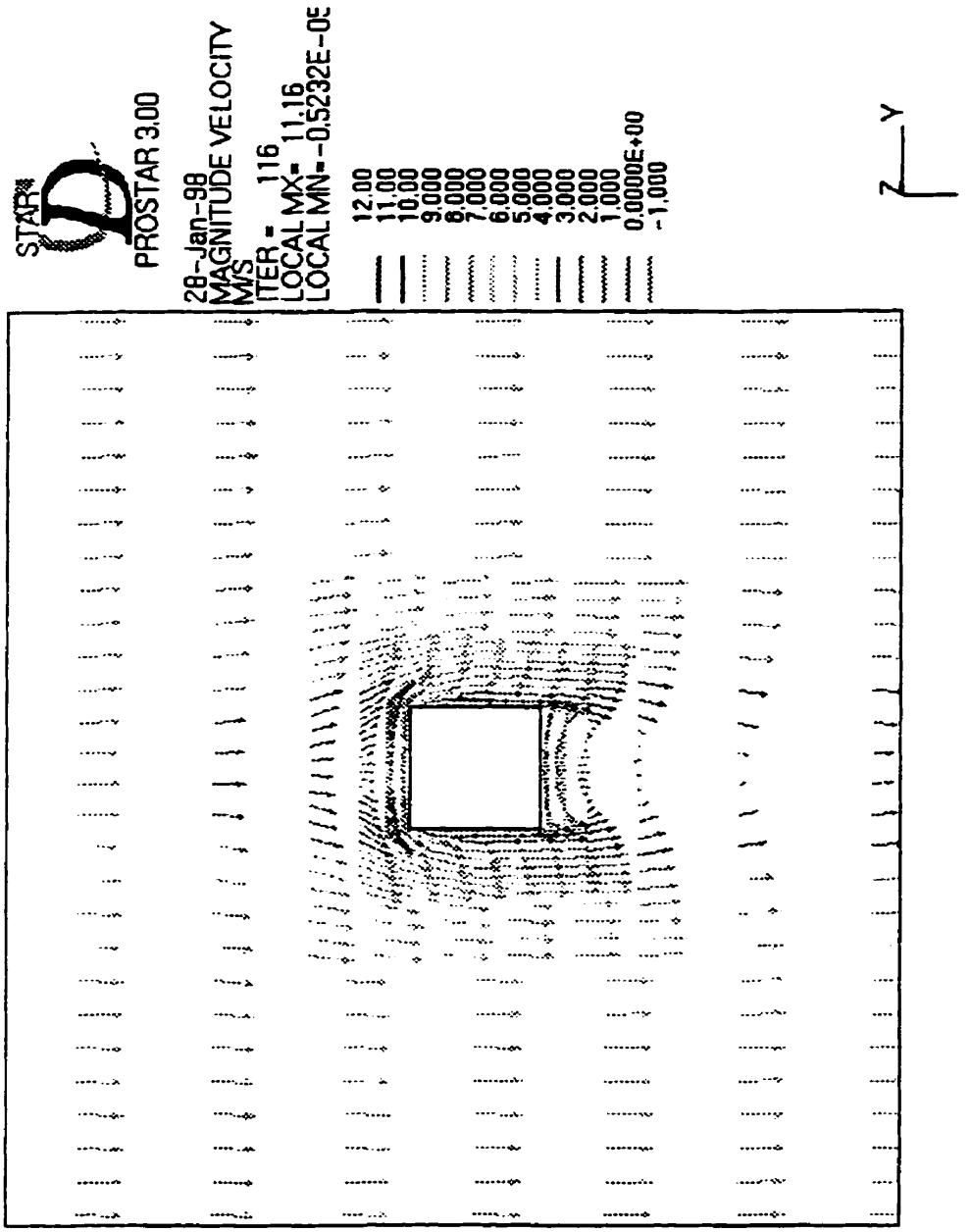


Figure 5.5: Vecteurs de la vitesse à $z = 0.33 \times H$

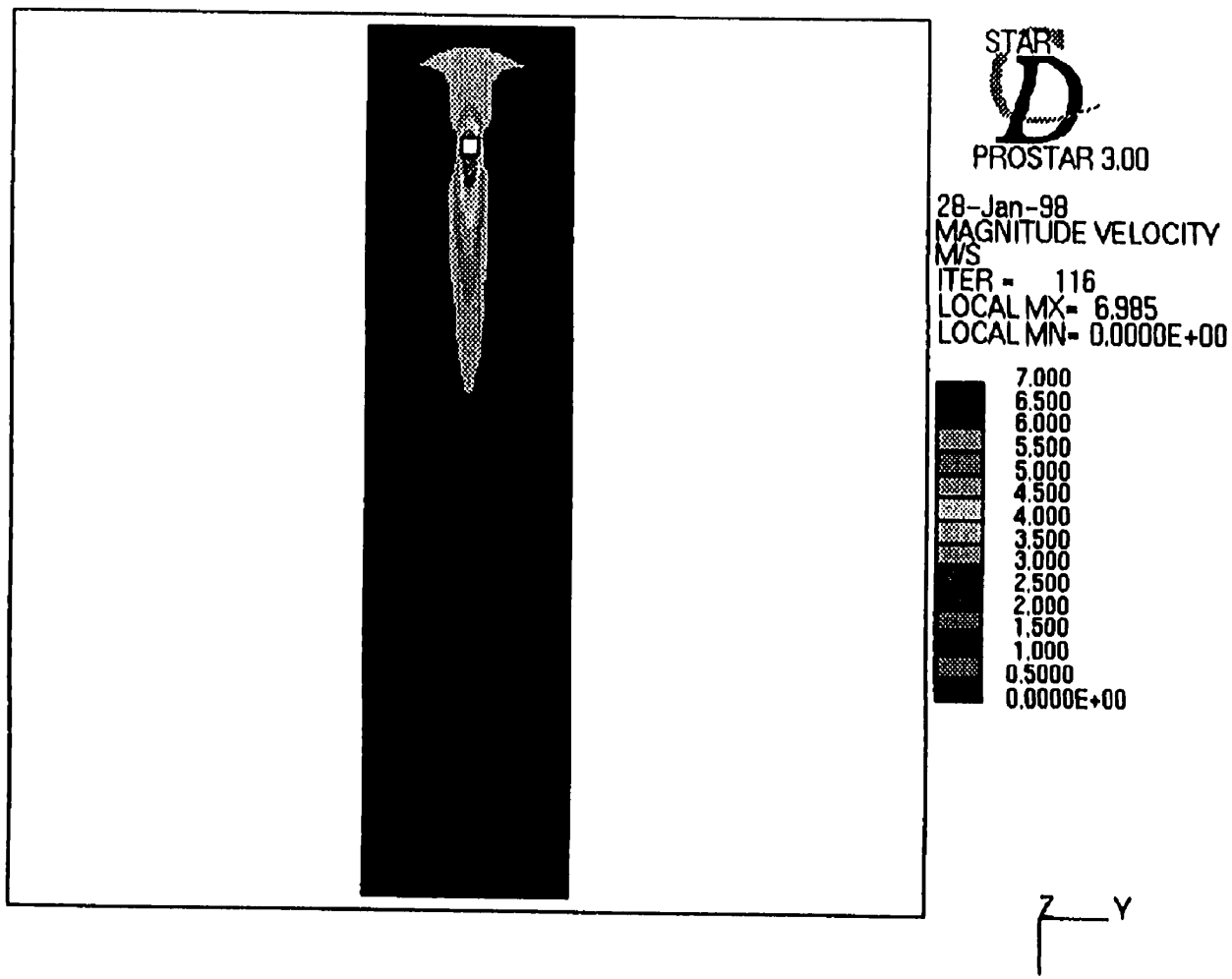


Figure 5.6: Intensité de la vitesse à $z = 0.66 \times H$

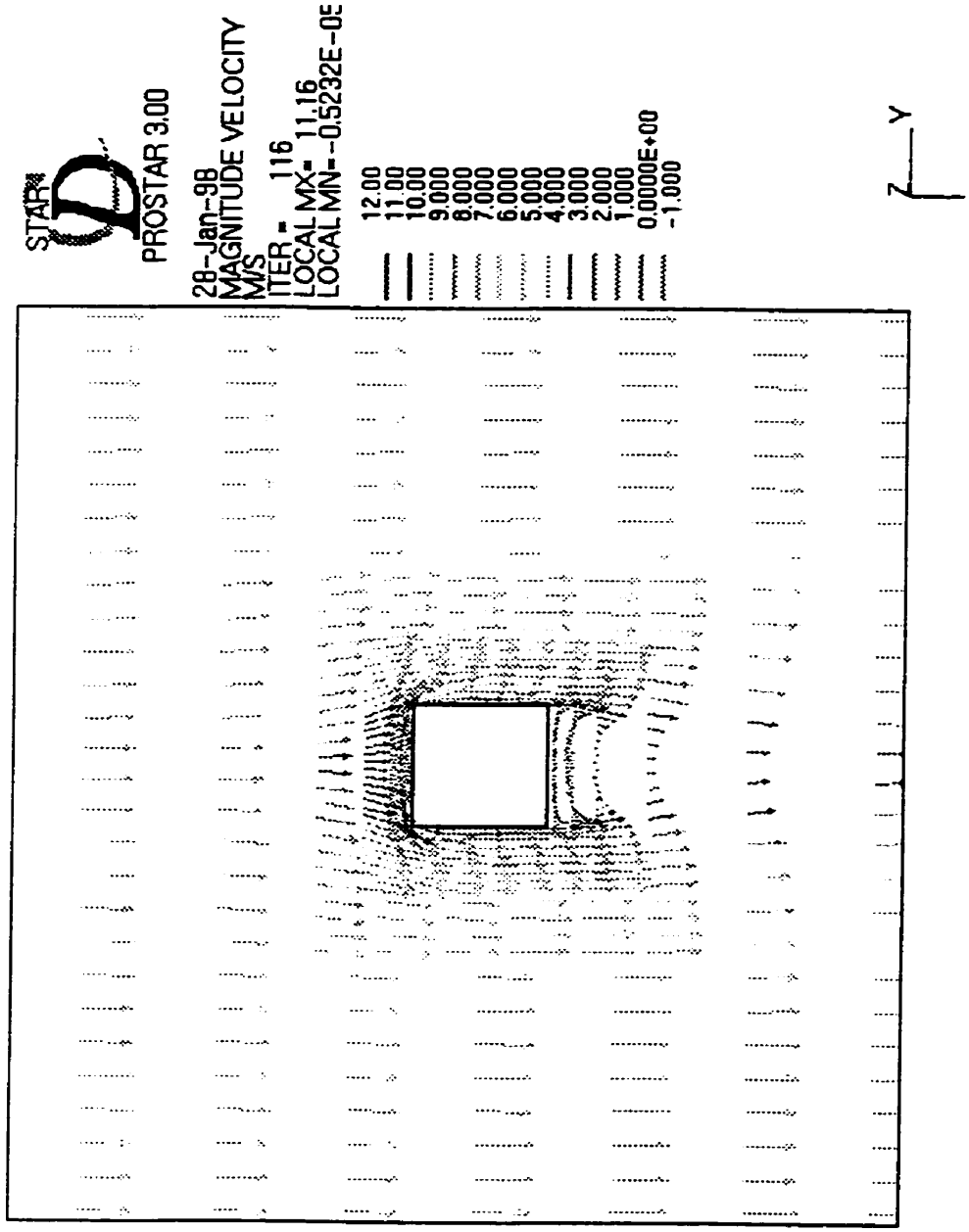


Figure 5.7: Vecteurs de la vitesse à $z = 0.66 \times H$

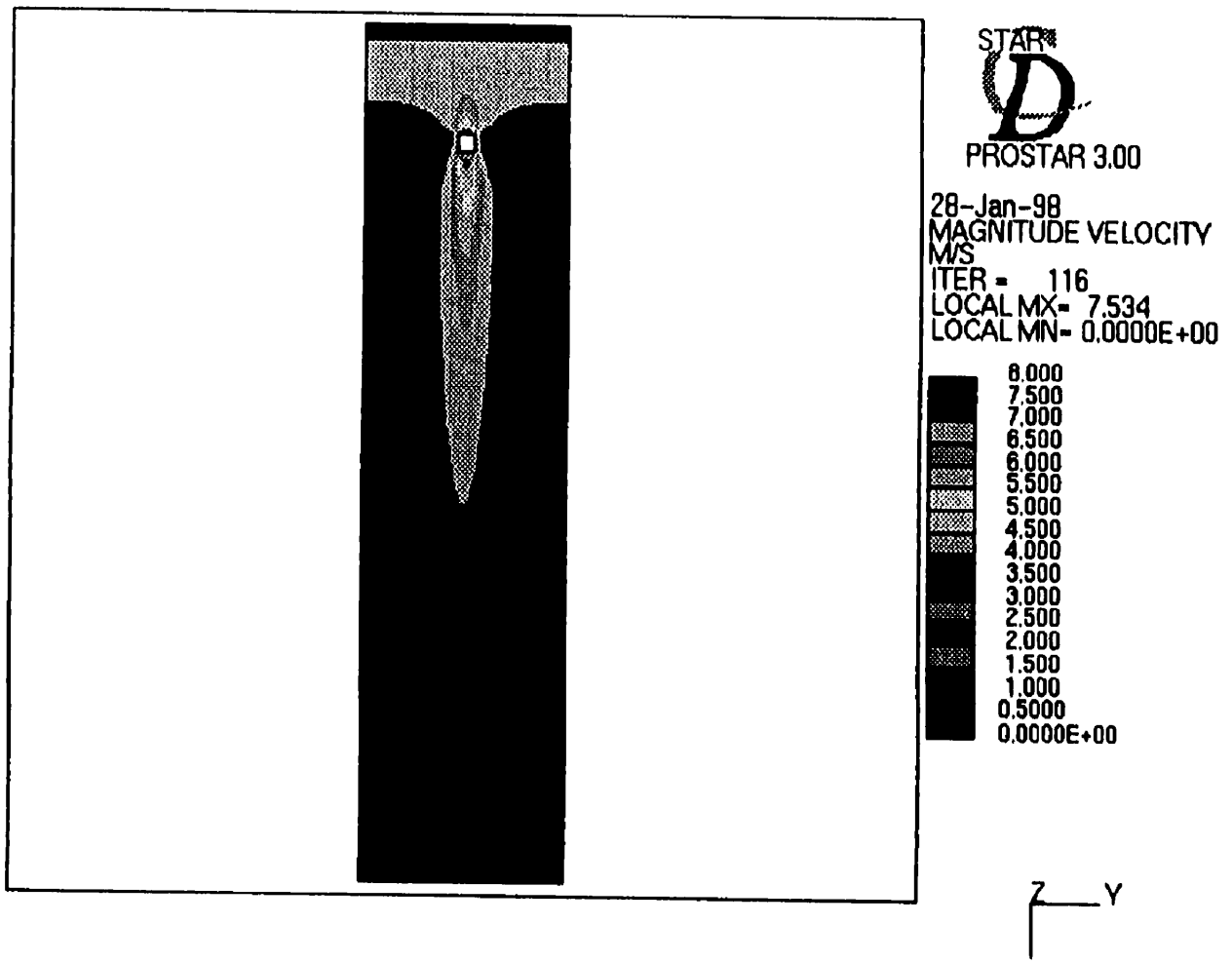


Figure 5.8: Intensité de la vitesse à $z = 0.99 \times H$

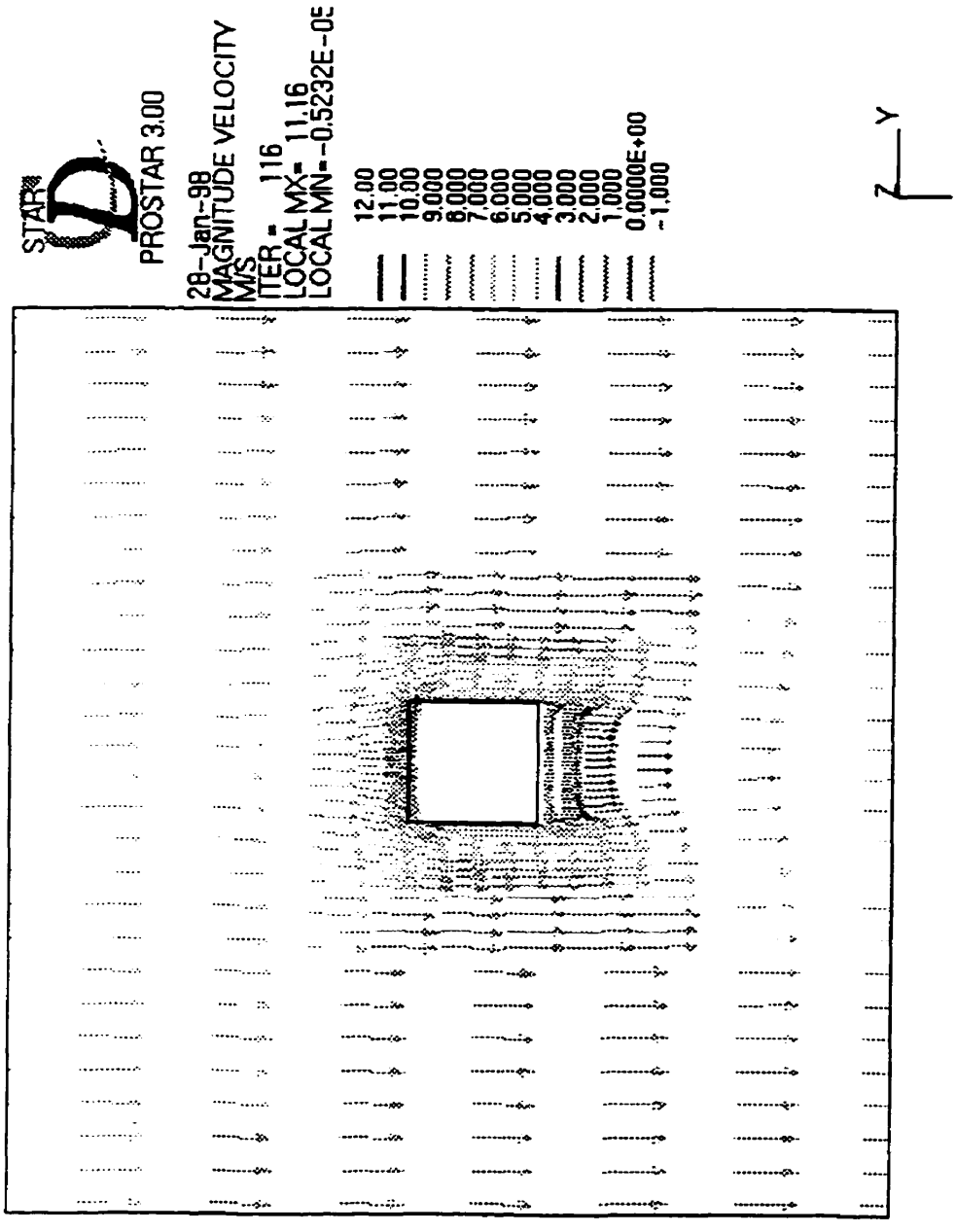


Figure 5.9: Vecteurs de la vitesse à $z = 0.99 \times H$

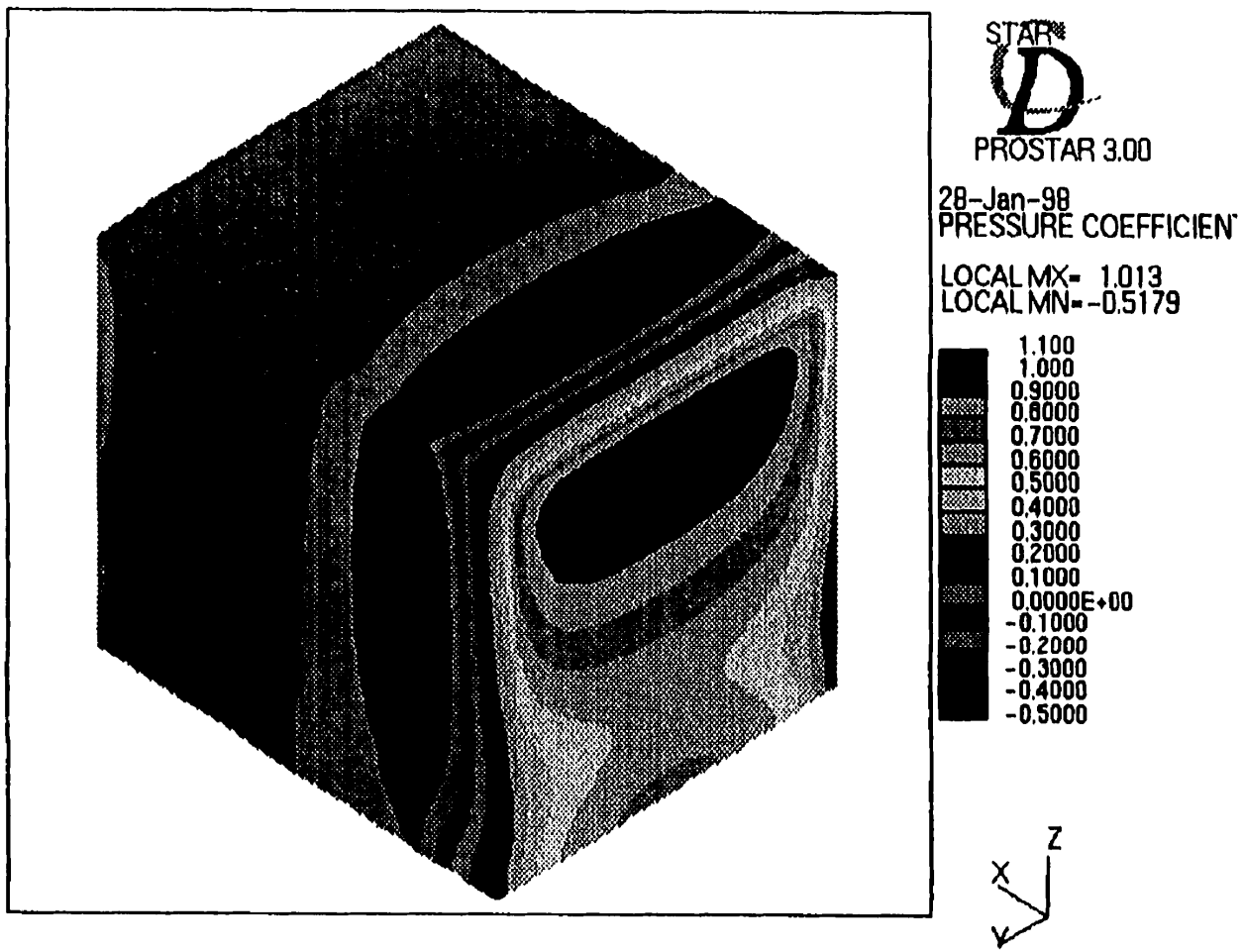


Figure 5.10: Valeur du C_p sur la première couche de cellule sur la paroi. Vu de l'avant.

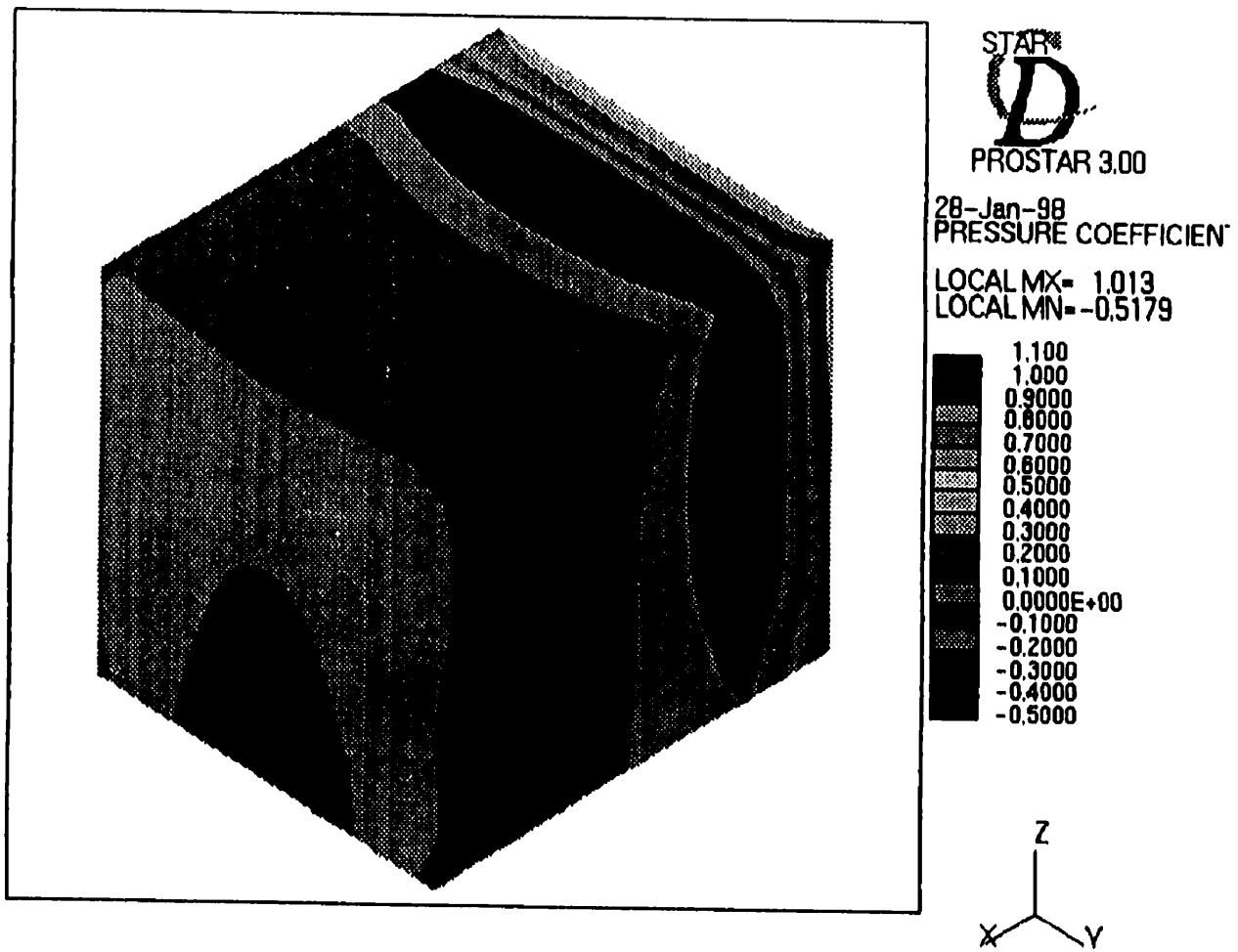


Figure 5.11: Valeur du C_p sur la première couche de cellule sur la paroi. Vu de l'arrière.

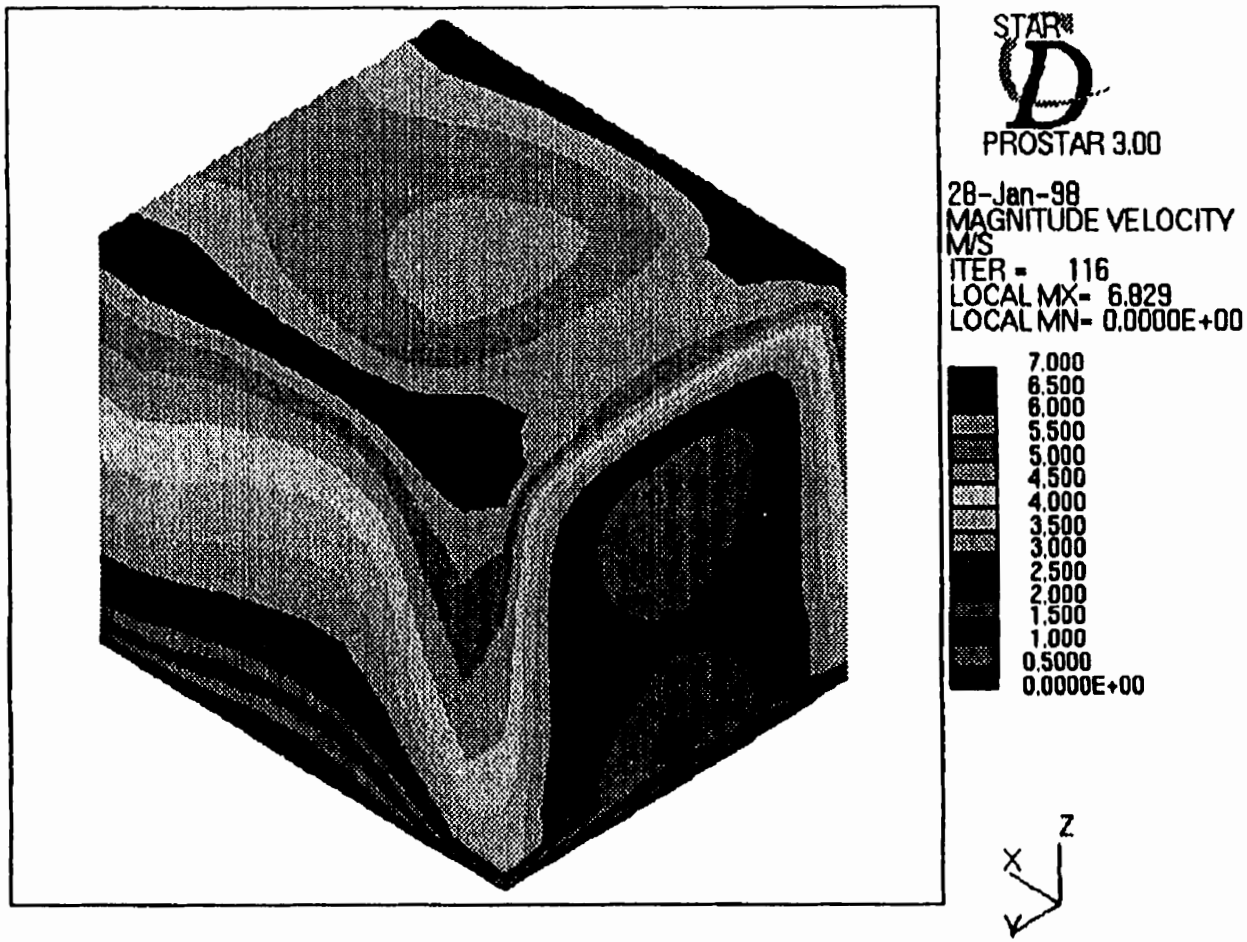


Figure 5.12: Intensité de la vitesse sur la première couche de cellule sur la paroi. Vu de l'avant.

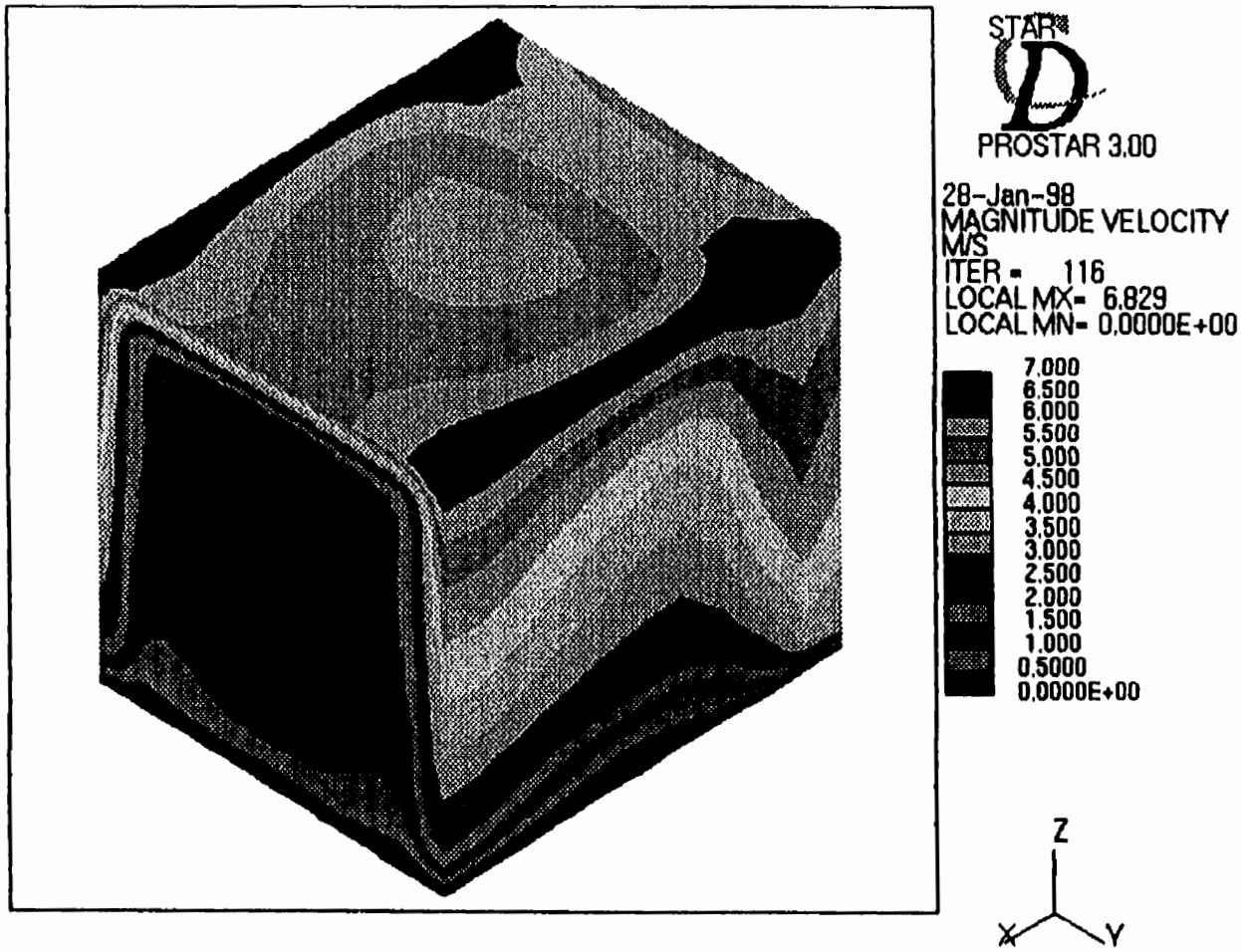


Figure 5.13: Intensité de la vitesse sur la première couche de cellule sur la paroi. Vu de l'arrière.

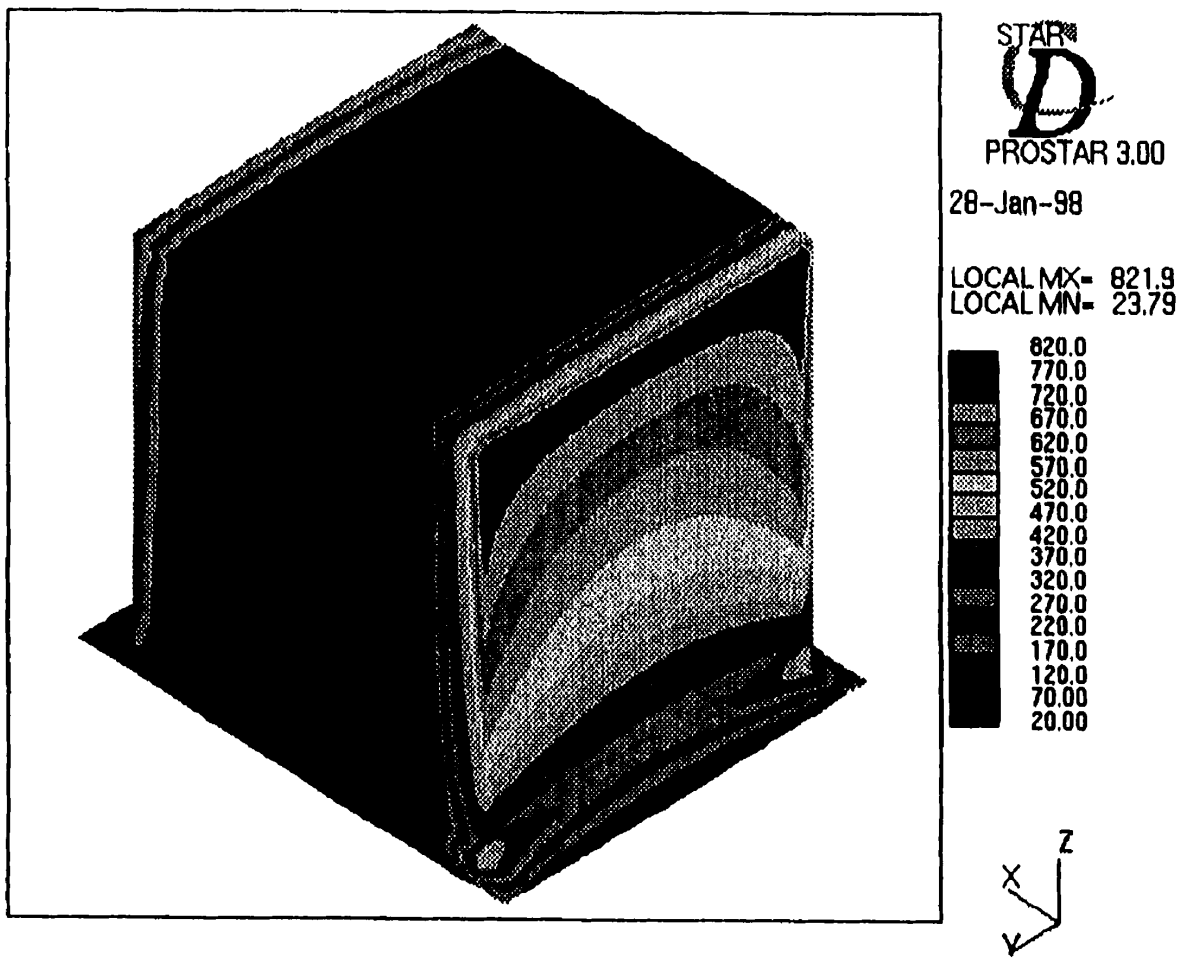


Figure 5.14: Valeurs de y^+ sur la première couche de cellule sur la paroi. Vu de l'avant.

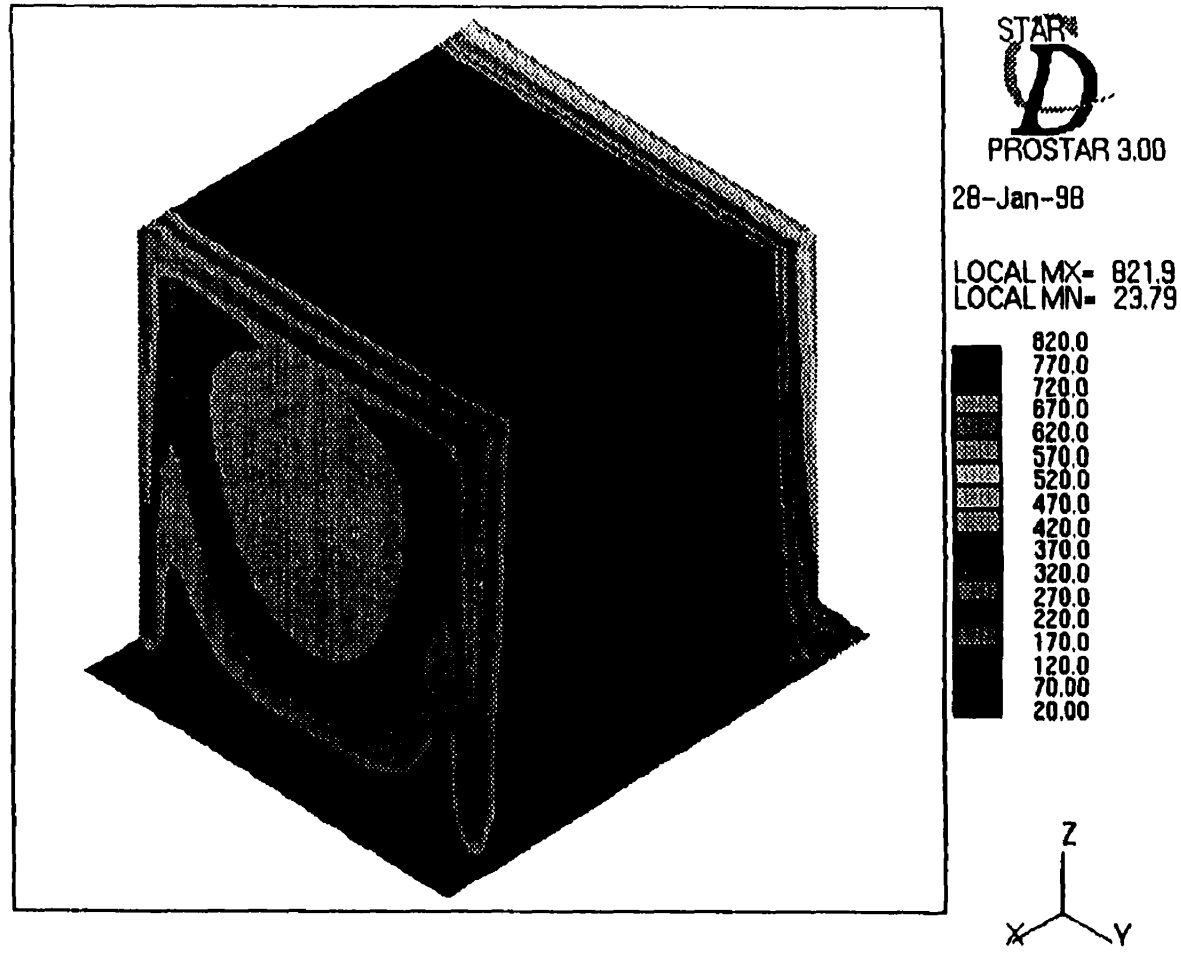


Figure 5.15: Valeurs de y^+ sur la première couche de cellule sur la paroi. Vu de l'arrière.

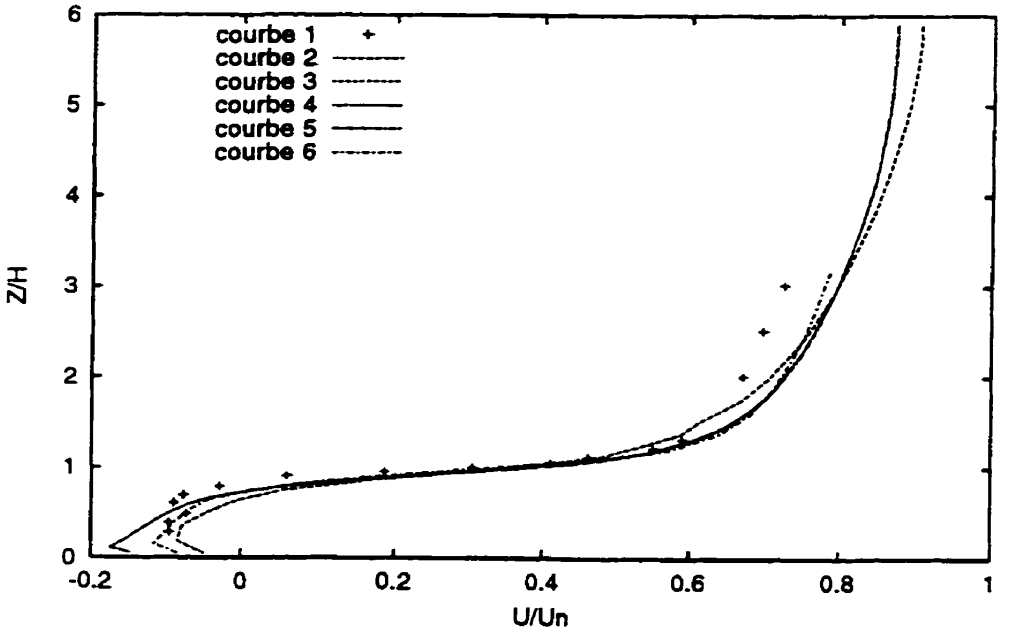


Figure 5.16: Variations de U selon la verticale à $0.5 \times H$ derrière l'obstacle. Courbe 1, résultats expérimentaux de Castro et Robins(1977) ; 2, résultats avec le code PHOENIX ; 3, STAR-CD, maillage fin, mêmes conditions frontières que PHOENIX ; 4, STAR-CD, maillage fin, conditions frontières proposées par PHOENIX ; 5, STAR-CD, même maillage que PHOENIX, mais conditions frontières proposées par STAR-CD ; 6, STAR-CD, maillage fin, conditions frontières proposées par STAR-CD.

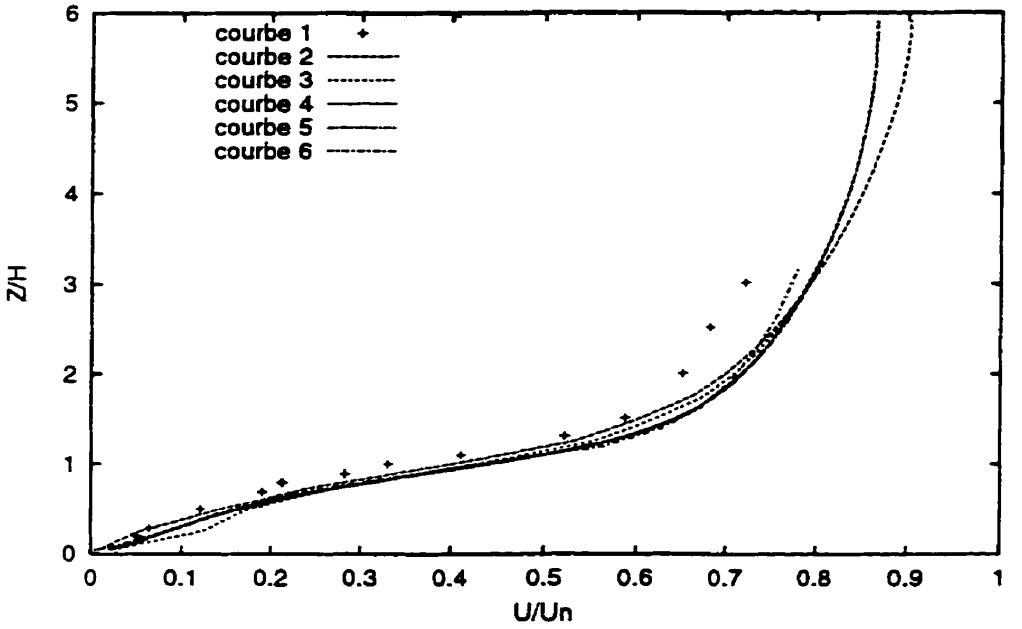


Figure 5.17: Variations de U selon la verticale à $1.5 \times H$ derrière l'obstacle. Voir fig.5.16 pour les légendes.

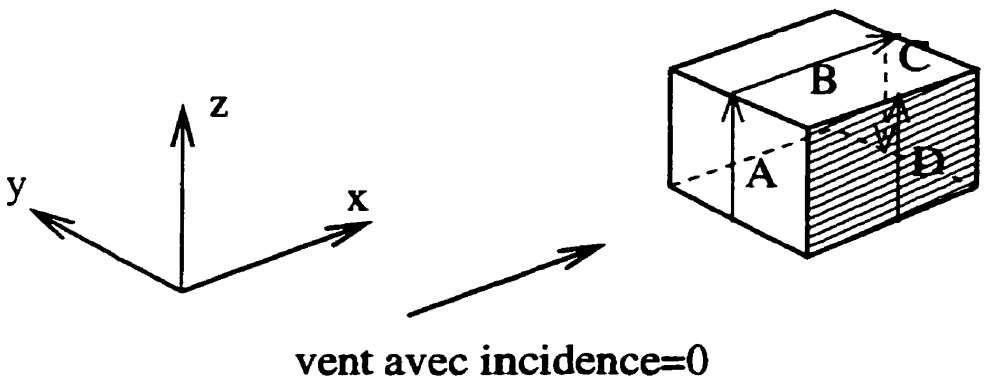


Figure 5.18: Schéma indiquant la position des lignes le long du cube pour la comparaison entre les observations et les deux codes.

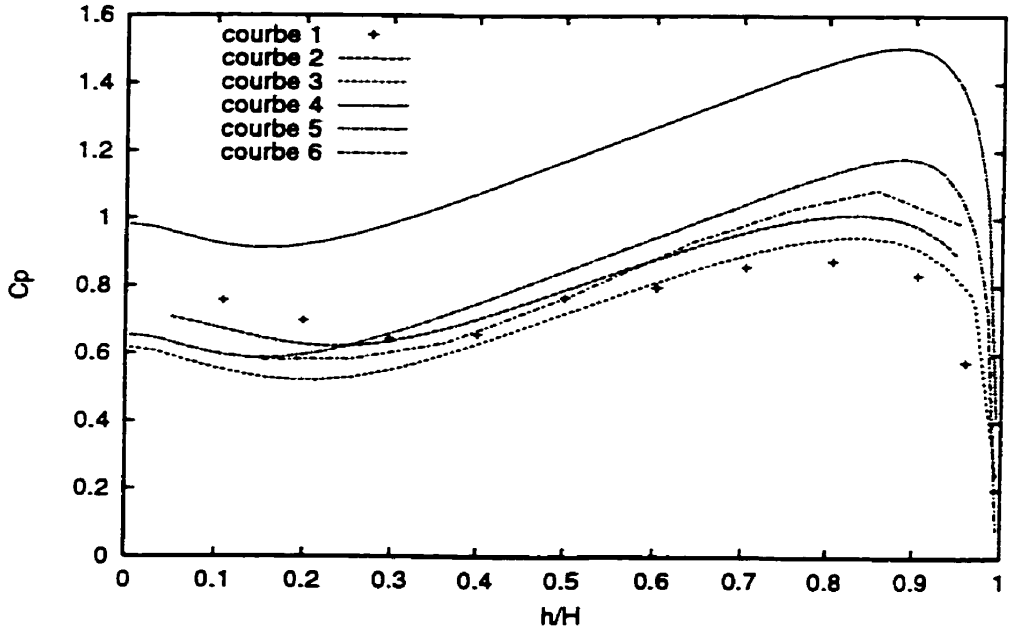


Figure 5.19: Valeur de C_p suivant la ligne A. Voir fig.5.16 pour les légendes.

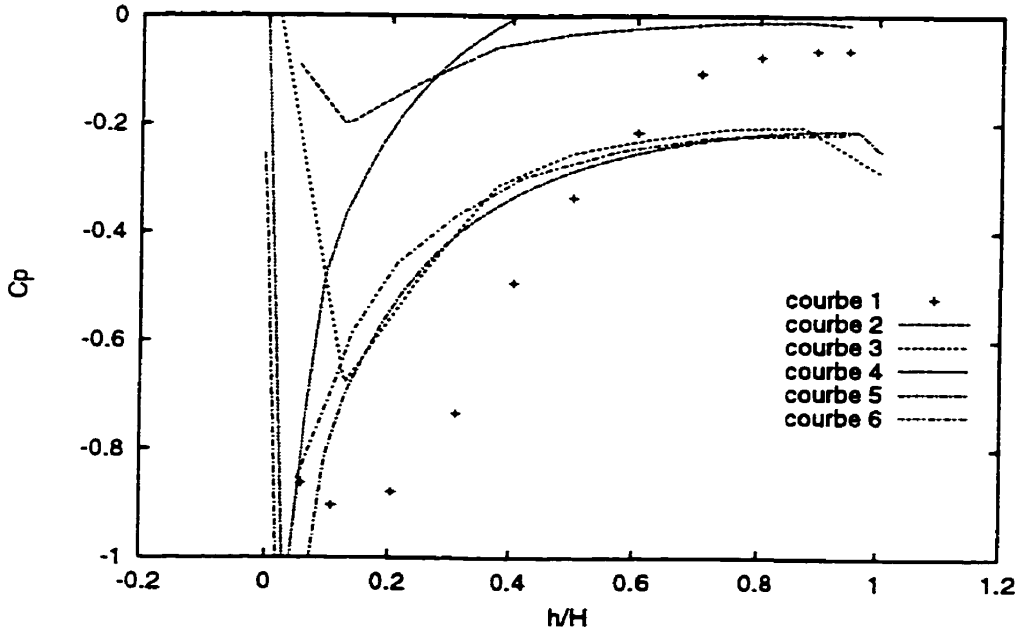


Figure 5.20: Valeur de C_p suivant la ligne B. Voir fig.5.16 pour les légendes.

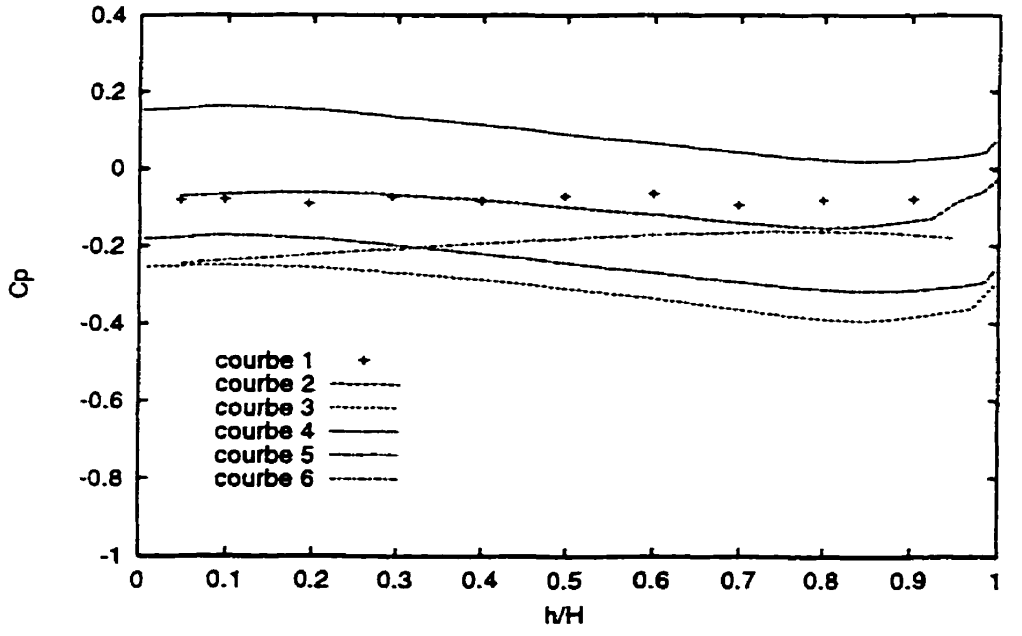


Figure 5.21: Valeur de C_p suivant la ligne C. Voir fig.5.16 pour les légendes.

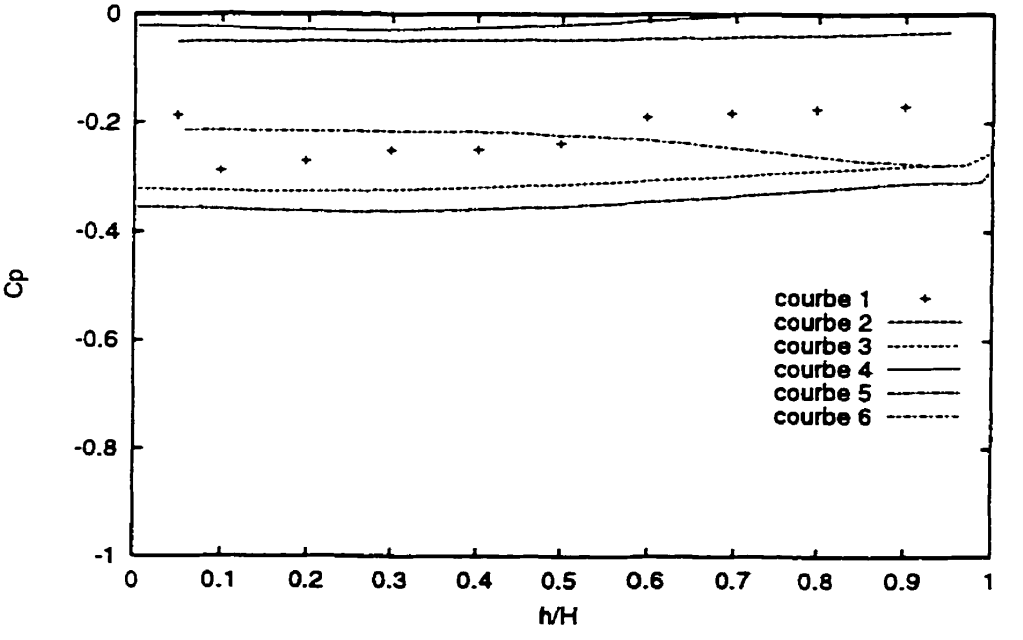


Figure 5.22: Valeur de C_p suivant la ligne D. Voir fig.5.16 pour les légendes.

Chapitre 6

Résultats et discussions

6.1 Introduction

Une recherche dans la littérature montre que le nombre des simulations numériques pour des géométries autre qu'un simple cube est limité. Ces simulations sont en général différentes pour leur configuration :

Par exemple, Hanson et al. (1986) pour la prédiction du vent autour de deux édifices parallèles (1986), Murakami et Mochida (1989) pour avoir présenté l'écoulement autour d'un groupe de batiment, ou bien dans le cas extrême pour la forme : comme la simulation du vent autour des structures en L (Stathopoulos et Zhou, 1992) , des batiments avec le toit à plusieurs pentes (Rolfes et al., 1993) ou encore l'étude du vent autour d'une dome (Taylor, 1991).

L'étude présente examine la faisabilité de l'étude de l'écoulement du vent autour du stade en utilisant le code STAR-CD.

La première section de ce chapitre décrit la méthodologie de notre étude. La deuxième section présente la spécification des données. Dans cette partie, nous allons parler des différents maillages et des conditions frontières. À partir de la section 4 nous allons étudier les différents calculs effectués de manière qualitative et quantitative et nous allons comparer nos résultats avec le cas du cube ainsi que les résultats obtenus par Stathopoulos et Dumitrescu-Brulotte (1989) dans une recherche pour étudier l'effet du vent sur des batiments avec différentes hauteurs. Finalement nous allons conclure nos calculs.

6.2 Méthodologie

Dans les chapitres précédents, nous avons vu que pour simuler l'écoulement du vent autour d'un obstacle, nous devions au début idéaliser la géométrie de l'obstacle, étudier l'environnement et le modéliser, ensuite trouver des dimensions convenables pour le domaine d'étude et finalement en se servant d'une bonne méthode de maillage, mailler le domaine d'étude. De plus, nous avons vu dans le chapitre 4 la géométrie idéalisée et les dimensions du domaine d'étude. Dans nos calculs, nous sommes confrontés avec une géométrie complexe. Pour économiser le temps de CPU et aussi pour travailler de manière plus efficace, nous nous sommes servis du maillage multi-bloc. Le domaine d'étude est divisé en 17 blocs enveloppant l'obstacle dans le domaine d'étude.

Les équations qui gouvernent nos calculs sont les équations moyennées de Navier-Stokes et le modèle de turbulence utilisé est le modèle $k-\varepsilon$ couplé avec la loi de paroi pour le voisinage des murs. Ces équations sont au début intégrées sur le volume de

contrôle approprié sur un maillage décalé, ensuite elles sont résolues par la méthode SIMPLE. Les conditions frontières sont désignées en se référant à la littérature et aussi à celles examinées pour le cas du cube.

Les dimensions du domaine ont été choisies après plusieurs calculs comme étant $2250ft \times 1035ft \times 542ft$. Bien que celles-ci semblent généreuses, elles n'influencent pas le nombre de cellules autour de l'obstacle car ce nombre est plus sensible au raffinement du maillage autour de l'obstacle.

Tous les calculs sont effectués sur une machine SGI Octane du Centre de Recherche en Calcul Appliqué (Cerca) à Montréal. Un calcul typique sur cette machine avec 400000 noeuds et un facteur de relaxation de .3 pour les vitesses et .02 pour la pression, donne une convergence de .001 au bout de 72 heures environ de CPU.

6.2.1 Spécification des données du problème

Dans le chapitre 4, nous avons parlé de la méthode dont nous nous sommes servis pour modéliser l'obstacle, le domaine d'étude, les blocs et le maillage. Dans cette section nous allons décrire les différents maillages que nous avons utilisés dans nos calculs. Comme nous pouvons le voir dans la tableau 6.1. Notre étude est faite dans le cadre de 9 différents calculs. L'objectif de ces calculs est de montrer l'influence de différents maillages, de la vitesse et des paramètres de turbulence à l'entrée, de la direction de l'incidence du vent, de la rugosité des parois, et finalement, des facteurs de relaxation.

Les calculs 1 à 5 sont faits dans le but d'étudier l'effet du maillage sur les différents paramètres. Les calculs 6 et 7 étudient l'effet du facteur de relaxation dans les résultats.

Dans le calcul 8 nous avons mis le sens de l'écoulement du vent dans le sens opposé à la direction initiale. Pour ce faire, nous avons changé les dimensions de façon que les critères pour la distance de l'entrée avec l'obstacle et sortie avec l'obstacle soit respectée.

Finalement dans le calcul 9, nous avons supposé que la surface du sol a une rugosité maximale. Il est à mentionner que tous les calculs de 1 à 8 ont supposé que la surface du sol est lisse.

6.2.2 Génération du maillage

Dans les calculs présents cinq types de maillage a été générés pour les calculs avec une angle d'incidence du vent normal à la face frontale de l'obstacle.

- Maillage 1 : Dans ce maillage, la première couche des cellules à proximité de l'obstacle est raffiné avec un facteur de raffinement de $2 \times 2 \times 2$ dans les directions locales i, j, k. Le nombre de cellules dans ce maillage est approximativement égal à 360000.

- Maillage 2 : Dans ce maillage, nous nous sommes servi du maillage 1 pour raffiner la première couche de cellule à proximité de l'obstacle avec un facteur de raffinement de $2 \times 2 \times 2$ dans les directions locales i, j, k. Le nombre de cellules dans ce maillage est approximativement égal à 420000.

- Maillage 3 : Ce maillage est obtenu en se servant du maillage numéro 2. Dans une première étape, la première couche de cellule à proximité du toit du mât est raffinée avec un facteur de $1 \times 1 \times 2$. Ensuite, sur ce même maillage, encore une fois les

cellules à proximité de l'obstacle sont raffinés avec un facteur de $1 \times 1 \times 2$. Le nombre de cellules dans ce maillage est approximativement égale à 565000.

- Maillage 4 : Ce maillage utilise le maillage 3 pour les cellules autour de l'obstacle, mais raffine en plus toutes les cellules à proximité de la terre avec un facteur de raffinement local $1 \times 1 \times 2$. Le nombre de cellules dans ce maillage est approximativement égal à 572000.

- Maillage 5 : Ce maillage utilise le maillage numéro 4, mais est raffiné une deuxième fois, toutes les cellules à proximité de la terre avec un facteur de $1 \times 1 \times 2$. Le nombre de cellules dans ce maillage est approximativement égale à 580000.

Maillage 6 : En plus de ces cinq maillages mentionnés ci-dessus, nous avons généré un sixième maillage avec un domaine à peu près semblable au premier. Ce maillage est utilisé pour les calculs avec l'angle d'incidence du vent égal à 180 degré. Comme ce calcul a été fait pour une étude qualitative seulement, nous n'avons raffiné qu'une seule fois les cellules au voisinage de l'obstacle. Le nombre de cellules dans ce maillage est de l'ordre de 360000.

Les figures 6.1, 6.2 et 6.3 montrent les maillages des calculs 1, 2 et 3. Nous pouvons remarquer que les cellules se rappetissent au fur et à mesure qu'on s'approche de la base du stade. Plus tard, nous allons voir qu'à cause de ce problème, les valeurs de y^+ obtenues seront plus acceptables vers la base de l'obstacle.

6.2.3 Les conditions frontières

D'après la section 2.4, pour les calculs du stade, nous nous sommes servis de quatre types de frontières :

6.2.3.1 L'entrée

- Angle d'incidence de l'écoulement sur l'obstacle : Comme nous l'avons expliqué dans les chapitres précédents, les calculs finaux doivent être répétés pour plusieurs angles d'incidence du vent par rapport au plan XOZ. Dans notre calcul, comme ceci est un essai de faisabilité, nous n'avons étudié que le cas où l'angle de l'incidence est égal à zéro degré. Un calcul approximatif est aussi effectué pour un angle de 180 degrés. Dans le premier cas, les calculs sont répétés pour cinq types de maillage, tandis que dans le dernier cas un seul calcul est effectué.

- Le profil de la vitesse : La figure 6.4 montre la probabilité de l'écoulement du vent avec des différentes vitesses, dans la ville Montréal, à une altitude de 300 m à partir de la surface du sol. Cette estimation est extrapolée à partir de mesures prises à l'aéroport Dorval pendant une période de 10 ans et à 10 m au-dessus du sol, pendant la période de l'hiver. D'après la figure, nous voyons que la vitesse du vent est plus grande dans le sud-ouest de Montréal. Comme le stade est situé sur l'est de Montréal, la vitesse arrive jusqu'a 85 km/h ou bien 23 m/s. Dans nos calculs, nous avons pris 2 vitesses pour les calculs l'une égale à 25m/s et une autre 10 m/s(le nombre de Reynolds est approximativement égale à 1e8. En plus, nous avons considéré le profil de la vitesse comme étant uniforme tout le long de la coupe à l'entrée.

Les valeurs de la turbulence : Les valeurs de la turbulence sont calculées d'après les

formules 2.18 à 2.21 et sont considérées comme étant :

U m/s	k	ε
10	1.125	0.000314
25	7.031	0.000397

6.2.3.2 Autres frontières

- Sortie : La sortie est considérée comme étant la frontière opposée à l'entrée.

- Plan de symétrie : La frontière supérieure et les frontières latérales du domaine sont considérées comme étant des plans de symétrie.

- Les murs : Les parois de l'obstacle et le sol sont considérés comme étant des parois solides.

Dans tous les calculs le paramètre E qui désigne la rugosité est considérée comme étant égale à 9.0 pour les parois de l'obstacle (complètement lisse).

Dans tous les calculs sauf dans le calcul final, la surface du sol est supposée lisse donc $E = 9.0$. Dans le dernier calcul E est supposé être de l'ordre de 1.137.

6.3 Description détaillée de l'écoulement autour du mât avec un angle d'incidence du vent nul

Pour étudier les résultats des calculs de simulation, nous nous sommes basés sur les valeurs et le vecteur de la vitesse, la valeur de y^+, le coefficient C_p qui est la

valeur normalisée de la pression. Dans les sections qui suivent, nous allons étudier qualitativement et quantitativement, ces valeurs sur différentes faces de l'obstacle, ainsi que sur le sol.

Regardons l'ensemble des figures 6.5-6.9

La figure 6.5 montre l'intensité de la vitesse pour le maillage 1 sur le plan de symétrie ($y = 0$). Les figures 6.9, 6.8 et 6.7 montrent respectivement l'intensité de la vitesse aux hauteurs $z = 1/3 \times H$, $2/3 \times H$ et environ H.

Les figures 6.6, 6.10 et 6.11 montrent les vecteurs de la vitesse sur le plan de symétrie et encore une fois à des élévations $z = 1/3 \times H$ et $2/3 \times H$. Sur cette figure nous observons que le profil uniforme de la vitesse commence son trajet avec une intensité égale à 10m/s à l'entrée. Cette valeur n'est pas fondamentalement modifiée avant de rencontrer l'obstacle. Le long de son parcourt jusqu'à l'obstacle la vitesse à proximité du sol diminue à cause de la friction avec le sol. Quand l'écoulement rencontre l'obstacle la vitesse d'une partie de cet écoulement s'annule (zone de stagnation) et le reste de l'écoulement continue son trajet, en traversant l'obstacle sur la face supérieure et les deux côtés latéraux. Au-dessus de l'obstacle, nous voyons que l'écoulement tend à atteindre un mouvement circulaire et former un tourbillon. Sur les deux côtés, deux mouvements circulaires se produisent, ce qui est expliqué par le "Horse Shoe Vortex". Ces mouvements ont tendance de contourner l'obstacle pour se rejoindre en aval. Maintenant, nous allons étudier le comportement de l'ecoulement sur chaque face de l'obstacle, sur le sol et sur deux différentes coupes.

6.3.1 Face frontale

Les figures 6.12-6.16 montrent respectivement les variations du coefficient de la pression C_p, la composante U de la vitesse de l'écoulement, et aussi les vecteurs de la vitesse à proximité du toit du stade.

D'après la figure 6.13, nous voyons que sur la face frontale, la valeur du coefficient de la pression varie entre -2.5 et 1.023. Comme dans ces deux figures nous avons voulu préciser les zones où la valeur de C_p atteint ses valeurs maximales, nous avons limité la variation de ce variable entre .8 et 1.023, sur la figure 6.13. Dans celle-ci, nous voyons que, quand l'écoulement atteint la face frontale, à cause de la stagnation de l'écoulement, la pression atteint son maximum. Comme on peut distinguer sur la figure, la zone où la pression est élevée est située entre le sol et jusqu'à une élévation d'environ .65 x H. La valeur de C_p dans cette zone varie entre .89 et 1.023, mais atteint son maximum sur une élevation entre $0.15 \times H$ et $.25 \times H$. Au-delà de cette zone vers le toit, la valeur de C_p diminue, mais remonte au voisinage du toit, sur une élevation d'environ $0.9 \times H$ à $0.95 \times H$ et atteint des valeurs entre .7 et .9. La valeur de ce coefficient diminue graduellement vers l'extérieur de la face et atteint une valeur négative sur les bords de cette face. Ceci est montré sur la figure 6.12. Nous voyons que cette valeur varie entre -0.2 et -0.3. Regardons les figures 6.14 et 6.15. Sur la figure 6.14, nous voyons les variations de la composante U de la vitesse. D'après cette figure, nous constatons que la valeur de U varie entre -3.133 et 12.55 sur cette face. Pour pouvoir préciser la position du minimum de la vitesse, nous avons montré sur la figure 6.15, la vitesse, mais en diminuant la marge de la variation entre -3.133 et 0. D'après cette figure, nous voyons que sur la face frontale, la vitesse atteint son minimum, au voisinage du sol, sur une élévation de $0.15 \times H$ à $0.2 \times H$ et $0.4 \times H$

où la pression est maximale. La vitesse U dans cette région est négative et atteint un minimum d'environ -3 m/s, ce qui indique la présence d'une zone de recirculation à ce niveau. D'après ces deux figures, la valeur de la vitesse commence à augmenter vers les bords, mais encore une fois baisse sur une hauteur entre $0.9 \times H$ à $0.95 \times H$. On peut prévoir à cette élévation une autre zone de recirculation si on raffine encore plus le maillage.

La figure 6.16 montre les valeurs de la vitesse vers le voisinage du toit. Dans cette zone, nous notons que les vecteurs ne sont pas pertubés par l'obstacle.

À ce stade-ci nous proposons de comparer les valeurs obtenues avec les résultats du graphique 5.19 En comparant le comportement de la pression sur la face frontale, nous constatons une assez bonne similitude avec le cas du cube. Cependant, la forme du mât près du toit est très mince, ce qui perturbe moins l'écoulement.

6.3.2 Face supérieure : le toit

Les figures 6.17 et 6.18, montrent les valeurs du coefficient de la pression sur l'extrémité supérieure de l'obstacle. Encore une fois, pour préciser la position des valeurs extrêmes, nous avons rétréci la marge des variations du coeficient de la pression sur la figure 6.18. D'après ces figures, nous voyons qu'une partie de l'écoulement qui quitte la face frontale, avec une autre partie du fluide au-dessus de l'obstacle en rencontrant le toit, atteint une zone de dépression, située à peu près sur une distance environ .05 à .12 fois la longueur du toit dans la direction du vent. La valeur de C_p dans cette zone atteint un minimum d'environ -1.225 à -1.15 (fig. 6.18). Plus les particules se déplacent vers l'aval, plus la pression augmente sans atteindre une valeur positive.

Son maximum ne dépasse pas -0.21. Comme on peut le voir sur la même figure, une hausse relative de la pression est montrée sur le bord extérieur du toit.

En comparant encore une fois les résultats obtenus avec le graphique 5.20 , nous pouvons constater un comportement similaire du fluide sur le toit du mât, une diminution de la pression qui est toujours négative, sur une distance semblable au cas du cube, ensuite une augmentation, et à la fin une diminution relative au bord de la face supérieure confirment bien les résultats qualitatifs.

Regardons à nouveau la figure 6.16 qui montre les vecteurs de la vitesse au niveau du toit, sur le plan de symétrie. D'après la figure on constate que bien qu'une augmentation de la vitesse soit observée vers l'amont, aucune séparation ne s'est formé à ce niveau. Ceci peut être expliqué par la forme de l'obstacle qui est très mince (fig. 6.16).

La vitesse diminue graduellement vers l'arrière atteint deux minimums d'environ 8.5 à 8.9 sur une distance de .6-.7 de la longueur de la face par rapport à l'amont et en quittant cette face (figure 6.19).

Il est à noter que la vitesse, à proximité de la frontière supérieure a tendance à dépasser la valeur maximale de la vitesse à l'entrée. La raison pour ce phénomène peut s'expliquer par le fait que l'aire de l'écoulement au niveau de l'obstacle est inférieure à l'aire à l'entrée. Ce qui implique que la vitesse augmente pour compenser cette différence.

6.3.3 Derrière l'obstacle

Les figures 6.20 et 6.21 montrent les variations des valeurs de C_p et la vitesse sur la face à l'arrière et les deux faces latérales de l'obstacle. D'après la figure 6.20, nous voyons que la valeur du coefficient de la pression varie entre un minimum de -2.5 et un maximum de 1.023. Sur ces faces, pour pouvoir préciser la position du minimum de la pression, nous avons réduit la marge des variations entre -2.5 et 0.20. Après cette réduction, nous pouvons remarquer que l'arrière de l'obstacle subit une variation de la pression entre -0.20 et 0.22. La valeur de C_p est négative à partir du toit jusqu'à une élevation $0.2 \times H$. Dans la zone où la valeur de ce coefficient est négatif, un maximum relatif est situé sur une distance de $0.15 \times H$ à partir du toit. À proximité du sol, la valeur de la pression est maximum.

Bien que, dans les résultats obtenus, la pression atteigne des valeurs positives au voisinage du sol, la pression a un comportement identique au fluide sur le graphique 5.20 . Toutefois, une largeur extrêmement petite de la face à l'arrière de l'obstacle en comparant avec la surface frontale, peut expliquer les différences avec le cas du cube.

La figure 6.21 montre les valeurs de la vitesse sur les faces mentionnées. Nous voyons que la vitesse varie entre 0 et 14 m/s. En faisant attention à la figure, nous voyons qu'à proximité du toit et du sol, la vitesse atteint des valeurs quasiment négatives. Ces zones sont situées là où la pression atteint ses valeurs maximales. À proximité du toit, un petit tourbillon est remarqué.

6.3.4 Les faces latérales

D'après les figures que nous avons mentionnées dans la section précédente, nous voyons que, quand une partie de l'écoulement quitte la face frontale vers les côtés letéraux, elle subit une perte de pression au milieu des arêtes et près du toit. Vers l'extrémité de l'obstacle la pression augmente, et atteint une valeur positive sur les cellules à proximité du sol. Cette variation de C_p sur les faces latérales n'est pas trop éloignée de celle observée dans l'expérience (fig. 6.17).

Les vecteurs de la vitesse à proximité du sol dévient et se détachent de la paroi, sur une petite surface. Il se forme une petite zone de recirculation du côté de l'amont. Ce phénomène est connu au mécanique des fluides sous le nom de "Horse Shoe Vortex".

6.3.5 Les cellules à proximité du sol

À part les cellules de la région à proximité des faces latérales qui sont situés dans une zone de dépression, dans le reste de la zone, la pression est positive (fig. 6.22). Les fortes variations de vitesse sont observées surtout à proximité de l'obstacle. Comme on peut voir sur la figure 6.23 , il n'existe pas de point de séparation à l'arrière de l'obstacle. L'une des causes de ce problème peut être la forme de l'obstacle, l'autre raison peut être la nature du profil du vent qui est considérée uniforme.

Dans cette partie il est utile de regarder les courbes de la variation de la composante U de la vitesse sur des distances $0.5 \times H$ et $1.5 \times H$ derrière l'obstacle. Pour ce faire nous allons utiliser les graphique du calcul 9. Nous choisissons ceci, parce que dans ce calcul, nous avons changé la rugosité et ceci sera mieux comparable avec les

résultats des calculs pour le cas du cube. Sur le premier graphique, nous voyons bien que le profil de la vitesse a une augmentation assez régulière jusqu'à une élévation d'environ $1.25 \times H$, ensuite elle garde une valeur fixe égale à $1.4 \times U_o$ jusqu'à la frontière supérieure. La vitesse, au voisinage du sol (le centre du premier cellule est situé à $0.1 \times H$) est à peu près $0.53 \times U_o$, ceci n'est pas surprenant, parce que la vitesse de l'entrée est supposée uniforme et donc est loin d'être nulle. Sur le deuxième graphique, nous constatons que, la vitesse au voisinage du sol a augmenté et a une valeur d'environ $0.8 \times U_o$. Encore une fois la vitesse augmente graduellement jusqu'à une élévation $1.2 \times H$ et garde une valeur d'environ $1.4 \times U_o$ jusqu'à la frontière supérieur (graph. 6.24, 6.25).

La comparaison de ces graphiques avec les graphiques du cube montre une assez bonne cohérence, malgré les différences considérables qui existent entre les données dans les deux cas.

6.4 Étude de sensibilité des résultats avec un angle d'incidence du vent nul

Dans la section précédente, nous avons vu le comportement du fluide dans le domaine d'étude et sur l'obstacle. Dans cette section, nous allons suivre l'objectif des différents calculs effectués.

6.4.1 Étude de l'effet du maillage

Comme nous avons déjà mentionné dans les sections précédentes, les calculs 1 à 5 sont faits dans le but d'étudier l'effet du maillage sur les différentes variables. Les figures qui suivent montrent le résultat de ces études. Nous pouvons voir que le raffinement met en valeur les détails dans l'écoulement. L'un des paramètres qui nous aide à savoir si le maillage est assez fin est que les résultats obtenus deviennent indépendants du maillage. En plus, dans un écoulement turbulent la valeur de y^+ est une bonne indice pour les résultats obtenus au voisinage des murs. Quand cette valeur est située à l'extérieur de la marge permise (voir le chapitre 2 pour la valeur permise de y^+), l'effet visqueux du mur n'est plus considérée i.e. la condition de l'adhérence n'est pas tout à fait respectée. Dans les figures qui suivent, bien que le raffinement met en valeur les détails, mais comme nous avons arrêté les calculs après cinq étapes de raffinement, y^+ est plus grand que 1000, ce qui rend les résutats inutilisables.

Comme on a déjà parlé dans le chapitre 2 cette valeur doit être située entre 12 et 800. Donc, pour améliorer ce problème, des raffinements plus avancés sont nécessaires. Un changement de maillage, de façon que les cellules au voisinage du toit aient approximativement les mêmes dimensions que les cellules au niveau de la base peut aider encore à améliorer les réponses.

Le graphique 6.26 montre l'effet du maillage dans la convergence des calculs. Pour pouvoir mieux voir les variations de la convergence, nous avons utilisé l'échelle logarithmique sur l'axe des ordonnées. Nous pouvons voir le maillage 1, qui est un maillage grossier, subit des variations très prononcées dans les 1500 premiers itérations. Ceci montre que pour un maillage moins raffiné, il existe une forte chance que

le calcul diverge. De plus, nous voyons que les calculs prennent une allure stable après 2500 itérations. Un autre point à remarquer est que l'état de convergence des calculs avec le maillage 2 et 3 se ressemble et que le maillage le plus fin converge plus rapidement et aux alentours de 3200 itérations; tandis que les autres calculs n'ont pas encore convergé même après 5000 itérations. En plus, nous voyons que le maillage fin a tendance à baisser encore plus. Ceci montre bien l'influence d'un maillage raffiné.

6.4.2 Étude de l'effet du facteur de relaxation dans les calculs

Les calculs 4 et 5 sont faits pour étudier l'effet du facteur de relaxation pour la vitesse sur la convergence des calculs. Le graphique 6.27 montre l'histoire de la convergence des résidus sur tout le domaine. Dans ce graphique aussi, nous avons montré les résidus sur une échelle logarithmique. Ce graphique est basé sur le maillage numéro 1. Nous voyons que bien que tous ces calculs oscillent aux premiers itérations, mais plus nous augmentons le facteur de relaxation, plus les calculs semblent converger rapidement. En plus, l'amplitude des oscillations diminue en augmentant la valeur de ce facteur. Les valeurs moyennes des résidus diminuent en augmentant la valeur du facteur de relaxation.

6.5 Étude de l'écoulement avec l'angle d'incidence égal à 180 degrés

Le calcul 8 se rapporte à cette étude. Le maillage utilisé dans ce calcul est un maillage grossier. Donc, l'étude qui se fait dans cette partie donnera seulement une idée de ce

qui peut arriver si la direction du vent était inverse.

Regardons les figures 6.28-6.34 . Ces figures montrent l'intensité et les vecteurs de la vitesse sur l'obstacle, le plan de symétrie de l'objet et sur les coupes latérales $1/3H$, $2/3H$ et $.99H$. Nous voyons que l'écoulement, en arrivant à l'obstacle avec une vitesse uniforme de -10 m/s

rencontre en même temps tous les trois côtés (i.e. le front et les faces latérales du mât). La vitesse diminue sur le front (attention, les définitions du front et l'arrière sont changées dans ce cas), elle atteint son minimum au voisinage du toit, mais avance en gagnant en intensité vers les bords des faces extérieures en aval. C'est ici que l'écoulement atteint son maximum d'intensité et enfin quitte les bords. La valeur de la vitesse de l'écoulement en passant sur le toit augmente, mais commence à diminuer vers l'aval. Regardons maintenant la figure. Derrière l'obstacle, une chute de la valeur de vitesse est remarquée, nous pouvons voir cette chute s'étendre au voisinage du sol même. En regardant la figure 6.31 nous remarquons la présence d'une zone de recirculation à l'aval et au voisinage du sol jusqu'à la moitié de l'obstacle.. Une autre chute de vitesse est remarquée vers le toit. C'est là que se forme un autre tourbillon. D'après cette figure aucune zone de recirculation n'est remarqué sur le toit. La figure 6.32 montre les vecteurs de la vitesse sur une élévation $z = 1/3H$. D'après cette figure, nous voyons une autre fois la présence de deux tourbillons adjascents. La figure 6.34 montre les vecteurs de la vitesse sur une élévation $z = 2/3H$. Nous voyons que la zone de la circulation est très petite. Sur la figure 6.34 nous voyons l'apparition d'une autre zone de recirculation, ceci est dû à la zone de ralentissement de l'écoulement à proximité du toit.

Les figures 6.35 et 6.36 montrent les valeurs du coefficient de la vitesse sur le mât.

D'après ces figures, nous voyons que la pression de l'écoulement atteint son maximum sur la face frontale à environ $0.9 \times H$, ensuite prend une valeur négative sur les côtés latéraux. En quittant les bords à l'aval il atteint sa valeur minimale. Sur le toit, bien que la valeur de la pression soit toujours négative, une baisse rapide est observée vers l'amont.

Sur l'arrière de l'obstacle, sur la figure (6.36) nous voyons que la pression est négative partout, mais nous distinguons deux zones où la pression augmente, toujours en restant négative. Dans ces deux zones, comme nous avons déjà étudié il se forme des zones de recirculation.

6.6 Étude de l'effet de la vitesse et de la rugosité sur les calculs

Le calcul numéro 9 est un dernier calcul dans lequel nous avons inclu l'effet de la rugosité, de la vitesse en utilisant le maillage le plus raffiné. La figure 6.37 montre les isovitesses sur le plan de symétrie de l' obstacle. Nous voyons que la vitesse augmente de 20 à 30% au-dessus du toit. Les vecteurs de la vitesse, encore une fois ne sont pas dérangés au niveau du toit.(fig. 6.38). La figure 6.39 montre l'effet de la rugosité du sol sur l'obstacle. Nous observons deux tourbillons qui se forment au niveau des faces latérales et vers l'amont. L'écoulement se détache de l'obstacle vers les bords de la face frontale et ne se rattache que plus loin à l'aval. Le fait que la vitesse soit plus élévée, ne change pas beaucoup le comportement du fluide. La valeur de y^+ est encore plus grande ,surtout vers le toit. Sur tout l'obstacle la valeur de C_p est situé entre

-2.5 et 1.1.

6.7 Comparaison des résultats obtenus avec l'étude faite pour simuler le vent autour des batiments avec différentes hauteurs

Dans cette étape une comparaison avec une étude faite par Stathopoulos et Dumitrescu-Brulotte(1989) , peut nous aider à mieux comprendre de nos calculs.

L'étude faite par ces checheurs, a été entreprise afin d'établir les surcharges dûes au vent qui conviennent à la conception de tels bâtiments. Cette étude expérimentale a été réalisée à la soufflerie du Centre des études sur le batiment à l'université Concordia, et a été faite sur des batiments carrés avec différentes hauteurs (12, 25, 55, 100, 145 m de hauteur) et une largeur égale à 61 m soumis à des conditions simulant les vents violents qui soufflent dans une prairie ouverte. Les données statistiques des pressions transmises par le vent ont été relevées à plusieurs endroits sur les murs et le toit de tous les batiments pour la direction du vent normale et oblique (voir fig 6.40). Ici, nous allons faire un résumé de cette étude et en même temps nous allons comparer leur résulats avec les nôtres.

D'après leur étude, dans le cas du vent normal à l'obstacle, le coefficient moyen de pression est positif sur la face frontale avec le maximum au point de stagnation situé au $2/3H$ à partir du sol. Cette élévation correspond bien avec $.65H$ dont nous avons parlé dans l'étude sur la face frontale du stade.

Un autre résultat obtenu par ces chercheurs est que les pressions négatives élevées apparaissent juste après la séparition de l'écoulement au voisinage du toit et sur les arêtes des murs latéraux, mais diminuent vers le mur à l'arrière qui, lui, est dans une zone de dépression. Ce comportement de l'écoulement est encore une fois consistant avec nos calculs.

D'après leurs études le mur en arrière reçoit une distribution uniforme du coefficient de pression qui diminue de valeur quand la hauteur du batiment s'accroît. Ceci, peut expliquer une fois de plus la valeur relativement petite de C_p sur la paroi en aval.

Regardons les graphiques de l'étude faite par Stathopoulos et al sur la figure 6.40 pour la face frontale et sur le toit. Nous voyons bien, que plus la hauteur de l'obstacle s'accroît, plus C_p augmente de valeur. Dans le cas du toit l'effet de la hauteur suit la même allure ; c'est-à-dire une augmentation de la hauteur augmente la valeur de C_p. En plus, nous voyons qu'une augmentation de la hauteur du bâtiment diminue les variations de C_p sur le toit.

Pour avoir une idée de la valeur de C_p moyenne sur les quatre faces du mât, nous avons spécifié chaque face de l'obstacle, comme une région. Par la suite, nous avons calculé la valeur moyenne de C_p dans la première couche de cellules couvrant l'obstacle. Nous avons obtenu une valeur de 0.58 pour la face frontale en amont, -0.35 sur le toit et -0.48 sur les faces latérales. En regardant ces valeurs, nous voyons qu'elles sont loin des valeurs obtenues dans les expériences. Ceci est normal, car les conditions du cas de stade sont différentes de ces expériences et aussi les calculs n'étant que préléminaires, elles manquent de précision quantitative.

6.8 Conclusion

Les différents calculs sur le mât du stade montrent que :

- Les calculs du stade n'ont pas encore atteint leur phase finale : La diminution de la valeur de y^+, à chaque étape d'ajout de noeuds au niveau des parois, montre que le maillage a besoin d'être rafinné plusieurs fois pour que y^+ soit situé dans une marge acceptable. À cause de ce défaut, la loi des parois n'est pas valable encore et la condition d'adhérence au niveau des murs n'est plus respectée.

- Bien que la forme du mât soit différente de celle du cube, et les conditions de l'écoulement soient assez différentes de point de vue du nombre de Reynolds, les résultats obtenus montrent que le comportement du fluide sur l'obstacle est qualitativement comparable avec celui du cube.

- La position des maximums et des minimums des valeurs de la pression et de la vitesse sont dans la plupart des cas très proches de celle de l'expérience du cube.

- Le comportement du fluide autour de l'obstacle se rapproche plus de celui du cube, dans le cas où les côtés de la surface qu'il rencontre a un rapport proche de l'unité. Nous pouvons voir ceci en comparant les résultats des calculs 1 à 5 avec ceux du calcul 8. Dans le cas du calcul 8, comme la surface à l'aval est plus large que celle dans les calculs 1 à 5, la zone de la recirculation et la présence du point de la séparation sont tout à fait prononcées.

- Le maillage a un effet important sur la convergence des résultats et surtout sur la

qualité de la solution. Un maillage fin, converge plus rapidement.

- Du point de vue physique, un bon choix des valeurs de la relaxation, peut aider beaucoup à accélérer la convergence des calculs.

Tableau 6.1: Les différents calculs effectués

Calcul	maillage	U_{entre} (m/s)	angle d'incidence (deg)	rugosité de l'obstacle	rugosité de la terre	facteur de relaxation pour u,v,w	facteur de relaxation pour la pression	k	ϵ
1	1	10	0	9.0	9.0	0.2	0.01	1.125	0.000314
2	2	10	0	9.0	9.0	0.2	0.01	1.125	0.000314
3	3	10	0	9.0	9.0	0.2	0.01	1.125	0.000314
4	4	10	0	9.0	9.0	0.2	0.01	1.125	0.000314
5	5	10	0	9.0	9.0	0.2	0.01	1.125	0.000314
6	1	10	0	9.0	9.0	0.3	0.02	1.125	0.000314
7	1	10	0	9.0	9.0	0.3	0.02	1.125	0.000314
8	6	-10	180	9.0	9.0	0.4	0.02	1.125	0.000314
9	5	10	0	9.0	1.137	0.4	0.02	7.03	0.000397

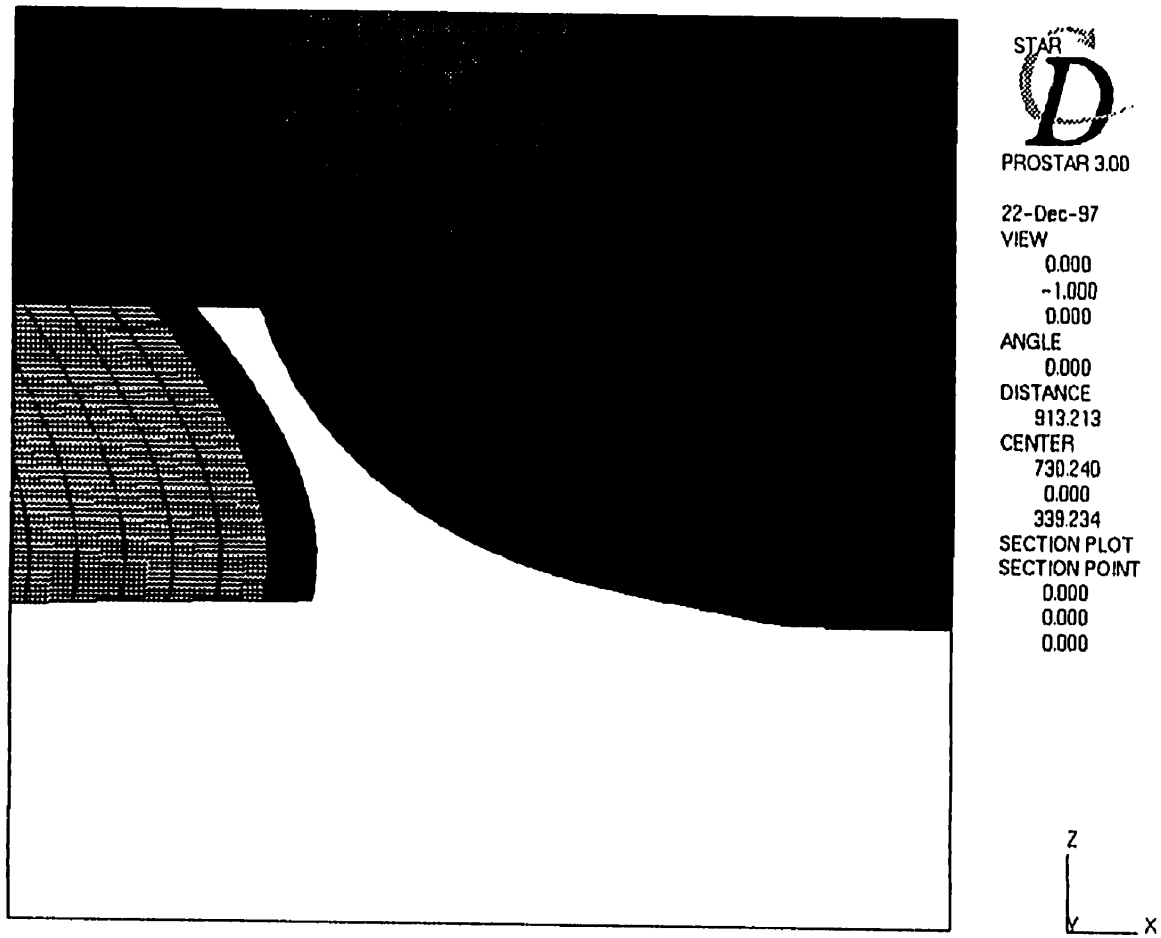


Figure 6.1: Maillage 1- dans le plan de symétrie de l'obstacle

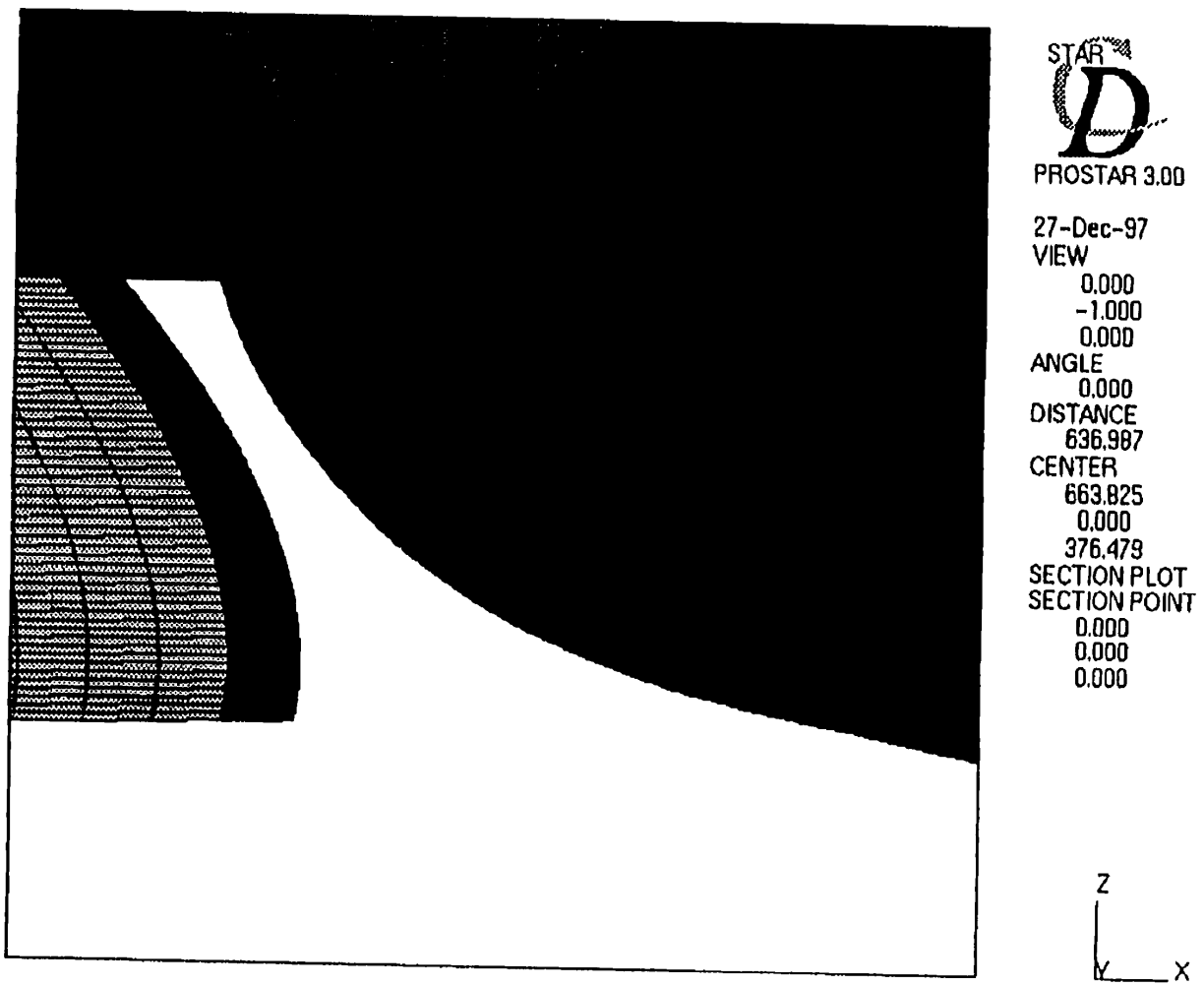


Figure 6.2: Maillage 2- dans le plan de symétrie de l'obstacle

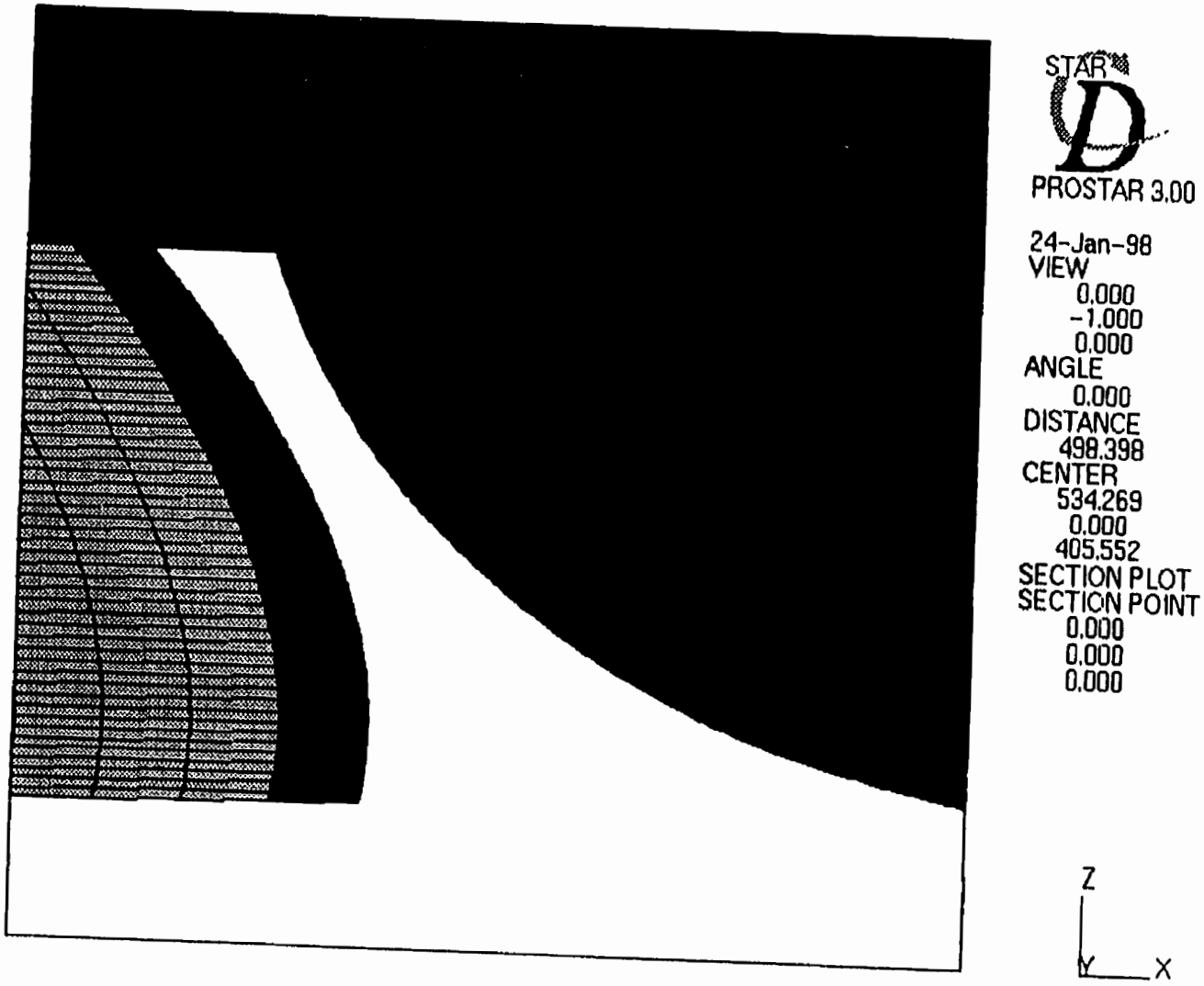


Figure 6.3: Maillage 3- dans le plan de symétrie de l'obstacle

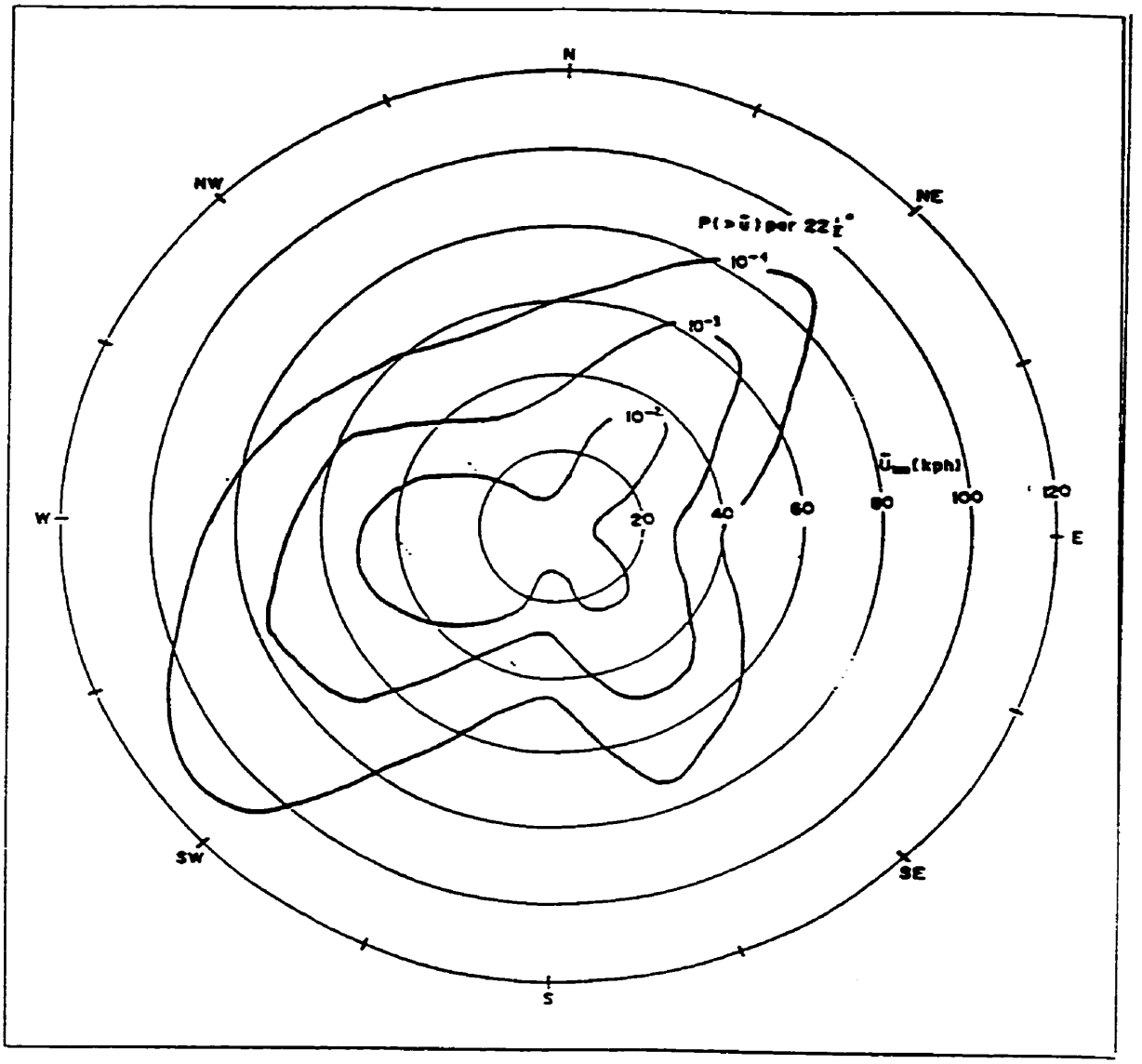


Figure 6.4: Probabilité du vent évaluée sur 10 ans en fonction de la direction et de l'amplitude à 300 m au dessus de Montréal pendant la période de l'hiver extrapolé à partir de mesures prises à 10 m au-dessus du sol à l'aéroport Dorval

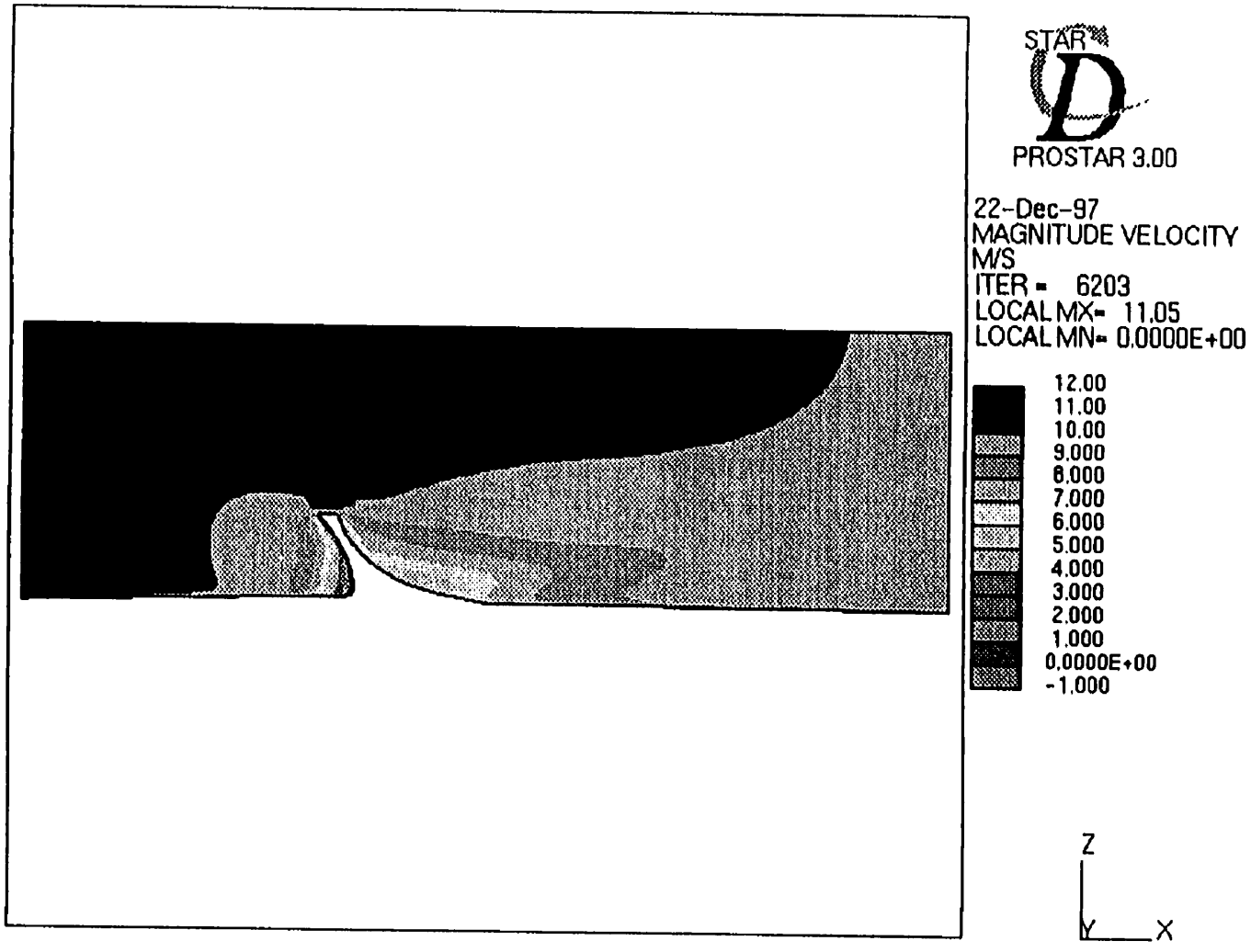


Figure 6.5: Maillage 1- intensité de la vitesse pour le dans le plan $y = 0$

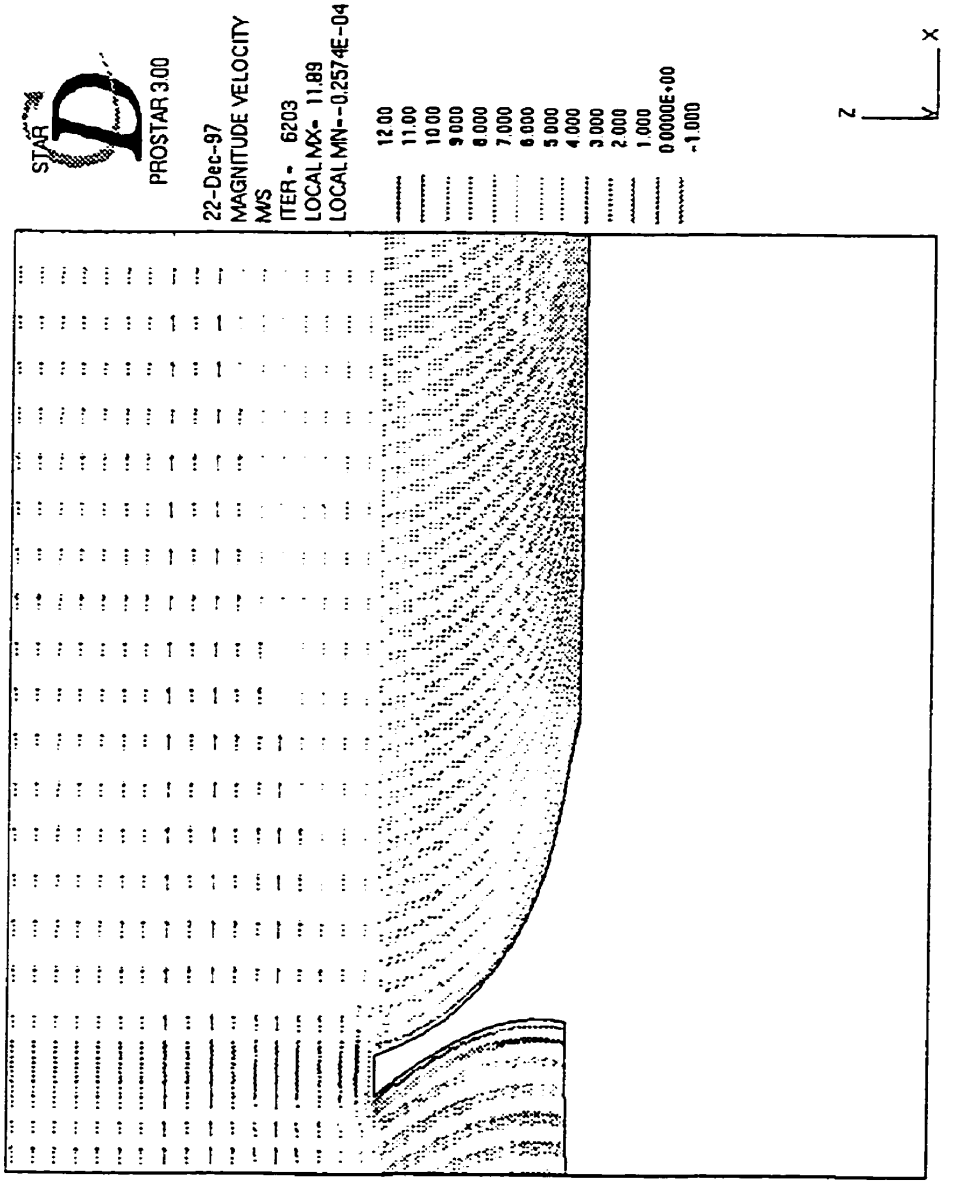


Figure 6.6: Vecteurs vitesse dans le plan $y = 0$

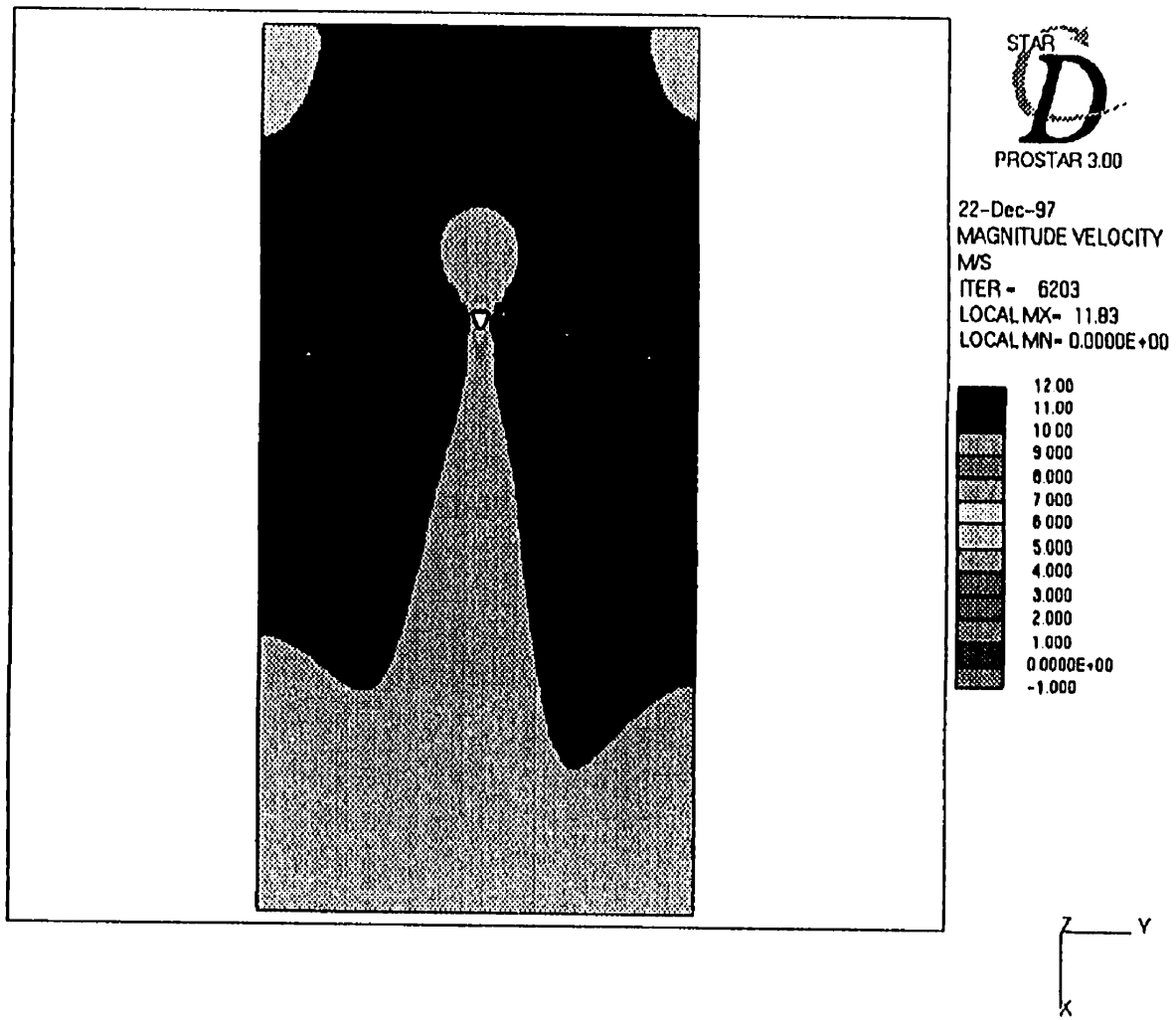


Figure 6.7: Intensité de la vitesse dans le plan $z \sim H$

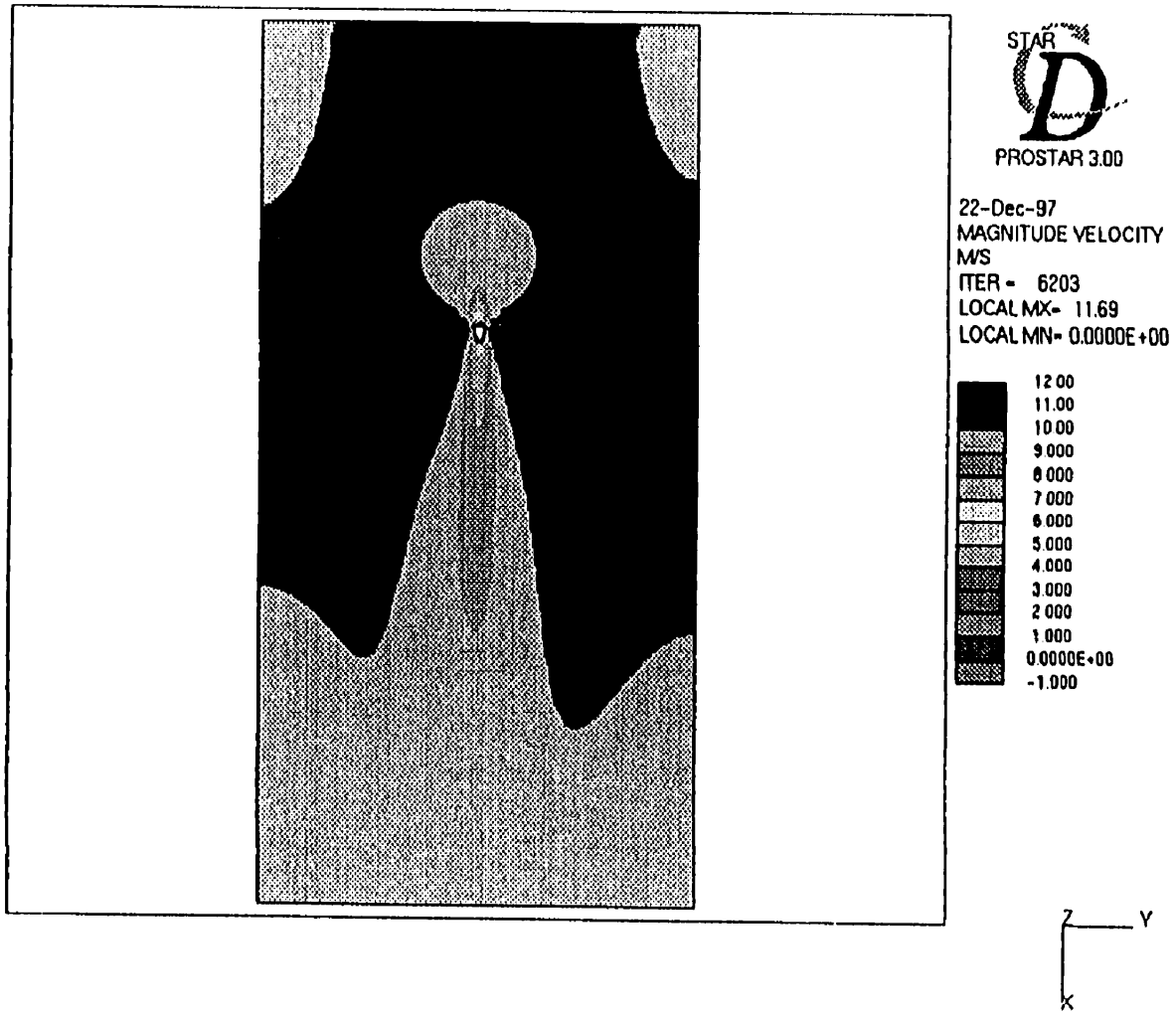


Figure 6.8: Intensité de la vitesse dans le plan $z = 2/3 \times H$

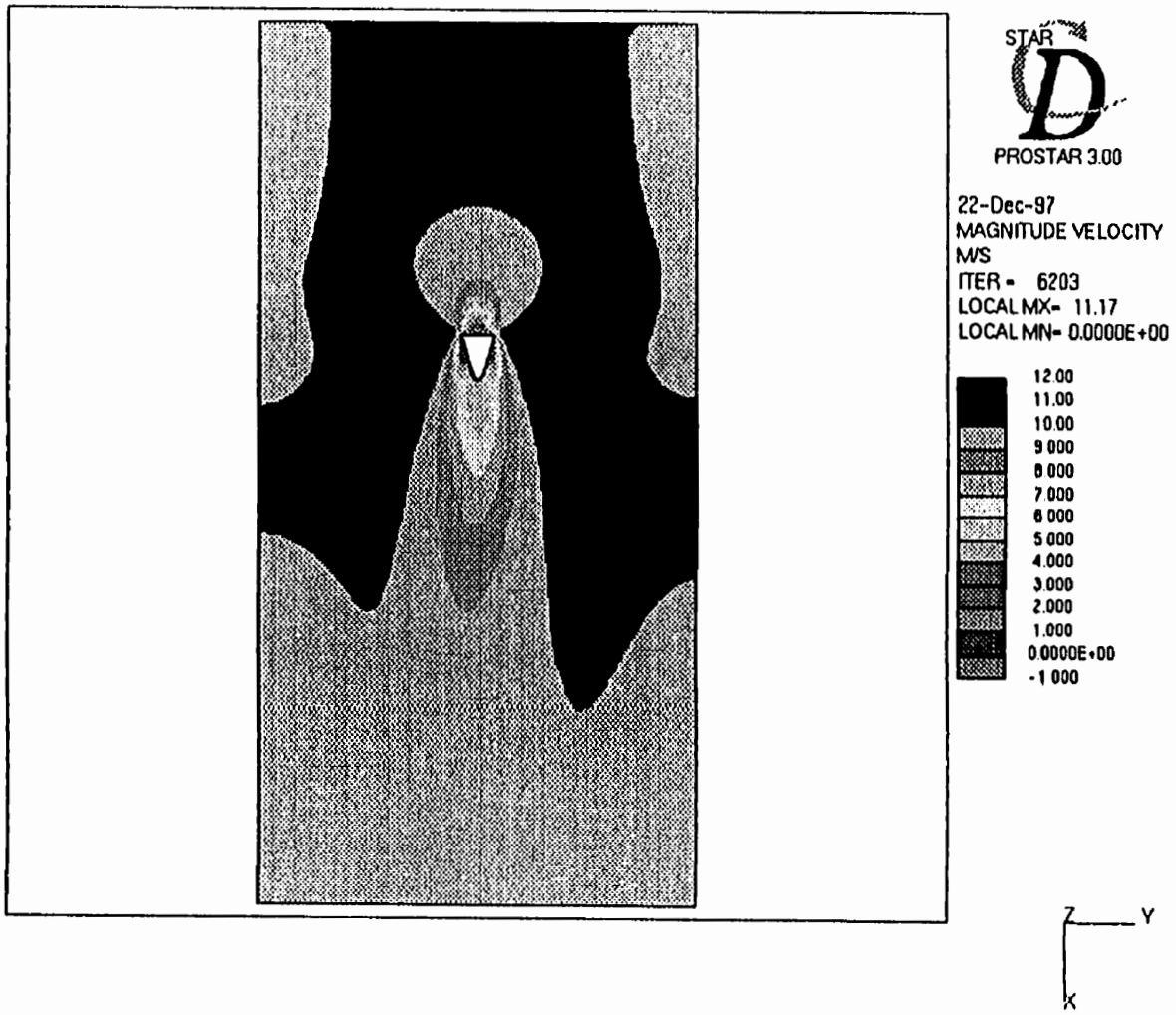


Figure 6.9: Intensité de la vitesse dans le plan $z = 1/3 \times H$

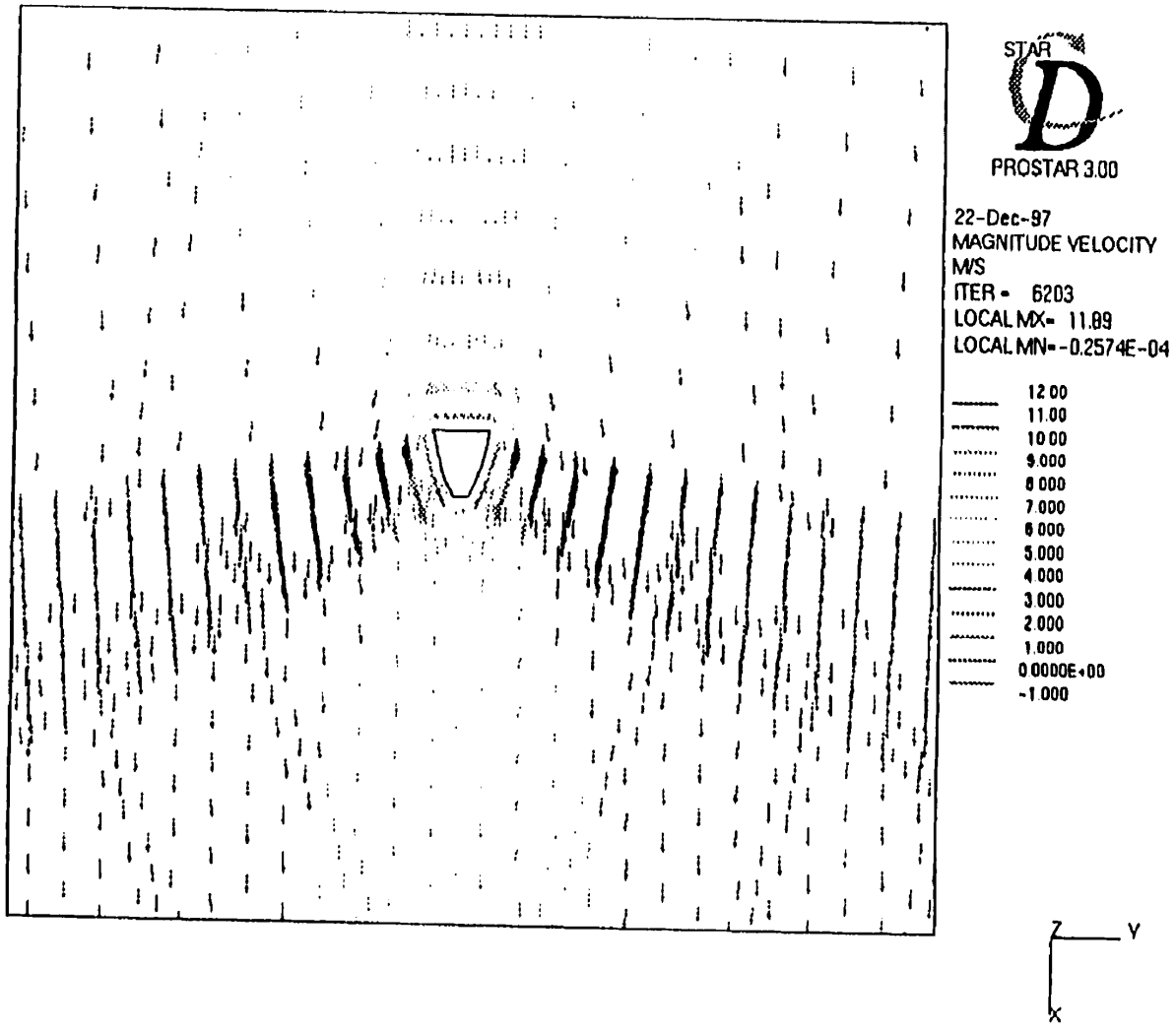


Figure 6.10: Vecteurs vitesse dans le plan $z = 1/3 \times H$

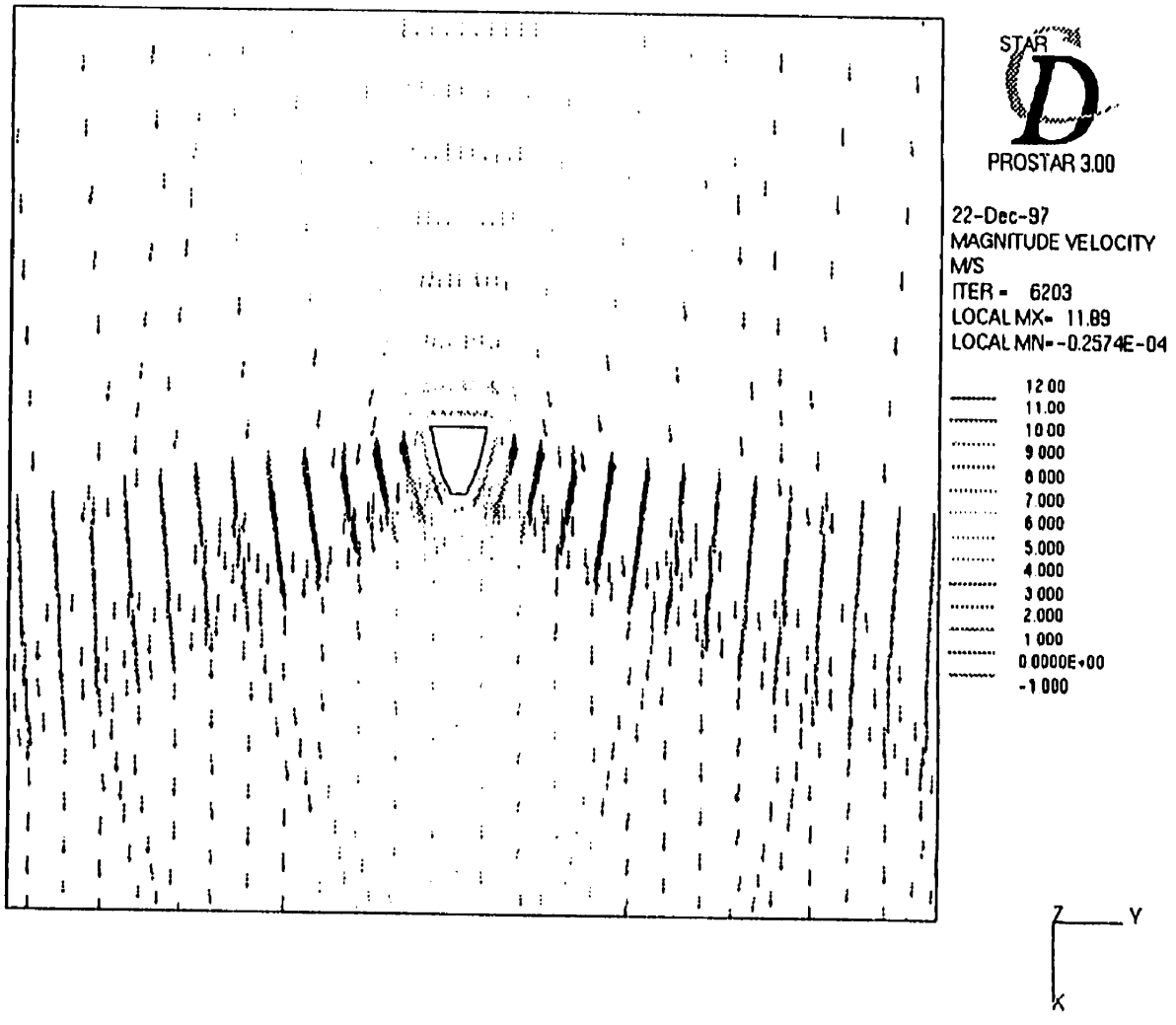


Figure 6.11: Vecteurs vitesse dans le plan $z = 2/3 \times H$

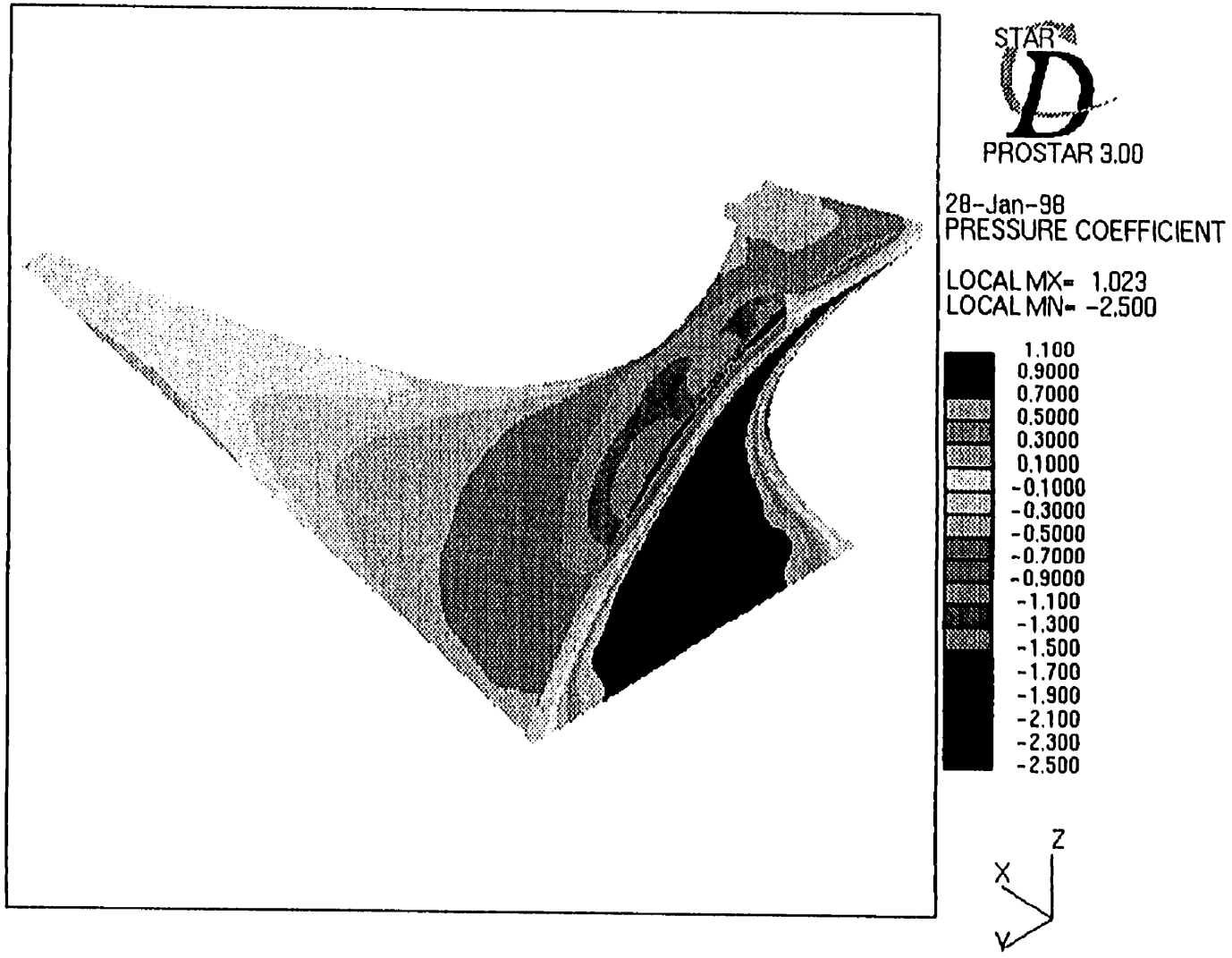


Figure 6.12: Maillage 3- coefficient de pression C_p sur la première couche de cellule sur la paroi

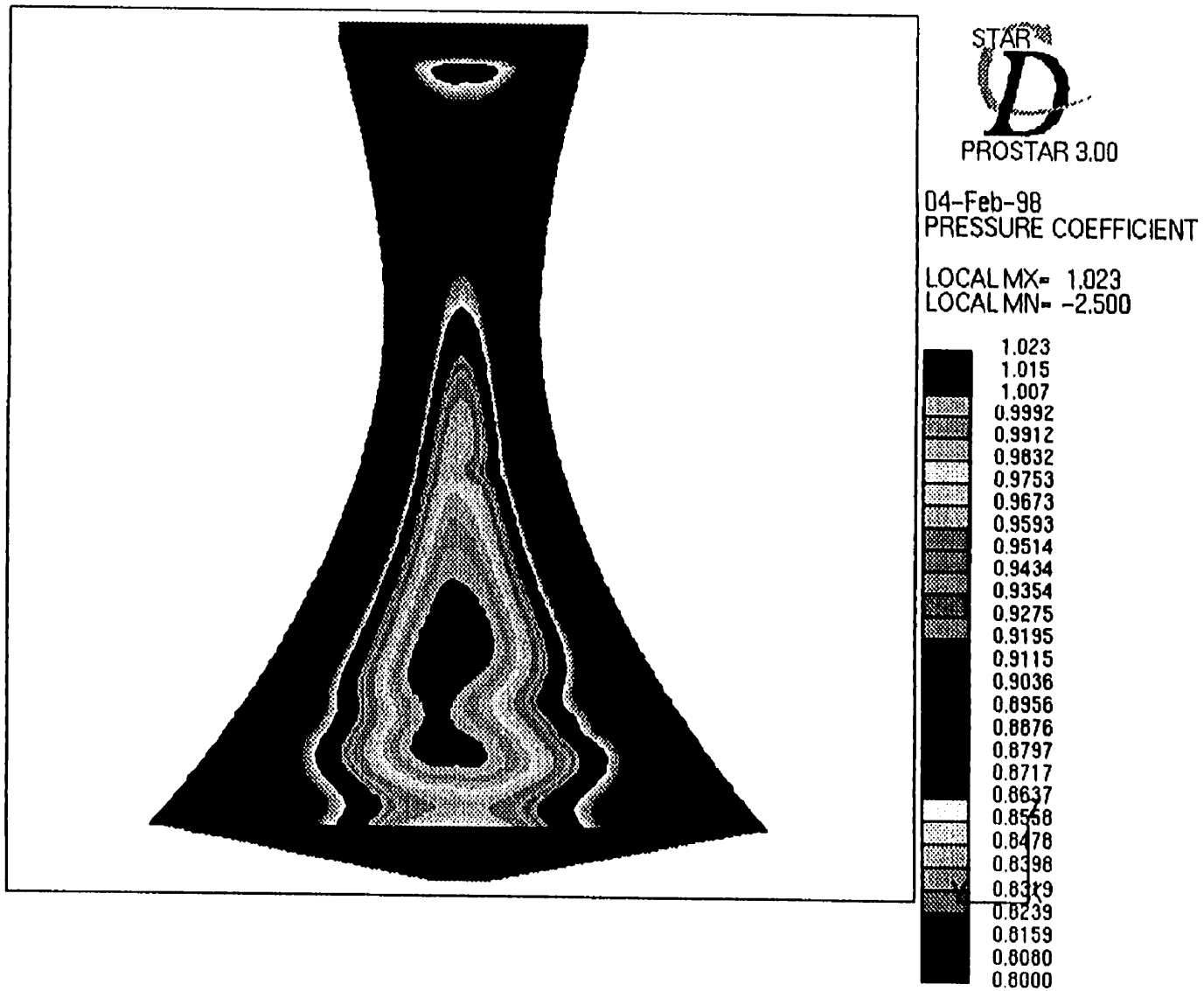


Figure 6.13: Maillage 3- C_p sur la première couche de cellule sur la paroi

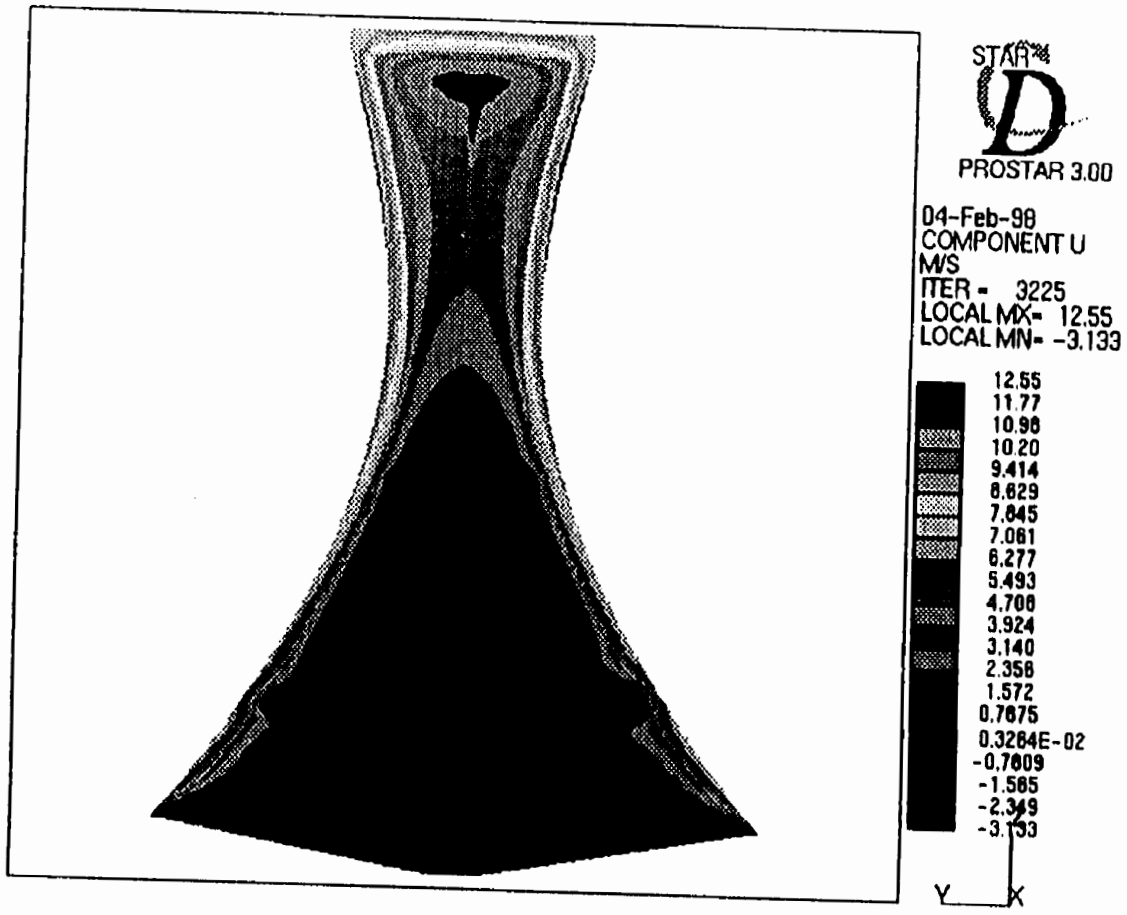


FIG. *6.14:* Maillage 3- intensité de la composante U de la vitesse sur la premiere couche de cellule sur la paroi, face frontal (amont)

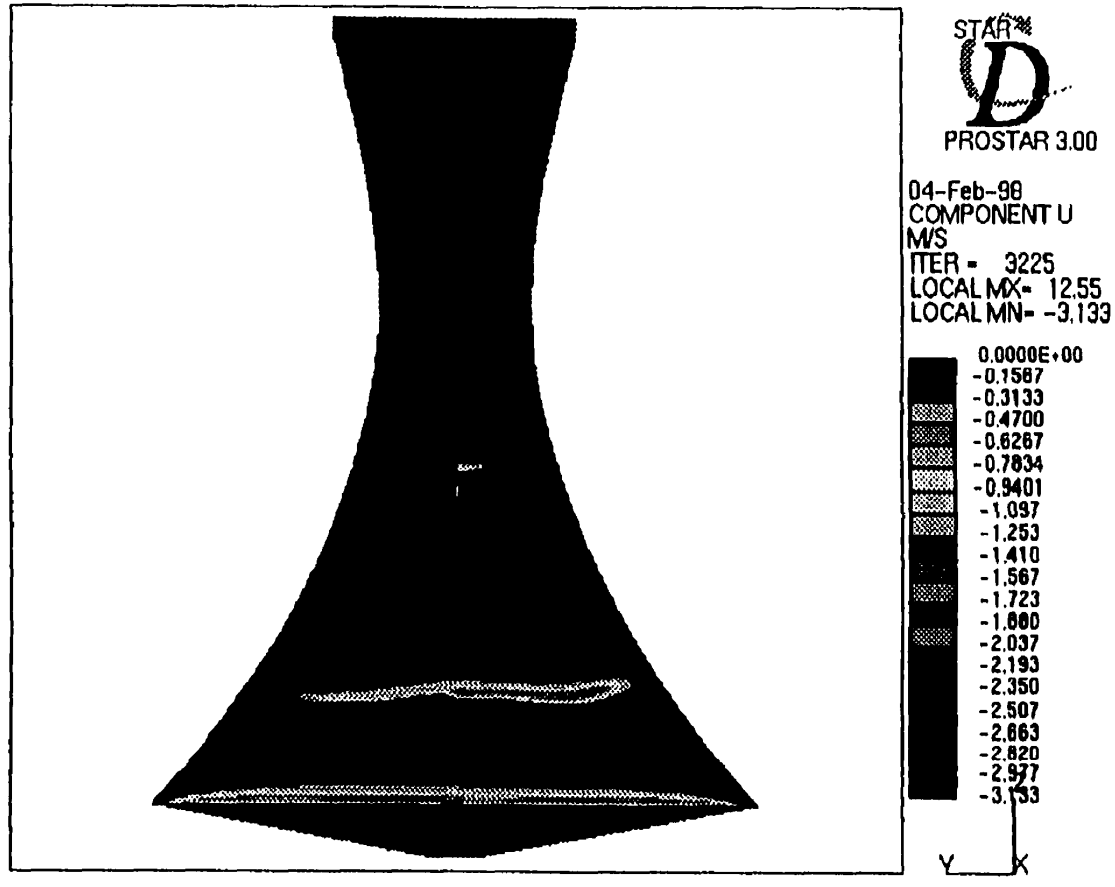


FIG. *6.15*: Maillage 3- intensité de la composante U de la vitesse sur la premiere couche de cellule sur la paroi, face frontal (amont)

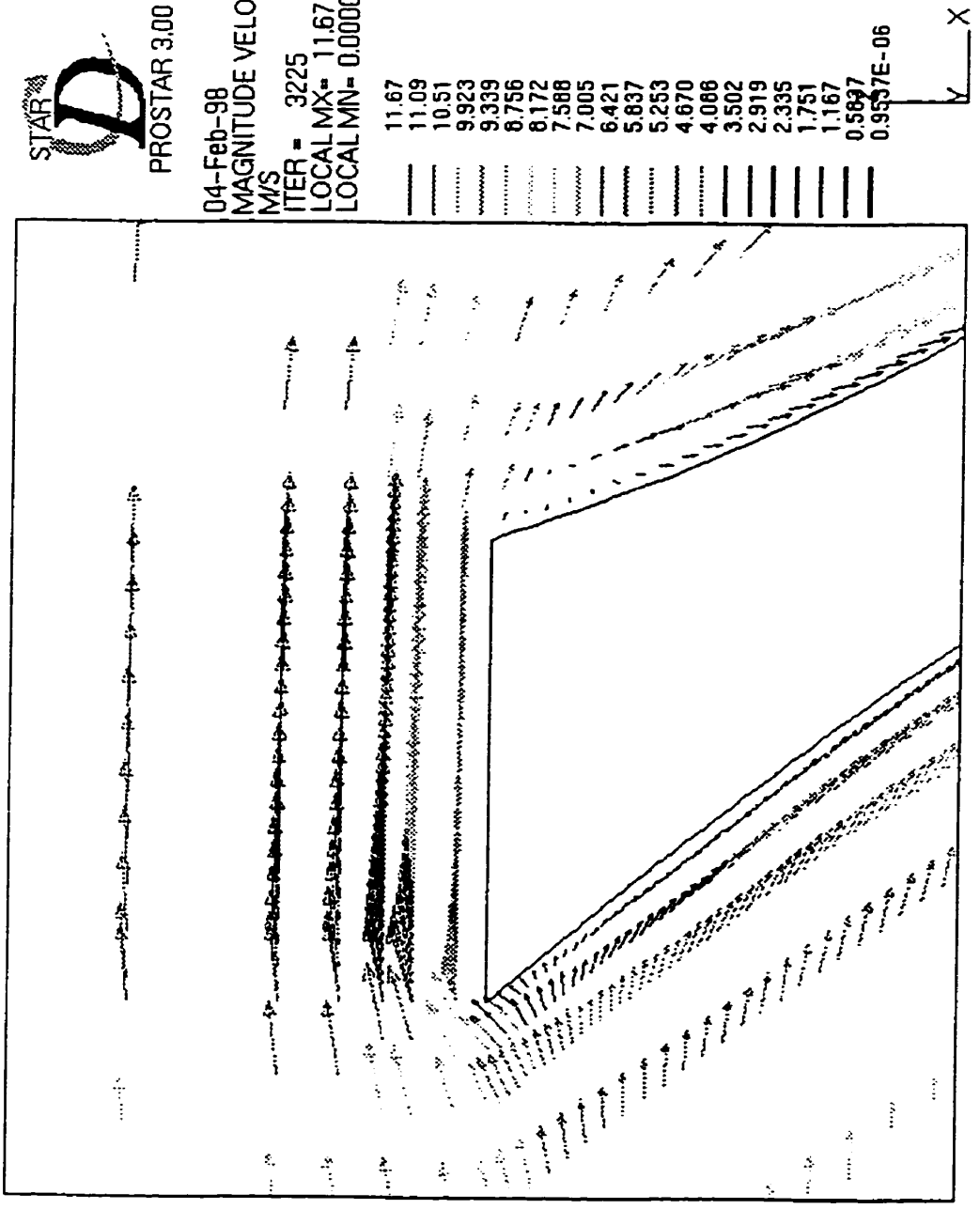


Figure 6.16: Vecteurs vitesse

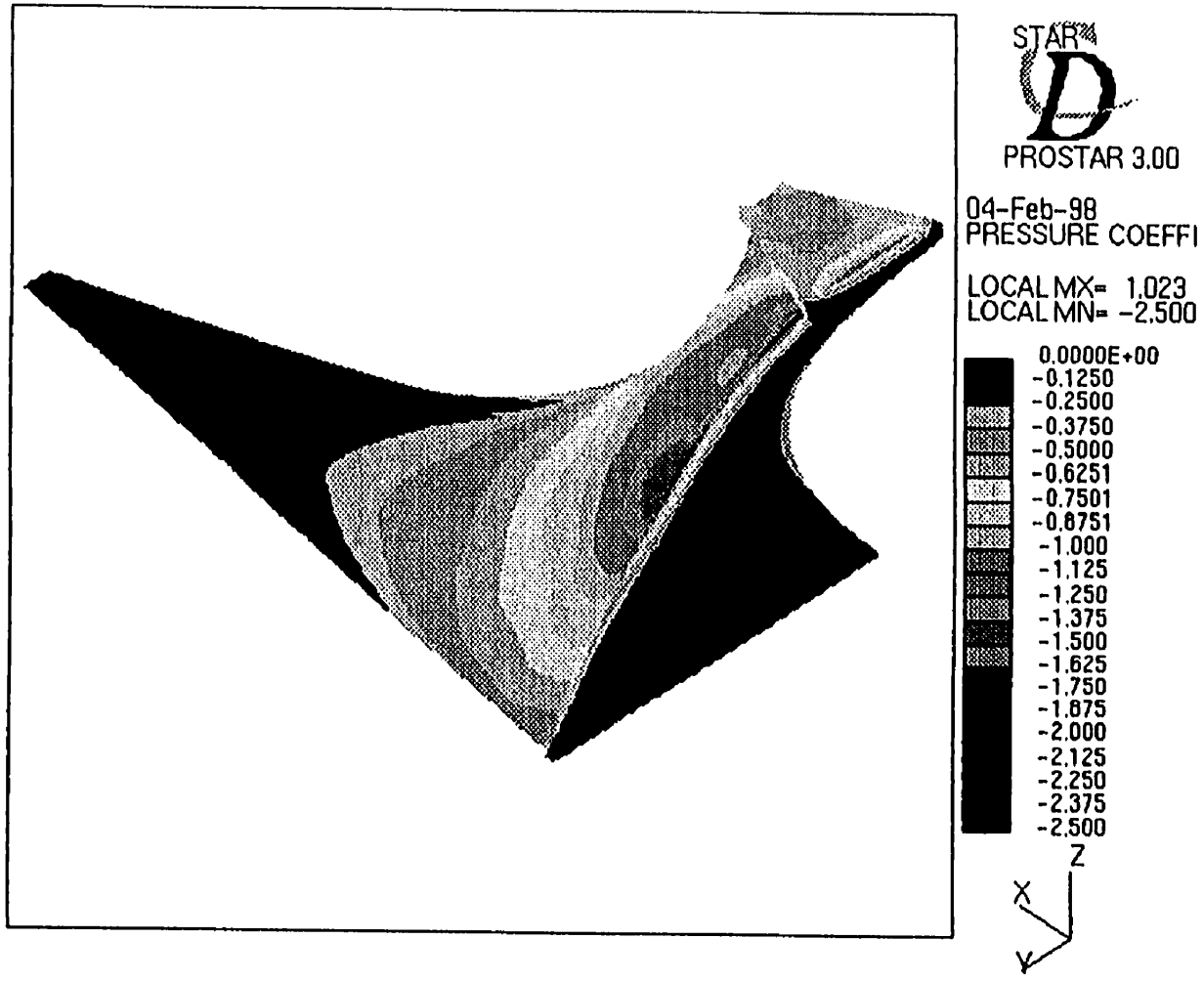


Figure 6.17: Maillage 3- C_p sur la première couche de cellule sur la paroi, derrière l'obstacle (aval)

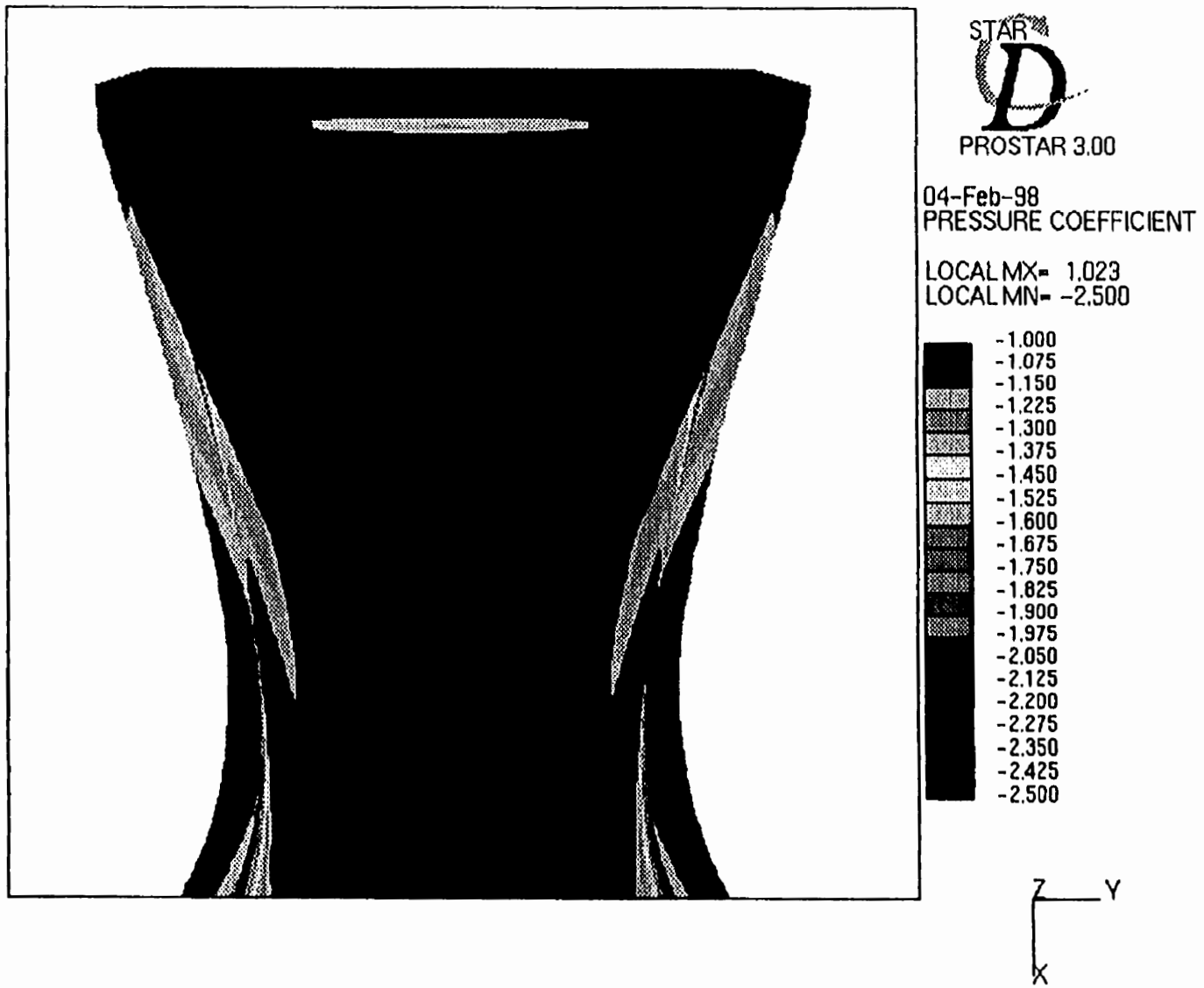


Figure 6.18: Maillage 3- C_p sur la première couche de cellule sur la paroi

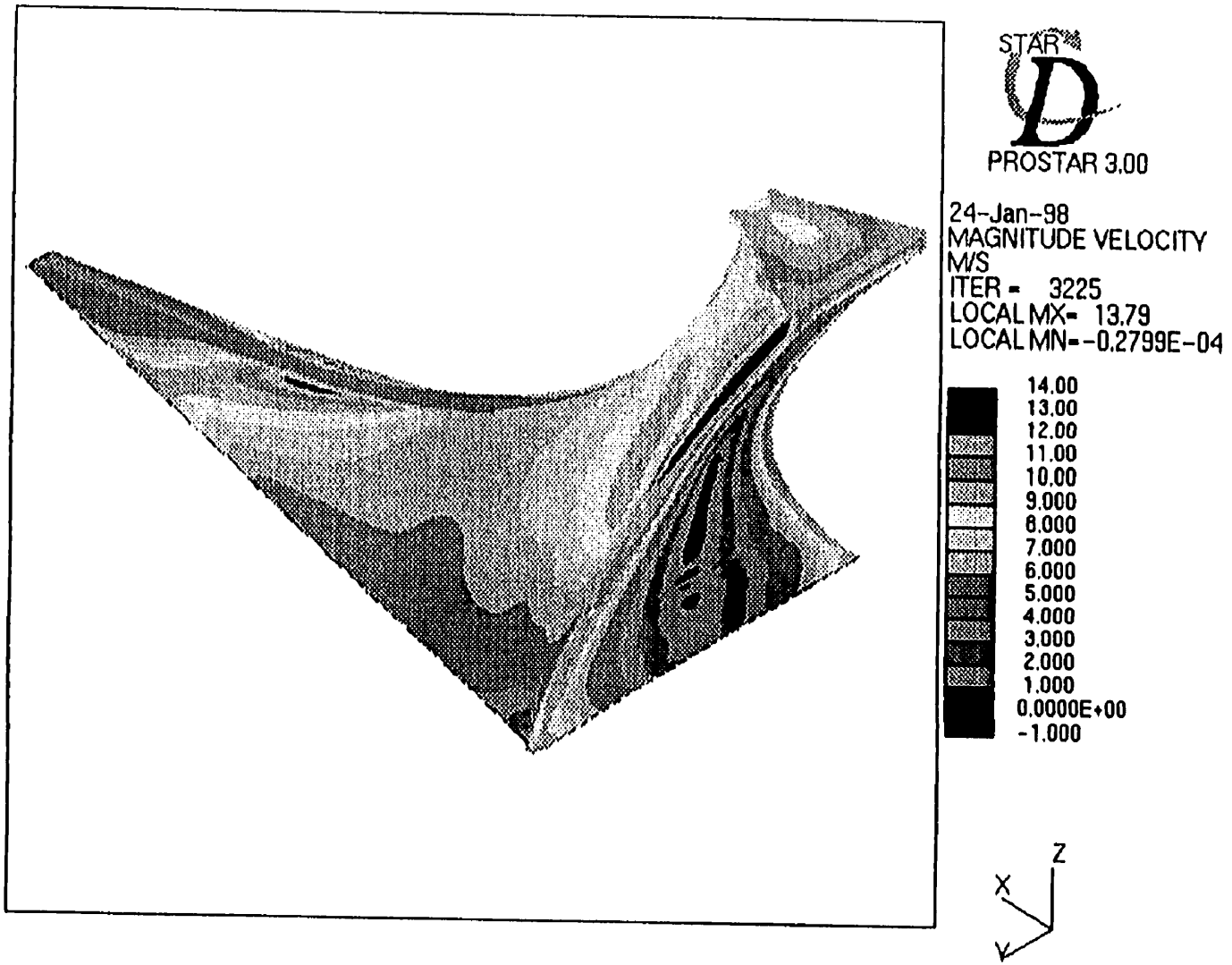


Figure 6.19: Maillage 3- intensité de la vitesse sur la premiere couche de cellule sur la paroi

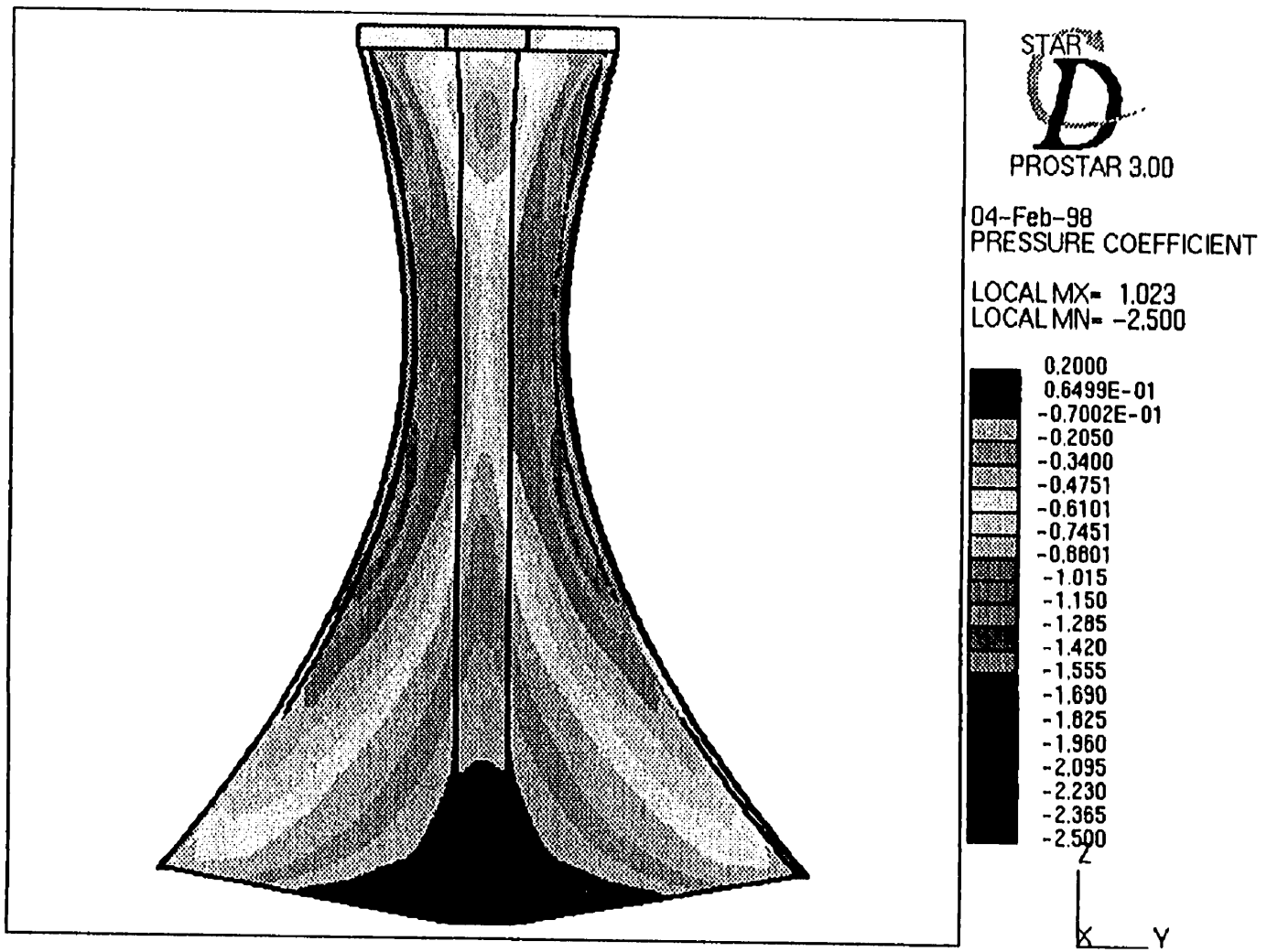


Figure 6.20: Maillage 3- C_p sur la première couche de cellule sur la paroi, derrière l'obstacle (aval)

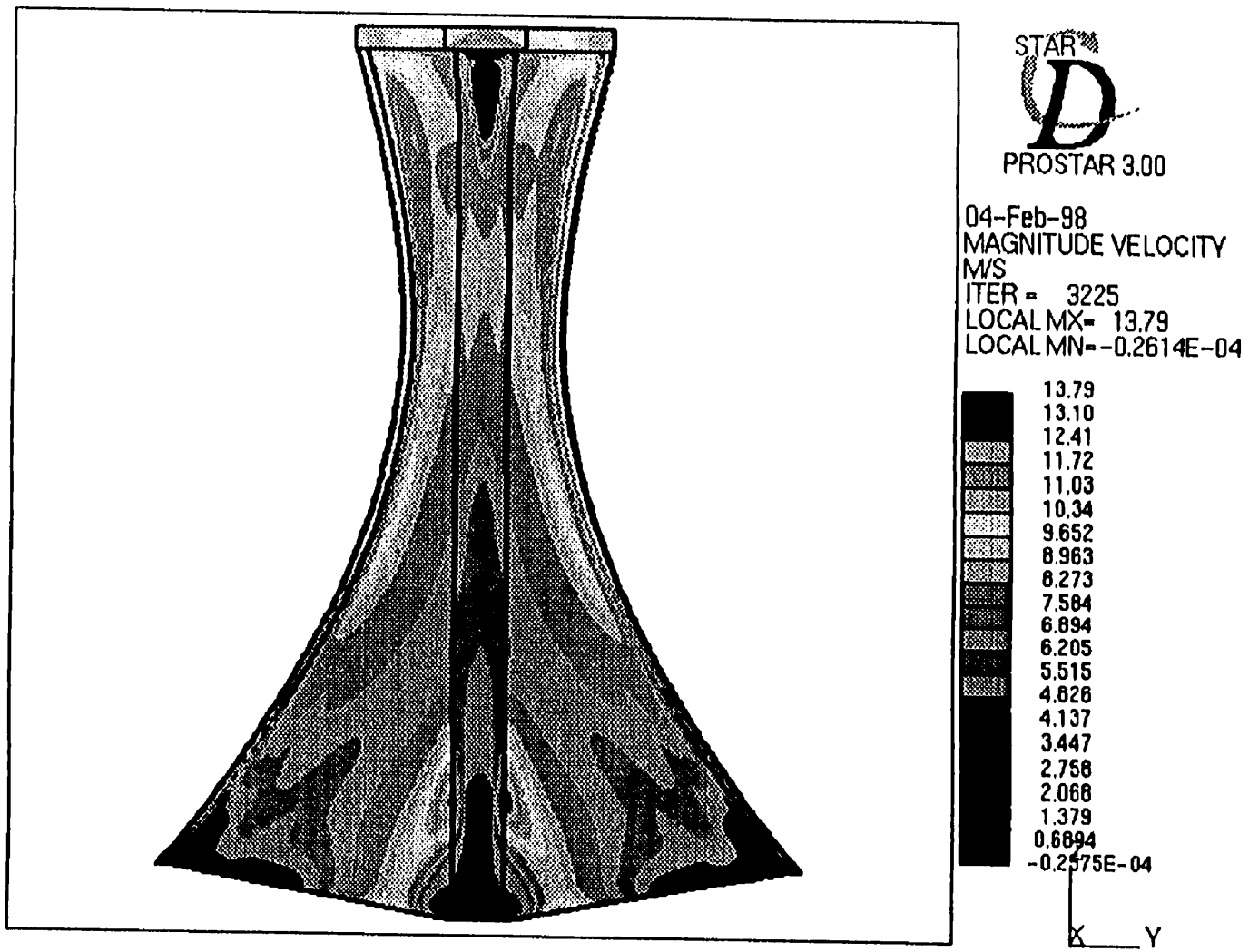


Figure 6.21: Maillage 3- intensité de la vitesse sur la premiere couche de cellule sur la paroi, derrière l' obstacle (aval)

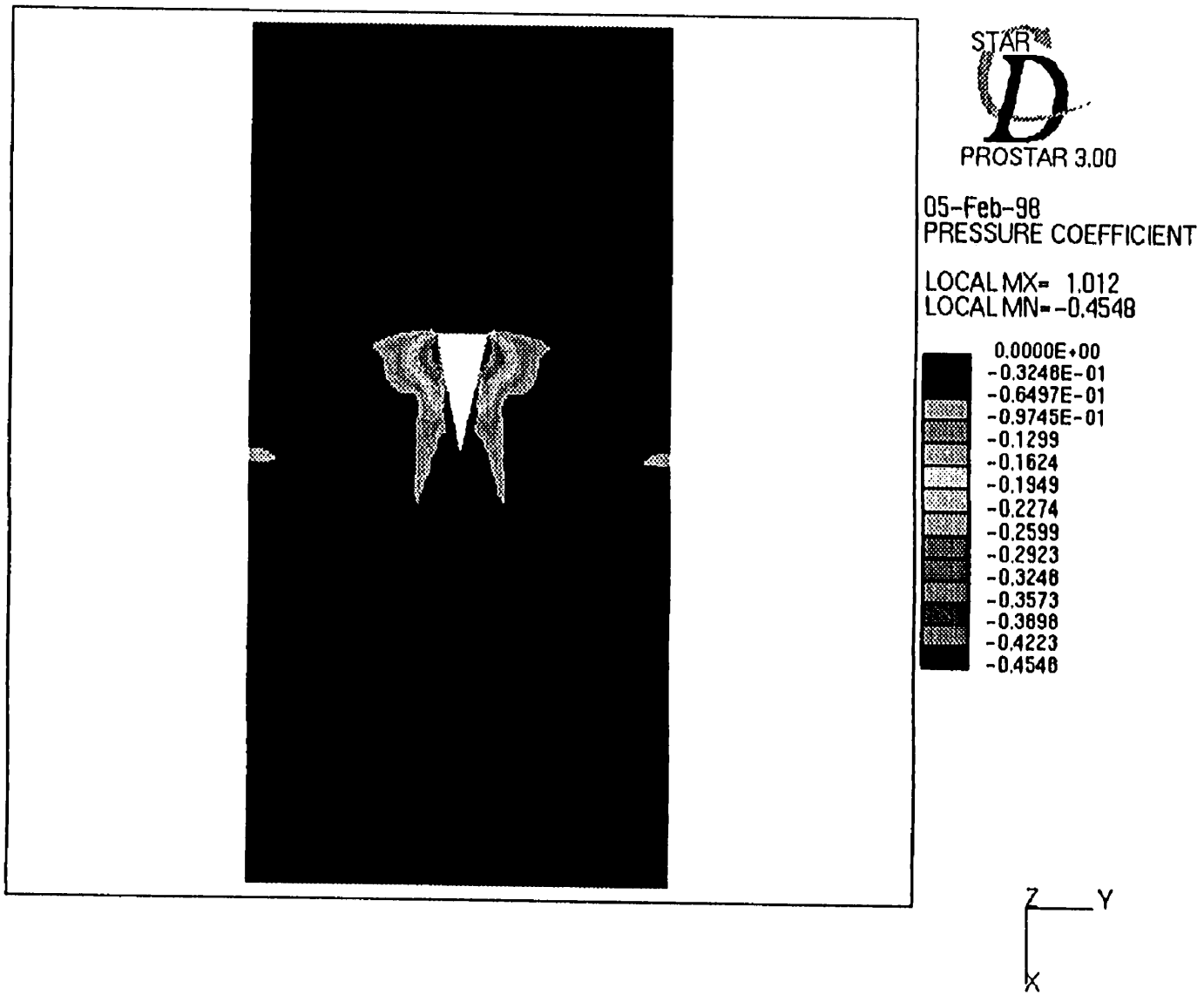


Figure 6.22: Coefficient de pression C_p

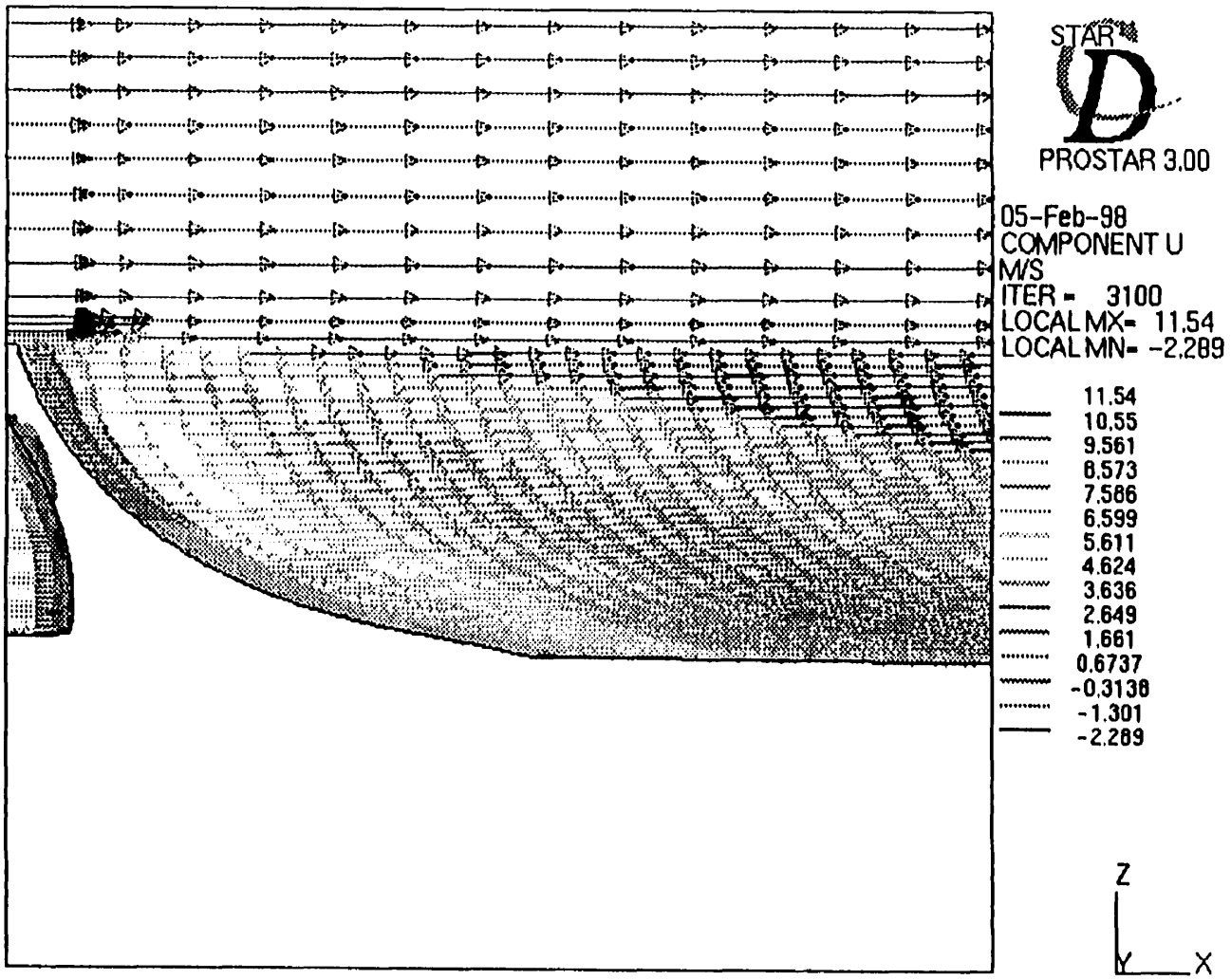


Figure 6.23: Vitesse

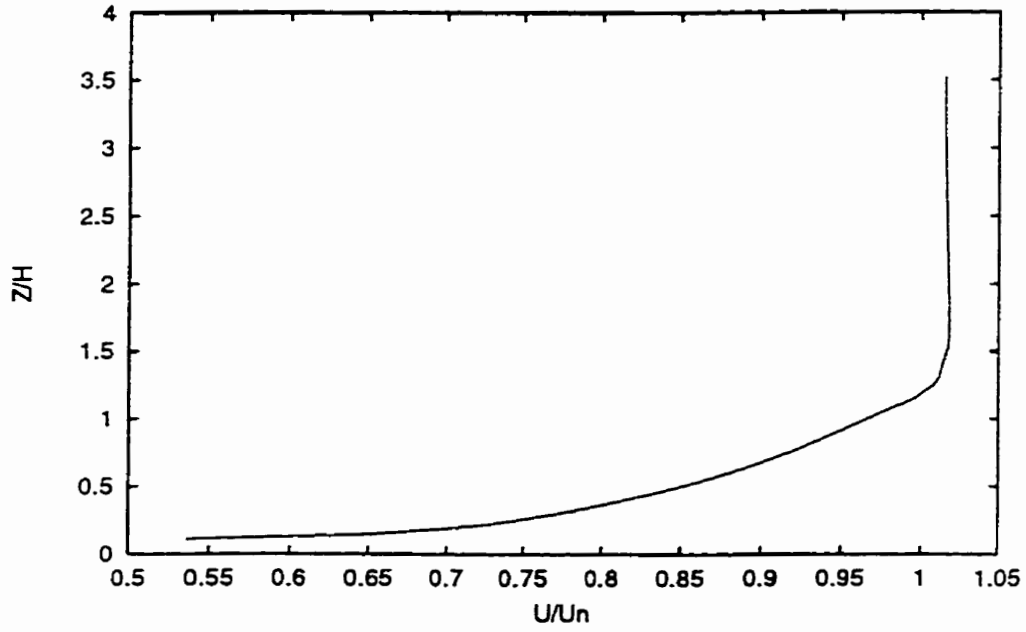


Figure 6.24: Profil de la vitesse à $0.5 \times H$ derrière le mât

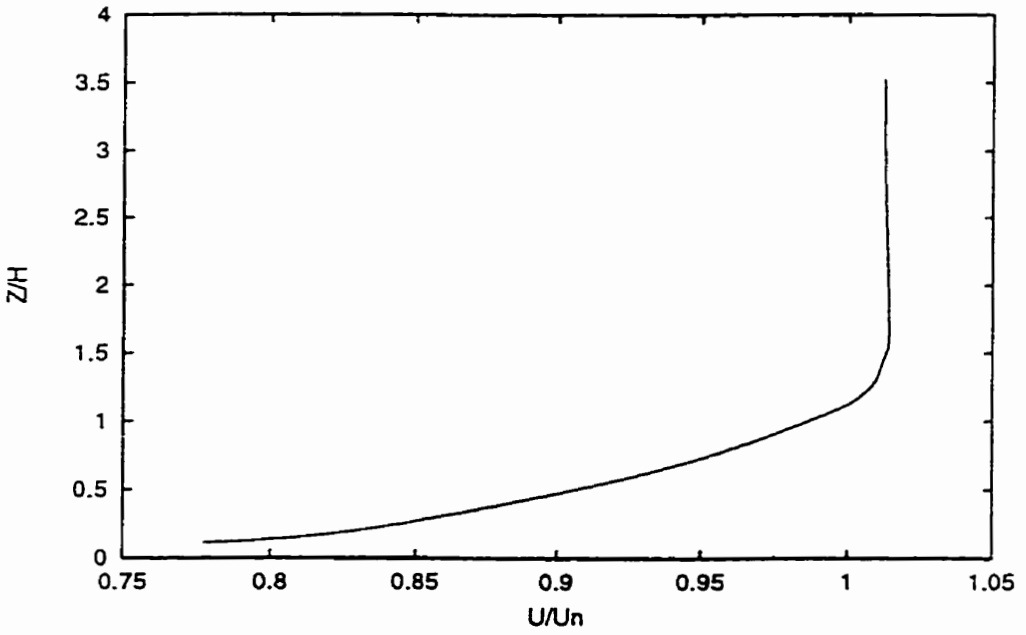


Figure 6.25: Profil de la vitesse à $1.5 \times H$ derrière le mât

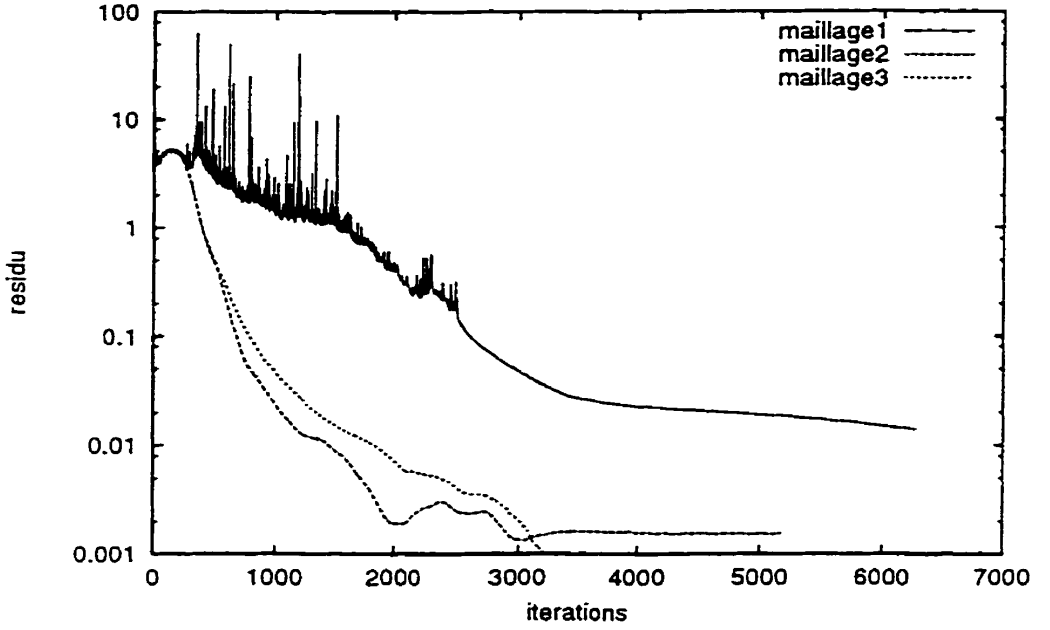


Figure 6.26: effet du maillage sur la convergence

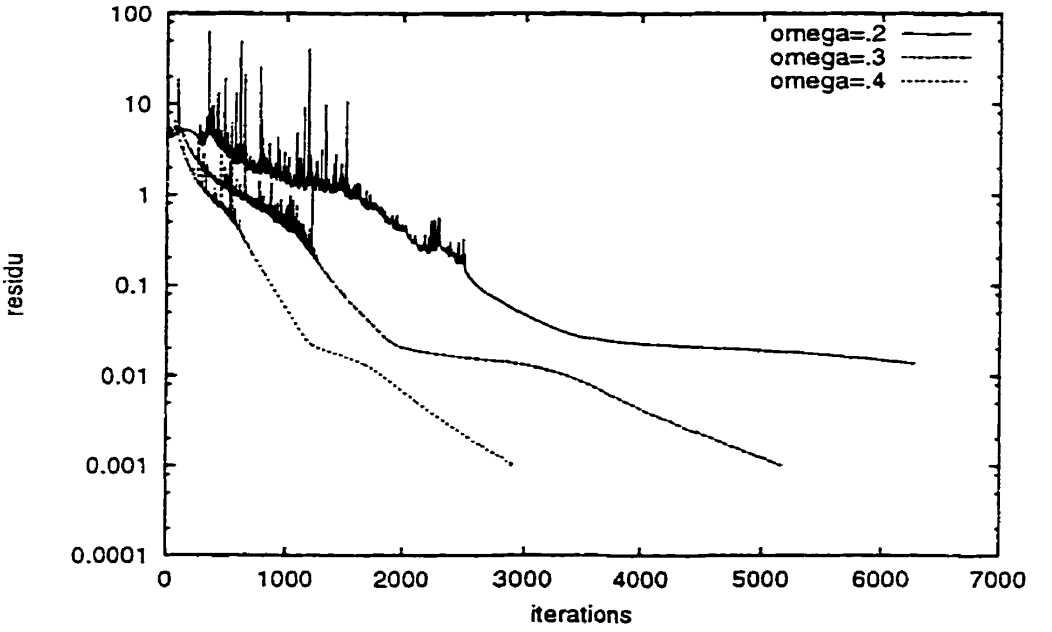


Figure 6.27: effet du facteur de relaxation sur la convergence

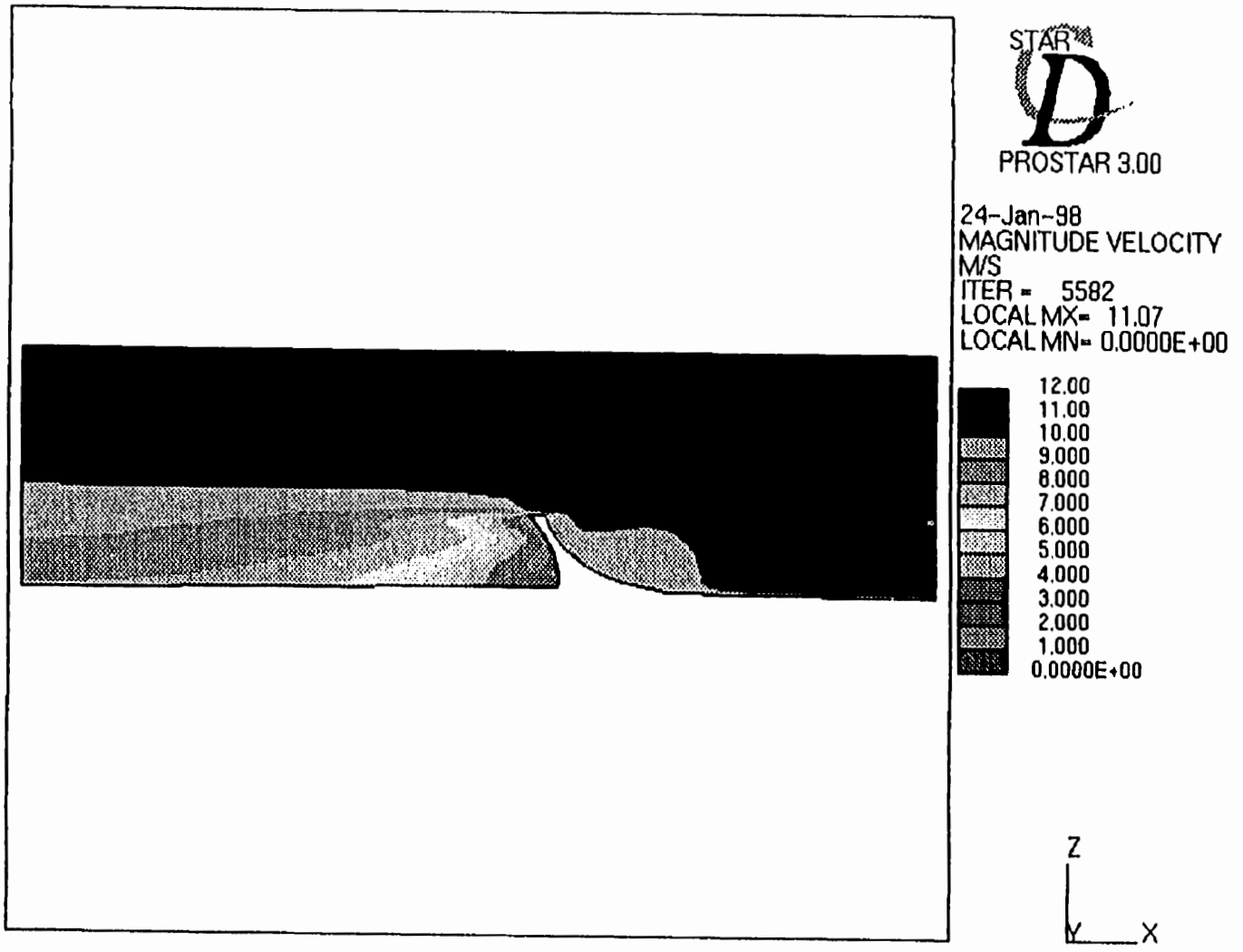


Figure 6.28: Maillage 6. Intensité de la vitesse dans le plan de symétrie

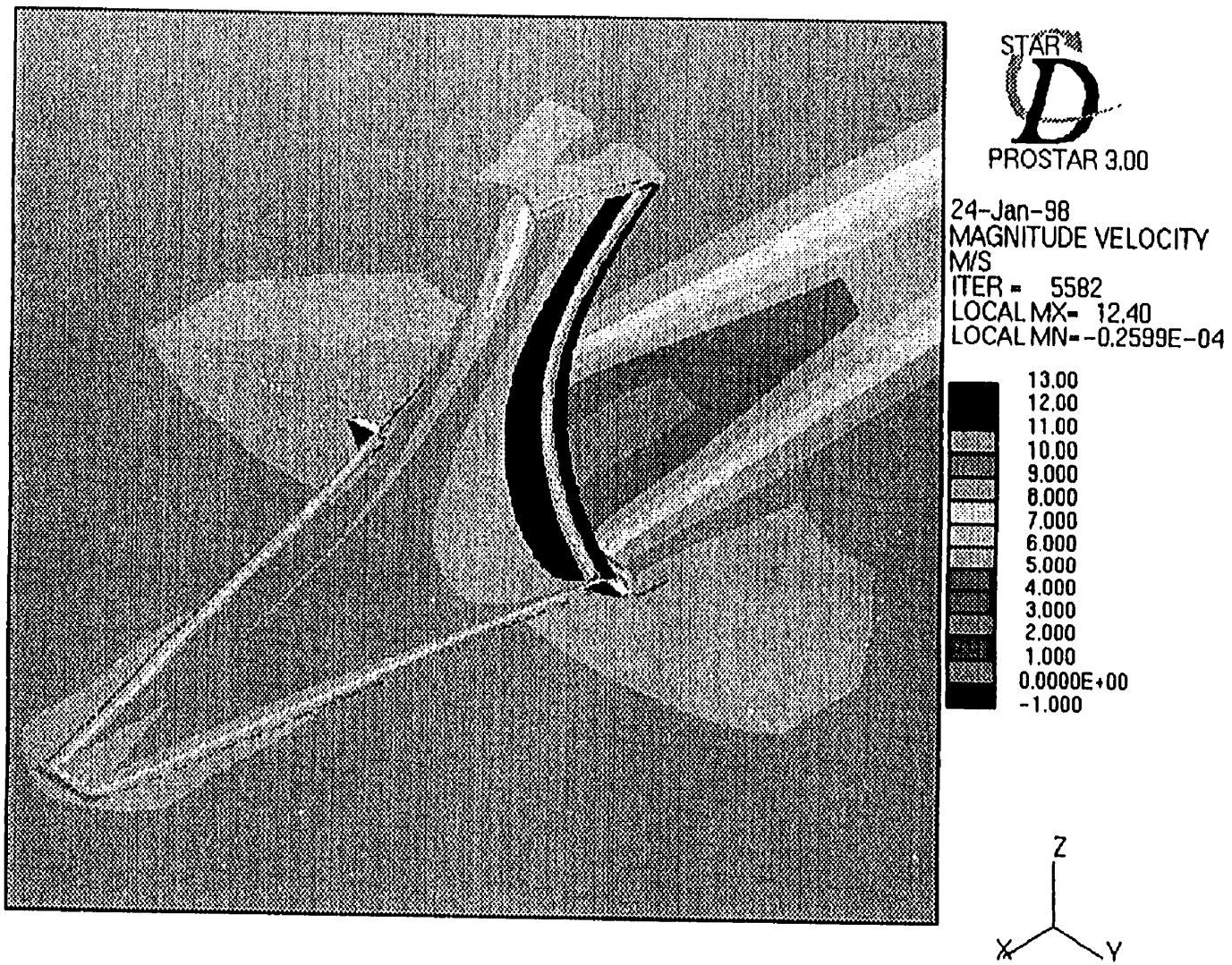


Figure 6.29: Maillage 6. Intensité de la vitesse sur la première couche de cellule sur les murs

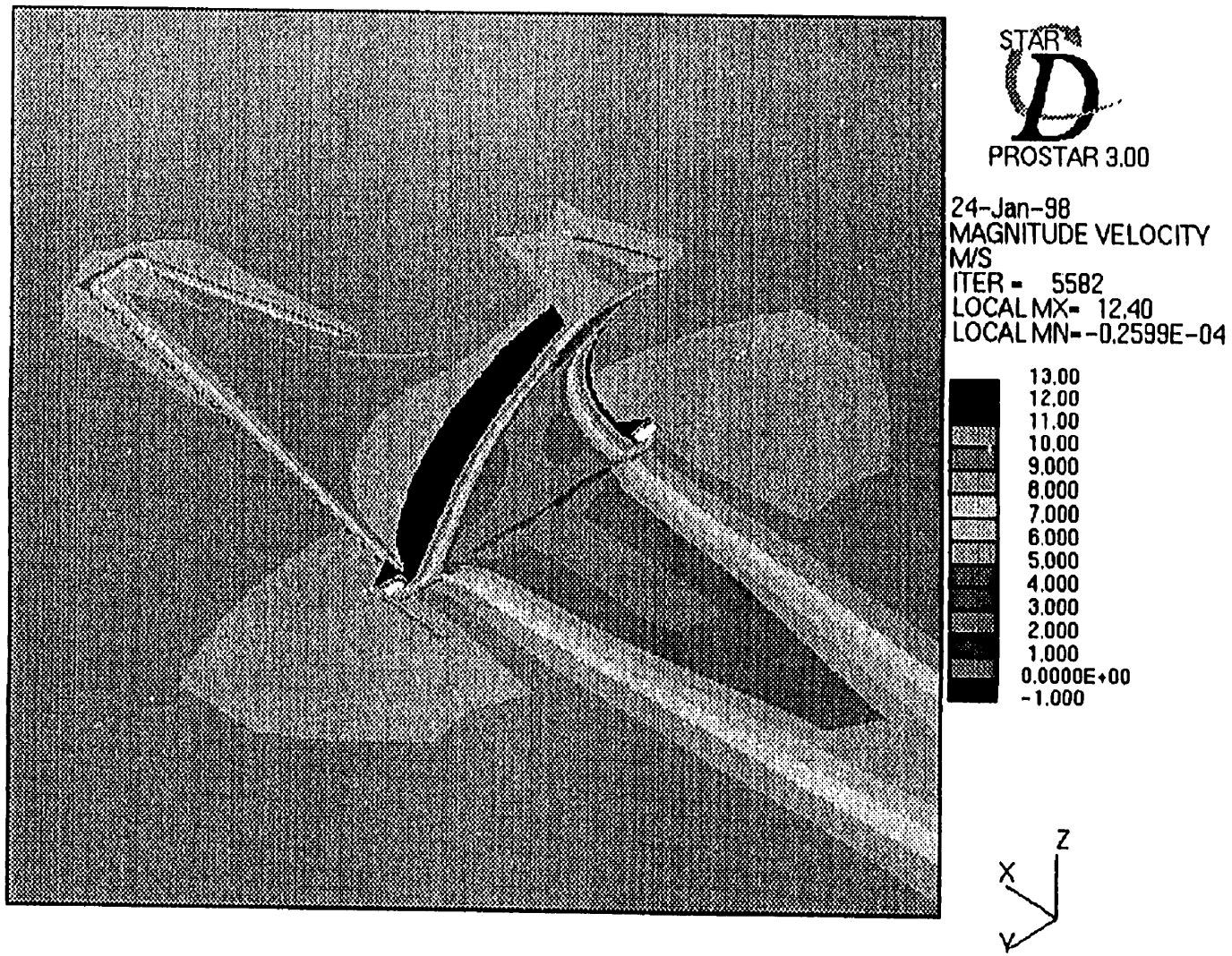


Figure 6.30: Maillage 6. Intensité de la vitesse sur la première couche de cellule sur les murs

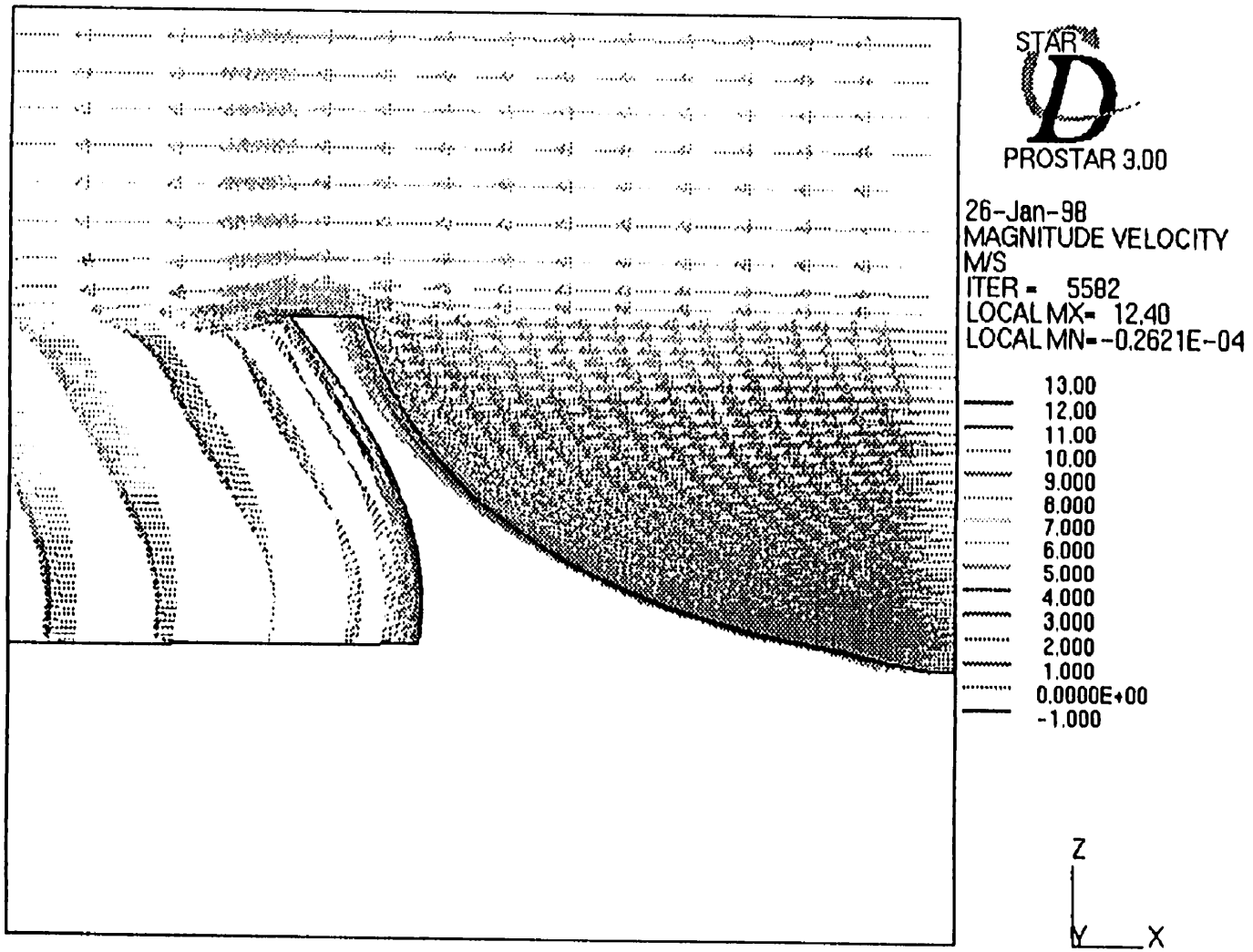


Figure 6.31: Maillage 6. Vecteurs de vitesse à $y = 0$

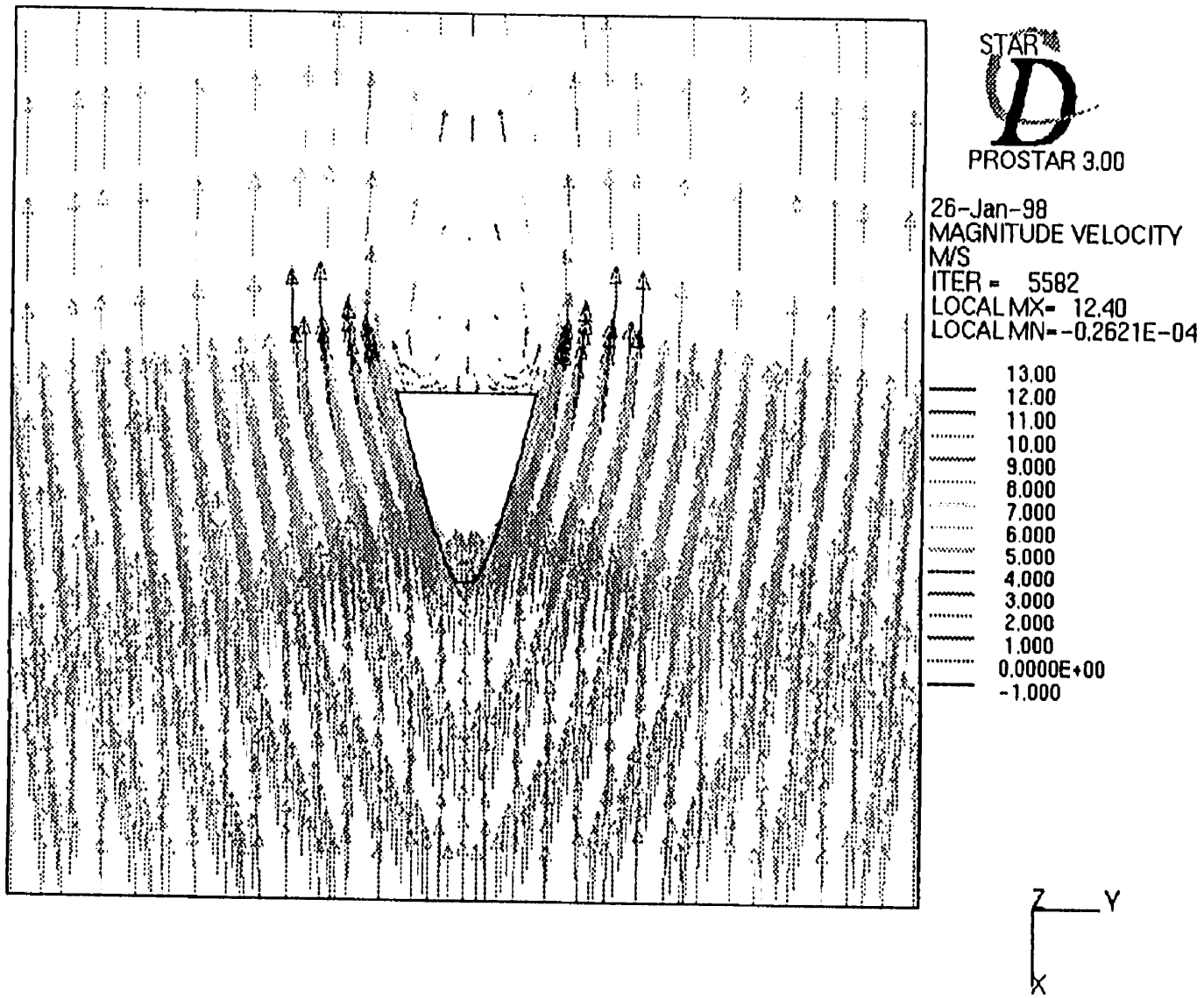


Figure 6.32: Maillage 6. Vecteurs de vitesse à $z = 1/3H$

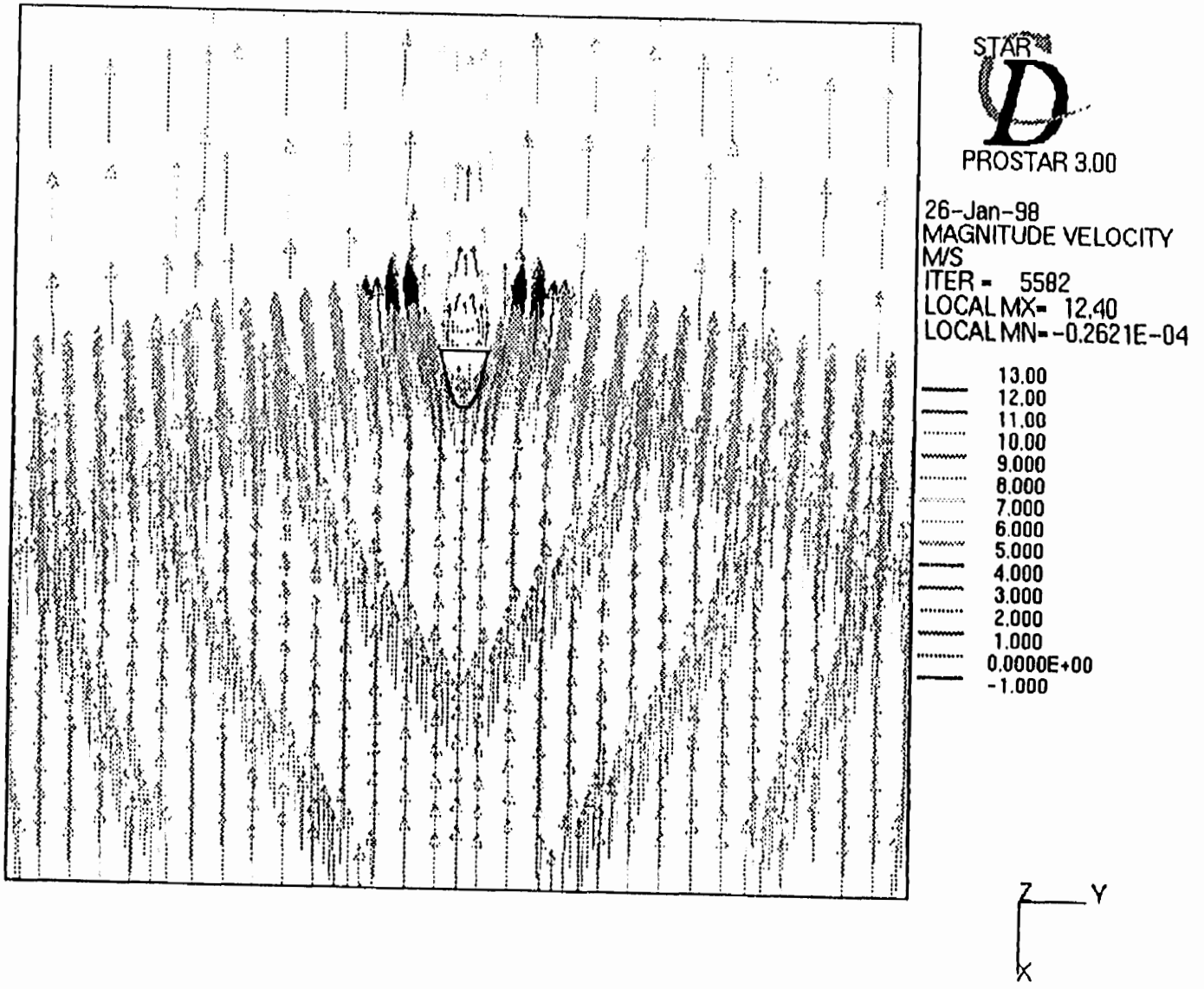


Figure 6.33: Maillage 6. Vecteurs de vitesse à $z = 2/3H$

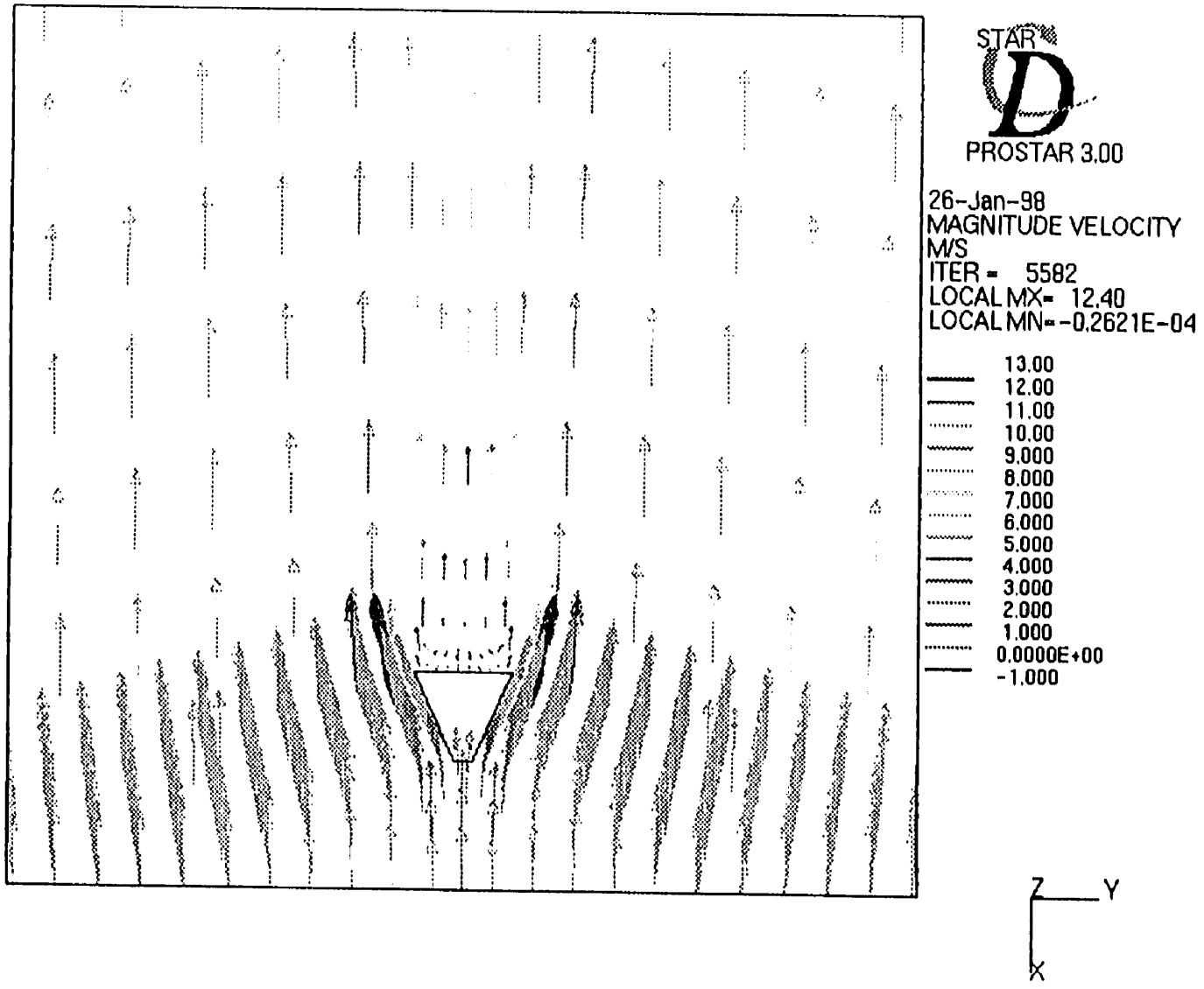


Figure 6.34: Maillage 6. Vecteurs de vitesse à $z = 0.99H$

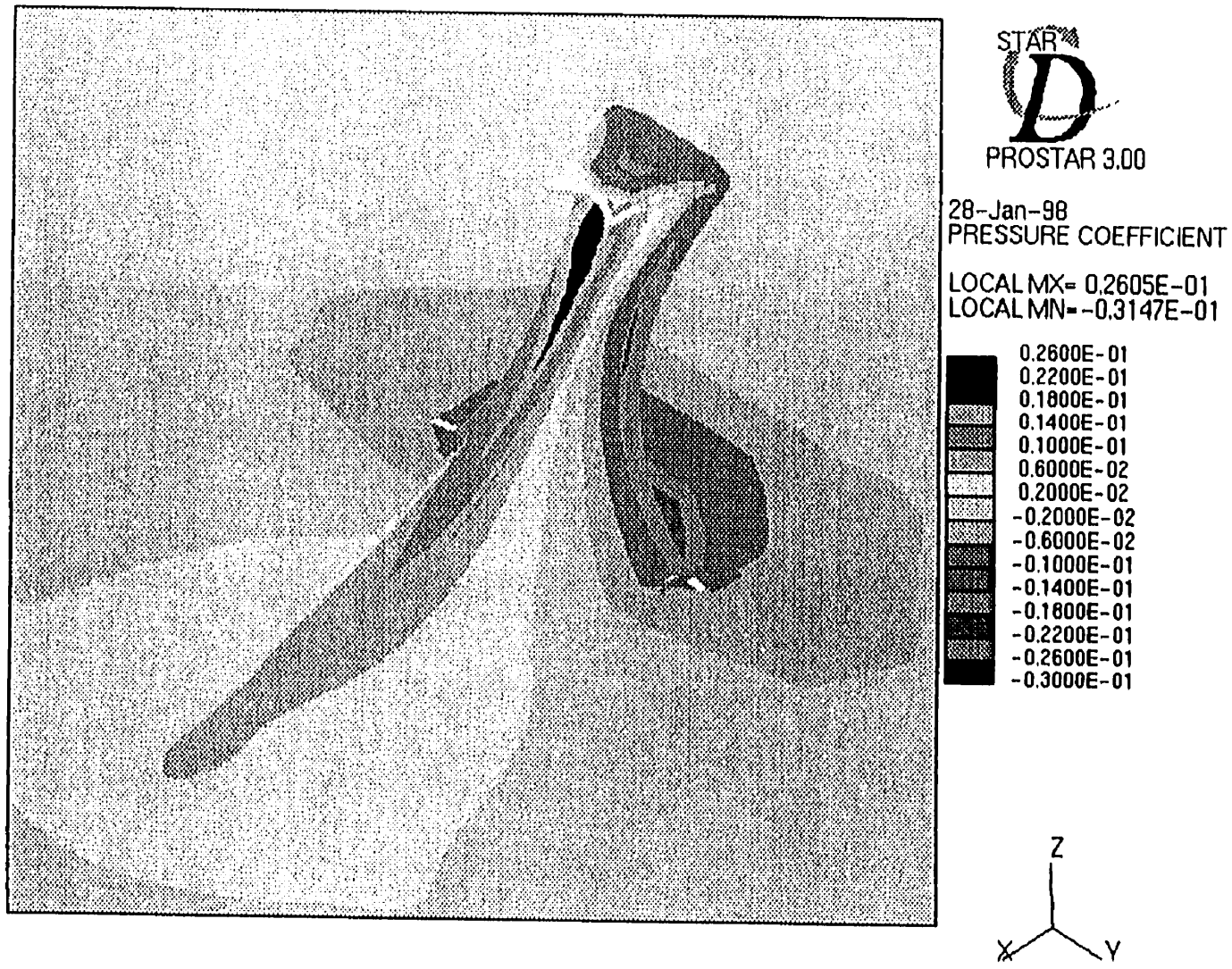


Figure 6.35: Maillage 6. C_p sur la première couche de cellules sur les murs

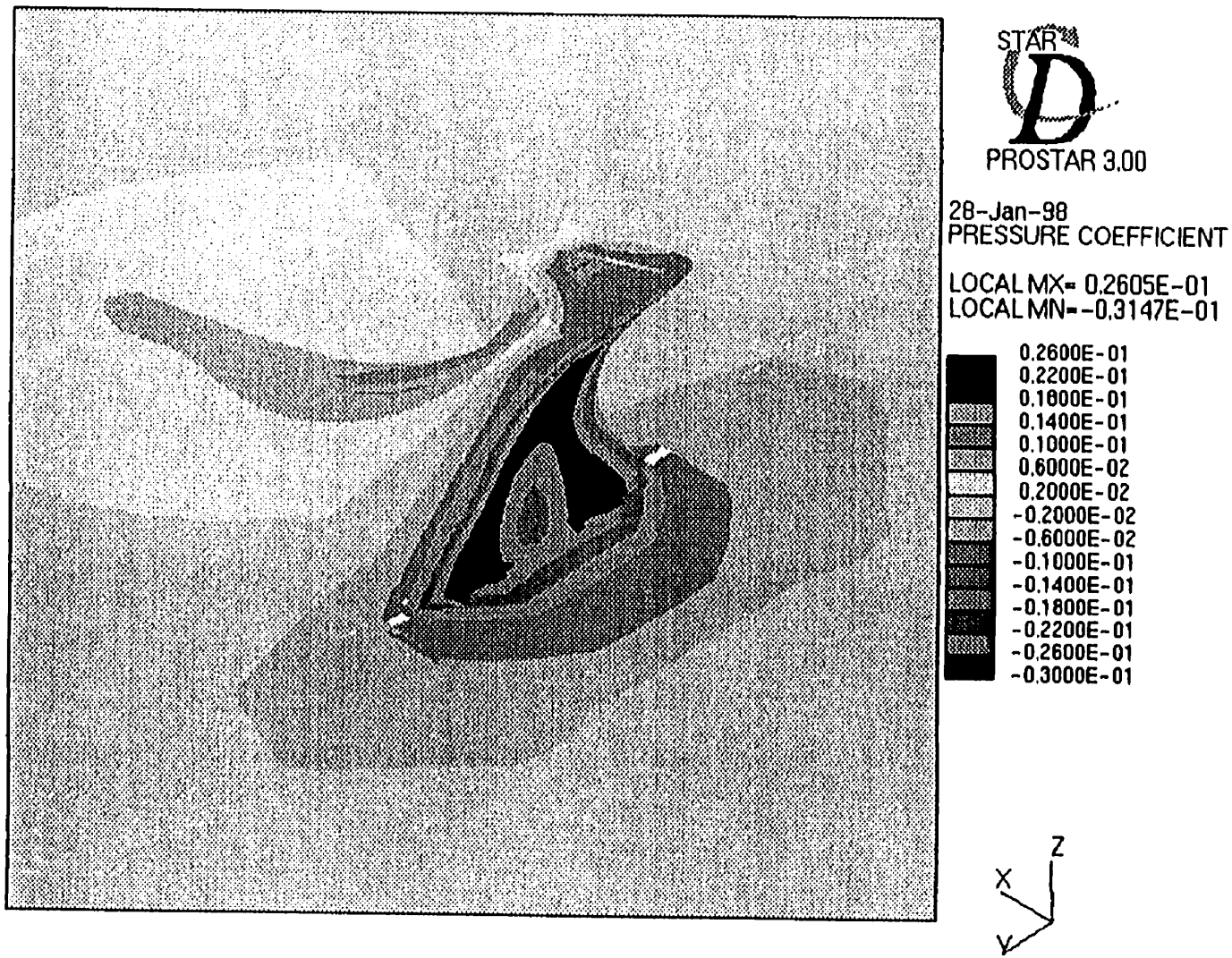


Figure 6.36: Maillage 6. C_p sur la première couche de cellules sur les murs

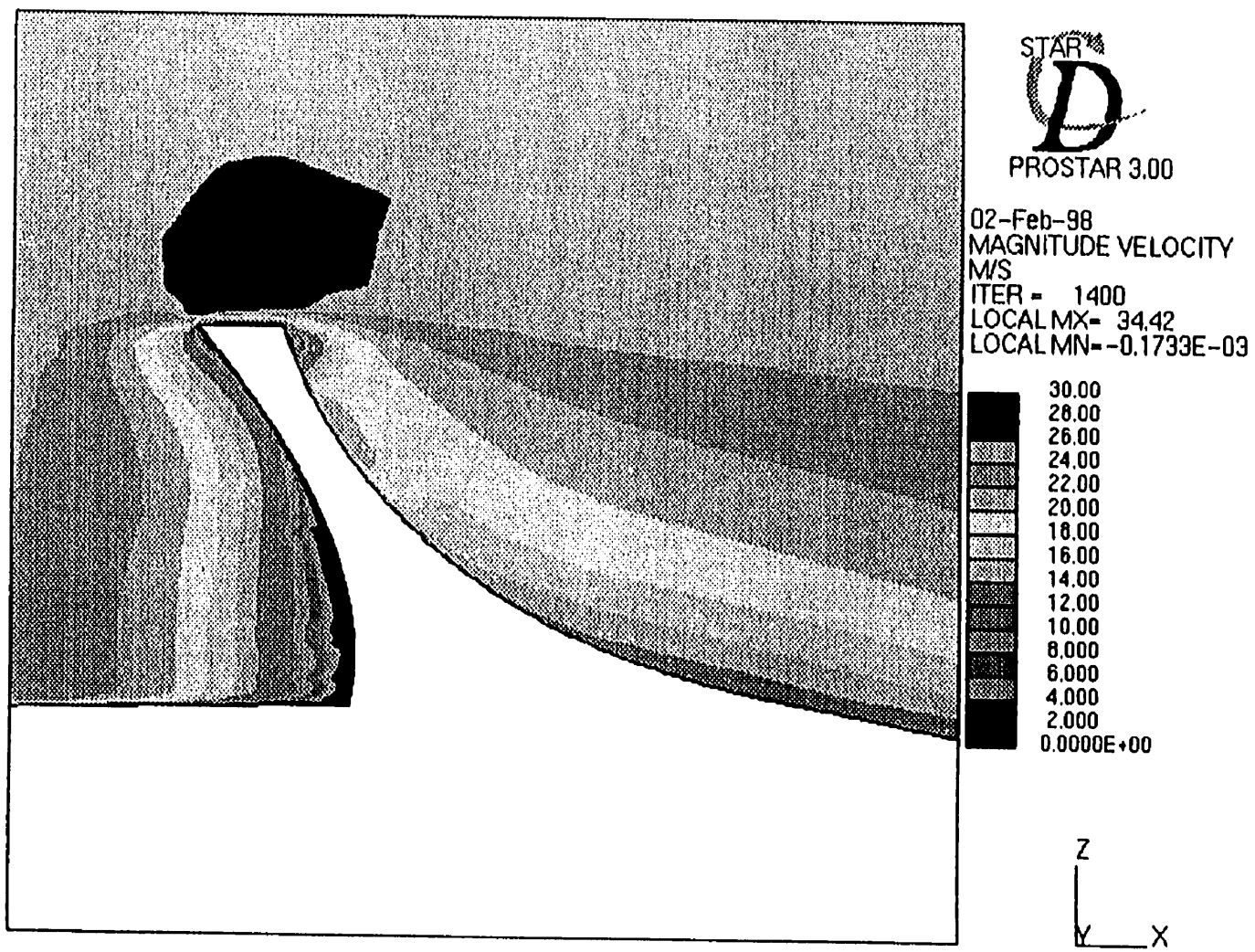


Figure 6.37: Calcul 9. Intensité de la vitesse dans le plan de symétrie de l'obstacle

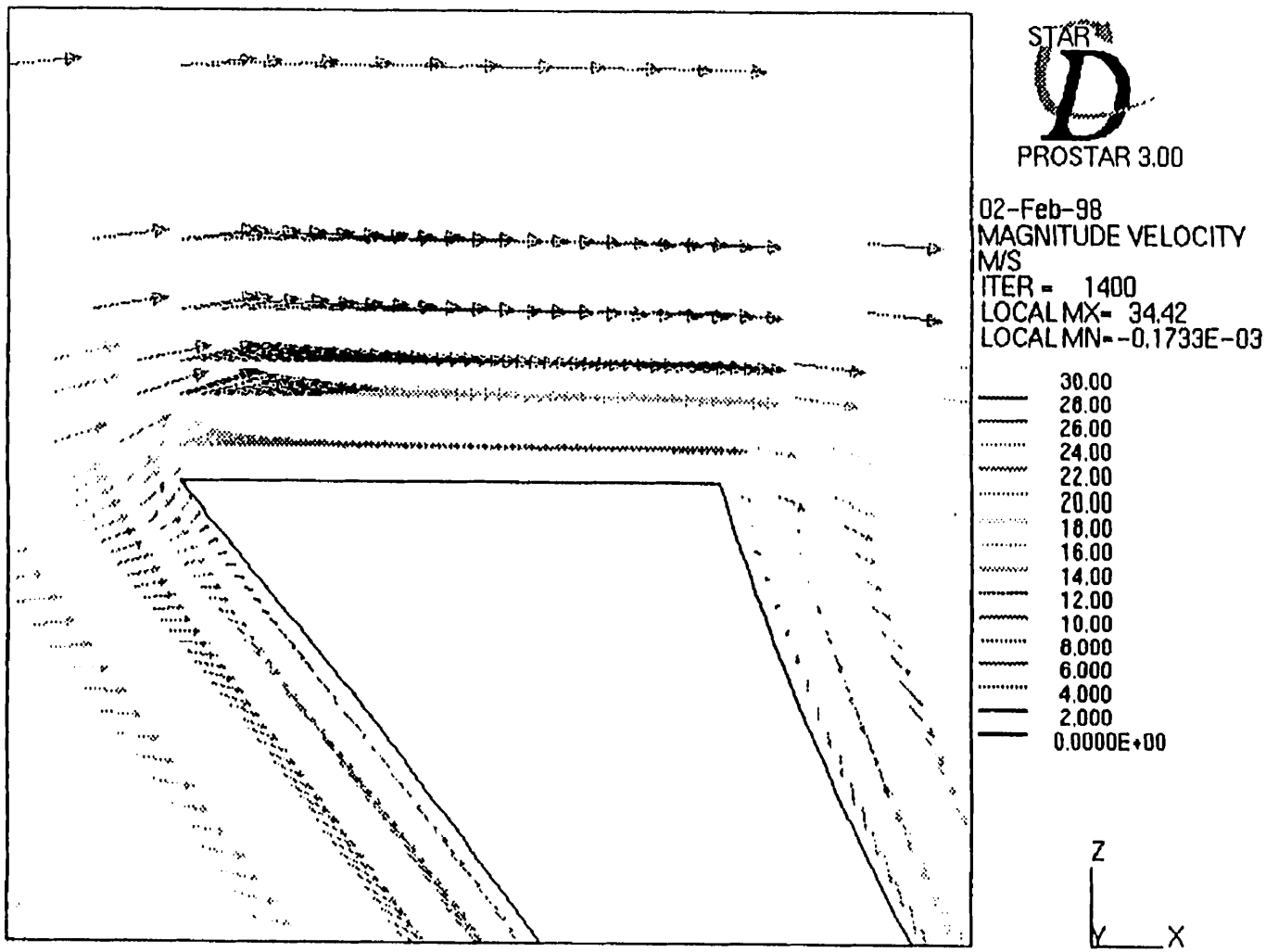


Figure 6.38: Vecteurs vitesse dans le plan de symétrie de l'obstacle

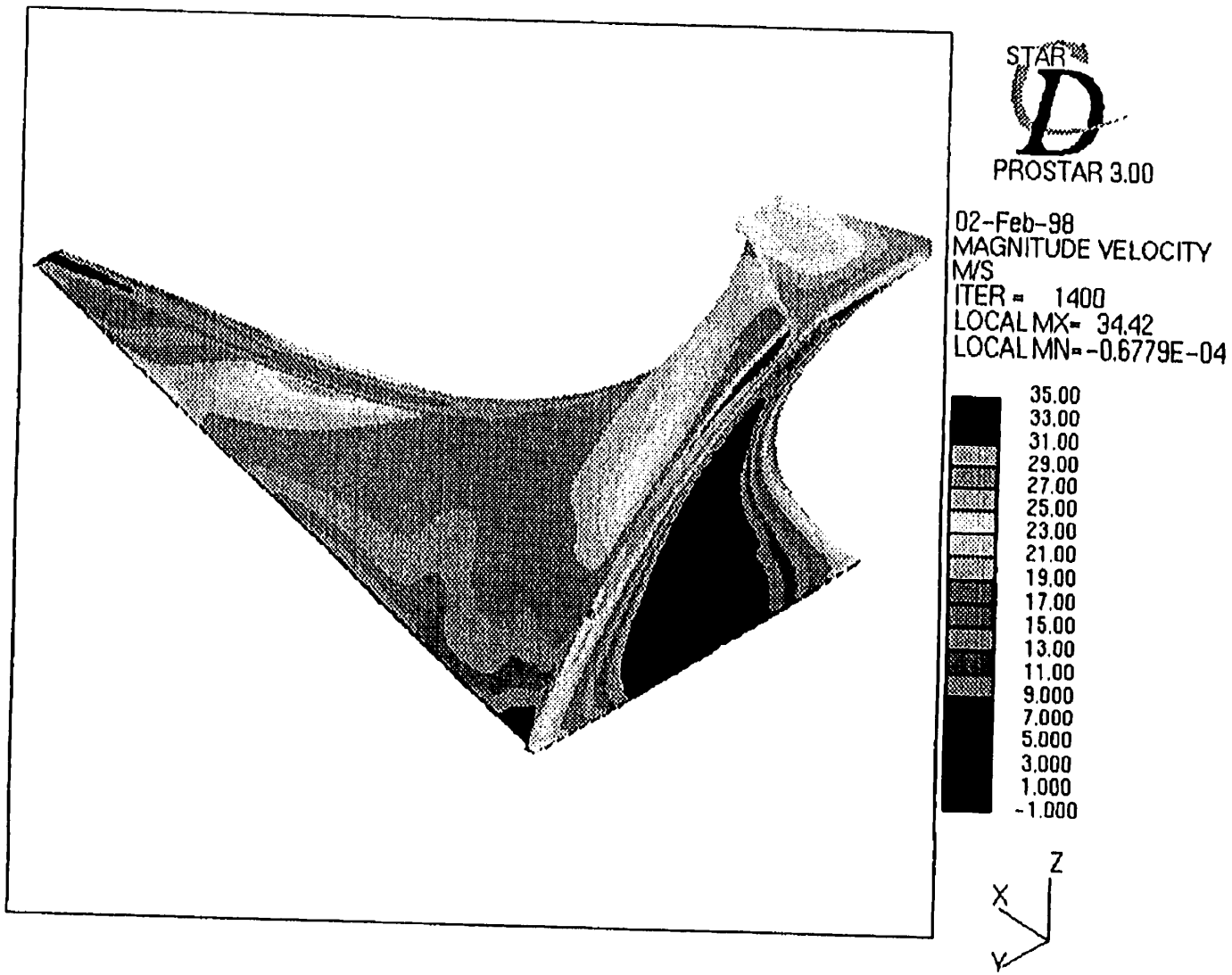


Figure 6.39: Intensité de la vitesse sur la première couche de cellules sur les murs

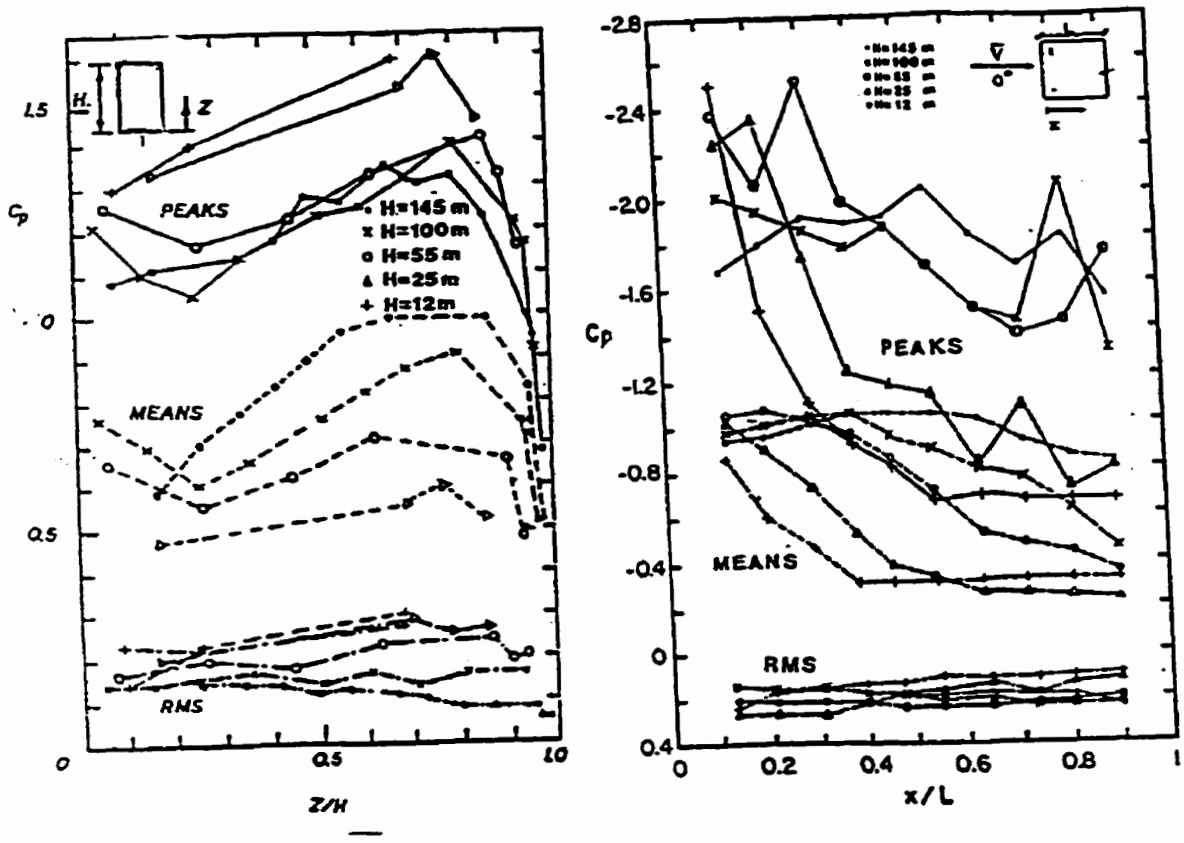


Figure 6.40: À gauche : coefficient de pression C_p sur la face frontale et à droite sur le toit en terme de valeur moyenne, maximum et écart-type Stathopoulos(1989)

Conclusion

L'objectif principal de cette étude consistait à étudier la faisabilité de la simulation de l'écoulement du vent autour d'un obstacle avec une forme complexe en utilisant un logiciel commercial. Pour ce faire, nous avons utilisé le logiciel STAR-CD. Cette étude est le premier pas pour pouvoir étudier de manière plus précise les contraintes dûes au vent sur cet édifice.

La réalisation de ce travail a été effectuée relativement avec succès selon le processus suivant. Premièrement, la validation de ce logiciel a été faite en comparant les résultats obtenus par le calcul avec l'expérience faite sur un cube : les résulats étaient encourageants.

Par la suite, nous avons fait les calculs sur le stade lui-même , et nous avons comparé avec le cas du cube. Une assez bonne consistance a été déduite, bien que le nombre de Reynolds et la forme de l'obstacle soient complétement différents. Finalement, nous avons comparé nos résultats avec l'étude de Stathopoulos et al. (1989) sur des batiments avec différentes hauteurs. Toutes ces comparaisons confirmaient assez bien nos calculs.

À l'issu de ce travail nous proposons les travaux suivants :

D'après la littérature, plusieurs chercheurs ont affirmé que la méthode classique $k-\varepsilon$ est insuffisante pour les prédictions relativement précises du problème. Ferziger , Delaunay et al. Ces chercheurs ont utilisé la méthode de L.E.S et ont trouvé que bien que la méthode L.E.S soit plus coûteuse, elle prédit beaucoup mieux le comportement de l'écoulement. Les études sur les lois des écoulements dans les zones visqueuses montrent que la méthode à deux couches est plus pertinente, mais demande un maillage encore plus fin. Donc, dans une phase avancée , on peut remplacer la loi de la paroi par la loi à deux couches.

Dans le cadre de cette étude, nous avons conclu que l'étude du problème est faisable, mais elle peut être améliorée. Un maillage plus régulier en utilisant des fonctions plus élaborées, pour le raffinement aidera plus pour réaliser une meilleure étude.

Dans la phase plus avancée, le toit du stade doit être considéré. Il sera même mieux d'inclure les autres édifices comme le Biodôme et l'Insectarium dans le calcul.

L'écoulement du vent doit être considéré dans toutes les directions et une enveloppe des résultats critiques doit être calculée. Un profil logarithmique du vent à l'entrée doit être considérée.

Dans une phase plus avancée, et surtout pour des structures élancées, avec des formes géométriques non régulières, une étude dynamique et non-linéaire des contraintes dûes à l'effet du vent est indispensable.

Bibliographie

BAETKE, F., WERNER, H. et WENGLE, H. (1990). Numerical simulation of turbulent flow over surface-mounted obstacles with sharp edges and corners. *Journal of wind Eng. and Industrial Aerodyn.*, *35*, 129–147.

BASKARAN, A. (1990). *Computer simulation of 3D turbulent wind effects on buildings.* Thèse de doctorat, Concordia University, Montreal, QC, Canada.

CASTRO, I. et ROBINS, A. (1977). The flow around a surface mounted cube in uniform and turbulent streams. *Journal of Fluid Mechanics*, *19*, 307–335.

CHOU, D. (1945). On velocity correlations and the solution of the equations of turbulent fluctuation. *Quart. J.Appl. Math.*

DEARDORFF, J. (1970). A numerical study of three-dimensional turbulent channel flow at large reynolds numbers. *J.Fluid Mech.*, *41*, 453–480.

DELAUNAY, D., LAKEHAL, D. et PIERRAT, D. (1995). Numerical approach for wind loads prediction on buildings and structures. *Journal of Wind Eng. and Industrial Aerodyn.*

FERZIGER, J. (1990). Approaches to turbulent flow computation : application to flow over obstacles. *Journal of Wind Eng. and Industrial Aerodyn.*, *35*, 1–19.

HAN, T. (1989). Computational analysis of three-dimensional turbulent flow around a bluff body in ground proximity. *AIAA*, *27(a)*, 1213–1219.

HANSON, T., SUMMER, D. et WILSON, C. (1986). A three-dimensional simulation of wind flow around buildings. *Int. J. for Num. Methods in Fluids.*

HARLOW, F. et NAKAYAMA, P. (1968). Transport of turbulence energy decay rate. Rapport technique LA-3854, Los Almas Science Lab., Univ. California.

HE, P., SALCUDEAN, M. et GARTSHORE, I. S. (1994). Multigrid calculations of laminar and turbulent flows in complex 3d geometries. J. J. Gatlieh et R. Ethier, éditeurs, *Proceedings CFD94. Second annual Conference of the CFD Society of Canada.* CFD Society of Canada, Toronto, Ontario, 345–352.

HUTCHINSON, P., KHALIL, E., WHITELAW, J. et WIGLEY, G. (1976). The calculation of furnace flow properties and their experimental verification. *Journal of Heat Transfert, 98*, 276–283.

JONES, W. et LAUNDER, B. (1972). The predictions of laminerization with a two-equation model of turbulence. *Journal of Heat and Mass transfert, 15*, 301–314.

KIM, J., MOIN, P. et MOSER, R. (1987). Turbulence statistics in fully develloped channel flow at low reynolds number. *J.Fluid.Mech., 177*, 1–1.

KOLMOGOROV, A. (1942). The equatins of turbulent motion in an incompressible fluid. *Izv. Acad. Sci. USSR, Phys., 6*, 56–58.

LAMBERG, R. (1973). *On the wakes behind bluff bodies in a turbulent boundary layer.* Thèse de doctorat, University of Western Ontario.

LAUNDER, B., MORSE, A., RODI, W. et SPALDIG, D. (1972). The prediction of free shear flows. a comparison of the performance of six turbulent flow. *Comp. Meth. in Appl. Mech. and Eng., 3*, 269–289.

LAUNDER, B. et SPALDING, D. (1974). The numerical computation of turbulent flow. *Comp. Meth. in Appl. Mech. and Eng., 3*, 269–289.

MARTINUZZI, R. (1992). *Experimentelle Untersuchung der Umstromung wamdegebundener, rechteckiger,prismaticher Hindernisse.* Thèse de doctorat, Der Teschnischeng Fakultat der Universitat Erlangen-Nurenberg.

MOIN, P. et KIM, J. (1982). Numerical investigation of turbulent channel flow. *Journal of Fluid Mech.*, *118*, 341–377.

MURAKAMI, S. AMD MOCHIDA, A. et HIBI, K. (1984). Numerical simulation of air flow around building by means of large eddy simulation (part1- part2). *Summaries of Technical Papers of Annual Meeting Architectural Institute of Japan.* 257–260.

MURAKAMI, S., HIBI, K. et MOCHIDA., A. (1985). Visualisation of computer-generated turbulent flowfield around cubic model. *Proc. Int. Symp. on Fluid Control and Measurement.*

MURAKARAMI, S. (1990). Computational wind enginerring. *Journal of Wind Eng. and Industrial Aerodyn.*, *36*, 517–538.

MURAKARAMI, S., HIBI, K. et MOCHIBA, A. (1990). Three-dimensional analysis of turbulent flowfield around street blocks by means of large eddy simulation (part-1). *Journal of Archi. Plam. Environ. Engrg. AIJ*, 1–10.

MURAKARAMI, S. et MOCHIBA, A. (1989). Three-dimensional numerical simulation of turbulent flow around buildings using the $k - \varepsilon$ turbulent model. *Building and Environment.*

NORRIS, L. et REYNOLDS, W. (1975). Turbulent channel flow with a moving wavy boundary. Rapport technique FM-10, Stanford Univ., Dept. of Mech. Eng., Stanford, CA, USA.

PATANKAR, S. (1980). *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow.* Hemisphere Publishing Corp., Washington.

PATERSON, D.A.AND APELT, C. (1990). Simulation of flow past a cube in a turbulent boundary layer. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, *35*, 149–176.

PATERSON, D. et APELT, C. (1986). Computation of wind flow over three dimensional buildings. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, *24*, 193–213.

PATERSON, D.A.AND HOLMES, J. (1992). Computation of wind pressures on low-rise structures. *Journal of wind Eng. and Industrial Aerodyn.*, *41*, 1629–1640.

PRANDTL, L. (1945). Über ein neues formelsystem für die ausgebildete turbulenz. *Nach. Akad. Wiss. Göttingen, Math. Phys. KL*, 6–19.

RICHARDS, P. J. et HOXEY, R. P. (1991). Computational and wind tunnel modelling of mean wind loads on the silsoe structures building. *Eighth International Conference on Wind Engineering*. BLWT, The University of Western Ontario, London, Canada.

RODI, W. (1980). Turbulence models and their application in hydraulics. a state of the art review. Rapport technique, IAHR, section of fundamentals of Div. II : Experimental and Mathematical Fliud Dynamics, The Netherlands.

ROLFES, H., VISSER, J. et BEKKER, A. (1993). Simulation of wind flow over arbitrary shaped buildings. *Numerical methods in Laminar and Turbulent flow.*

ROTTA, J. (1951). Statistische theorie nichthomogener turbulenz. *Z. Phys.*, *29*, 547–572.

SCHUMANN, U. (1975). Subgrig scale model for finite difference simulation of turbulent flows in plane channels and annuli. *J.Comp.Phys.*, *18*, 376–404.

SCRUTON, C. (1981). *An introduction to wind effects on structures.* Oxford University Press.

SELVAM, R. et PATERSON, D. (1991). Computation of pressure on and velocities near the texas tech building : using staggered on non-staggered grids. *Ninth ASCE Structures Congress.* Indianipolis, Indiana, USA.

STATHOPOULOS, T. et DUMITRESCU-BRULOTTE, M. (1989). Design recommendations for wind loading on buildings of intermediate height. *Canadian Journal of Civil Eng.*

STATHOPOULOS, T. et ZHOU, Y. (1997). Computation of wind pressures on l-shaped buildings. *ASCE Eng. Mech. Conference.*

TAYLOR, T. (1991). Wind pressures on a hemispherical dome. *Journal of Wind Eng. and Industrial Aerodyn.*

VASILIC-MELLING, D. (1977). *Three-dimensional Turbulent Flow Past Rectangular Bluff bodies.* Thèse de doctorat, University of London.

WOLFSTEIN, M. (1969). The velocity and temperature distribution in one-dimensional flow with turbulence augmentation and pressure gradient. *Int. J. of Heat and Mass Transfert, 12,* 301–318.

ZHOU, Y. et STATHOPOULOS, T. (1995). A new technique for the numerical simulation of wind flow around buildings. *Proceedings, Ninth International Conf. on Wind Eng.* New Delhi, India, vol. 2, 582–593.