

MODELISATION DE LA TURBULENCE ATMOSPHERIQUE EN VUE DE L'ETUDE DE L'ACTION DU VENT SUR LES STRUCTURES. CHOIX D'UN MODELE DE TURBULENCE.

Grégory TURBELIN

CEMIF - Université d'Evry Val d'Essonne
40 rue du Pelvoux, 91020 Evry cedex

RESUME Dans le cadre de l'étude de l'action du vent sur les structures, nous avons cherché à savoir si le modèle de turbulence RNG $k - \varepsilon$ est adapté à la modélisation de la turbulence atmosphérique. Pour cela, nous avons étudié numériquement trois cas tests significatifs et nous avons comparé nos résultats avec des résultats expérimentaux référencés dans la littérature. Cet article fait la synthèse de ces études et met clairement en évidence les apports du modèle RNG.

ABSTRACT To validate the use of the RNG $k - \varepsilon$ turbulence model in wind engineering, numerical predictions of tree generic flows are compared with experimental measurements. The main effects of the model are described and the practicability of the RNG $k - \varepsilon$ turbulence model in wind engineering is investigated.

MOTS-CLEFS : Modèles de turbulence, RNG $k - \varepsilon$, Modélisation du vent

INTRODUCTION

Dans la couche limite atmosphérique, sur une centaine de mètres d'altitude, les obstacles de toutes sortes qui forment la surface terrestre perturbent le champ de vitesse du vent et entraînent une forte agitation, désignée sous le vocable de turbulence. Notre travail, qui consiste à modéliser le vent dans l'environnement proche d'un ouvrage d'art, doit tenir compte de ce phénomène. Pour cela, nous avons choisi de nous placer dans le cadre général de l'étude numérique de l'action du vent sur les structures (en anglais, Computational Wind Engineering ou CWE), discipline à part entière, dont le but est de représenter numériquement le vent à l'aide de techniques issues de la dynamique des fluides numérique (Computational Fluid Dynamic ou CFD) [Murakami (1997)]. En effet, dans les basses couches de l'atmosphère, le vent est un écoulement d'air turbulent, incompressible, régi par les équation de Navier-Stokes. Pour résoudre ces équations, la méthode la plus utilisée consiste à moyenner les équations du mouvement et à modéliser les contraintes turbulentes à l'aide du modèle de fermeture $k - \varepsilon$. Ce modèle du premier ordre, simple et robuste, constitue le niveau minimum de modélisation physiquement acceptable. Bien adapté aux écoulements fortement cisailés qui se développent, par vent fort, sur les terrains homogènes, il montre ses limites en présence d'obstacles naturels ou artificiels, lorsque se développent des zones de recirculation ou de grosses structures tourbillonnaires organisées. L'utilisation d'un modèle statistique d'ordre supérieur ou la

simulation des grandes échelles est alors généralement recommandée. Mais ces deux méthodes, qui améliorent indiscutablement la description de l'écoulement, introduisent des coûts de calculs élevés, sans commune mesure avec ceux du modèle $k - \varepsilon$. C'est pourquoi le modèle RNG $k - \varepsilon$, qui a montré sa supériorité sur le modèle standard dans un grand nombre d'applications pratiques, est présenté dans la littérature comme étant une bonne alternative [Orszag et al. (1996)]. Après avoir présenté ce modèle, nous discuterons de son utilisation dans le cadre de la modélisation d'écoulements atmosphériques.

1 LE MODELE RNG $k - \varepsilon$

Les méthodes du groupe de renormalisation (RNG) ont été utilisées pour construire les équations d'un modèle de turbulence, de type $k - \varepsilon$, qui s'appuie sur l'hypothèse d'universalité des petites échelles de la turbulence [Yakhot et Orszag (1986)]. Ces méthodes, qui font appel à un formalisme mathématique complexe, consistent à éliminer de façon itérative, dans l'espace de Fourier, de fines bandes d'échelles et à représenter leurs effets au travers de coefficients effectifs renormalisés. Un des principaux avantages de la méthode est que, pour les grands nombres de Reynolds, les équations finales ont la même forme que celles du modèle $k - \varepsilon$ standard [Yakhot et Smith (1992)] :

- pour le champ moyen

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} [(\nu + \nu_t) (\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i})] \quad (1)$$

- pour l'énergie cinétique de la turbulence

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_i \frac{\partial k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} [(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k}) \frac{\partial k}{\partial x_i}] + P_k - \varepsilon \quad (2)$$

- Seule l'équation du taux de dissipation contient un terme source supplémentaire R_ε

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + U_i \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} [(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon}) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i}] + C_{\varepsilon_1} P_k \frac{\varepsilon}{k} - C_{\varepsilon_2} \frac{\varepsilon^2}{k} - R_\varepsilon \quad (3)$$

avec :

$$\nu_t = C_\nu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad R_\varepsilon = \frac{C_\nu \eta^3 (1 - \frac{\eta}{\eta_0}) \varepsilon^2}{1 + \beta \eta^3} \quad \eta = \sqrt{\frac{P_k}{\nu_t}} \frac{k}{\varepsilon}$$

Les constantes, calculées explicitement par le modèle, sont :

$$C_\nu = 0,0845 \quad C_{\varepsilon_1} = 1,42 \quad C_{\varepsilon_2} = 1,68 \quad \sigma_k = \sigma_\varepsilon = 0,7179 \quad \eta_0 = 4,377 \quad \beta = 0,012$$

On préfère généralement exprimer l'équation (3) sous la forme

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + U_i \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} [(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon}) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i}] + C_{\varepsilon_1}^* P_k \frac{\varepsilon}{k} - C_{\varepsilon_2} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad \text{où} \quad C_{\varepsilon_1}^* = C_{\varepsilon_1} - \frac{\eta(1 - \frac{\eta}{\eta_0})}{1 + \beta \eta^3} \quad (4)$$

Les principales améliorations apportées par ce modèle concernent la prise en compte de l'universalité des petites échelles, au travers de coefficients qui ne sont plus ajustés mais calculés explicitement par le modèle, et l'apparition d'un terme supplémentaire dans l'équation du taux de dissipation. Ces modifications le rendent moins diffusif que le modèle standard, et expliquent, en partie, ses bons résultats dans la modélisation d'écoulements complexes, instationnaires, recirculants ou détachés [Orszag et al. (1996)]. Alors que tout semble indiquer que ce modèle est adapté à la modélisation de la turbulence atmosphérique, les exemples de son utilisation dans ce domaine sont rares [Lee (1997)]. Nous avons donc vérifié son efficacité en incorporant les équations du modèle au code de calcul CASTEM 2000, développé par le CEA, et en modélisant trois écoulements tests, référencés dans la littérature.

2 LES CAS-TESTS

Auteurs	Nature du problème	Classification
[Franke et Rodi (1993)]	écoulement autour d'un cylindre de section carré	turbulent, instationnaire, avec détachement tourbillonnaire périodique
[Almeida et al. (1992)]	écoulement autour d'une colline	turbulent, stationnaire, avec obstacle topographique
[Bradley (1968)]	écoulement au dessus d'un changement de rugosité	turbulent, stationnaire, avec développement d'une couche limite interne

TAB. 1 – *Cas tests*

Les trois cas tests présentés dans le tableau 1 sont bidimensionnels. Le premier est un écoulement autour d'un obstacle isolé, le second un écoulement au dessus d'un accident topographique, le troisième, qui est le seul à avoir été réalisé à partir de mesures de vitesses du vent, est un écoulement au dessus d'une discontinuité de la nature du sol. Ce sont des écoulements proches de ceux rencontrés dans la couche limite atmosphérique, près du sol, où la turbulence est purement "mécanique", c'est à dire générée par la nature du terrain ou par la présence d'obstacles naturels ou artificiels. Pour les deux premiers cas, les calculs ont été effectués avec le modèle RNG et avec le modèle standard, associés près des parois solides à un modèle de fonction de paroi standard. Pour le troisième cas, afin de prendre en compte la rugosité du sol, nous avons utilisé un modèle de fonction de paroi basé sur la notion de longueur de rugosité. Dans les trois cas, le traitement numérique est identique : les équations sont discrétisées à l'aide d'une méthode d'éléments finis (EFM1) et résolues par un algorithme semi-implicite (implicite sur la pression et explicite sur les autres variables) [Magnaud (1996)].

3 RESULTATS

3.1 Ecoulement autour d'un cylindre de section carrée

L'écoulement que l'on obtient avec le modèle $k - \varepsilon$ standard est stationnaire et on observe, en aval de l'obstacle, deux zones de recirculation (figure 1). Avec le modèle RNG, après une période transitoire, on obtient un écoulement parfaitement périodique, conforme aux résultats expérimentaux. Avec ce modèle, les coefficients aérodynamiques instationnaires qui s'exercent sur l'obstacle sont correctement représentés (figure 2). Seule l'amplitude des fluctuations du coefficient de traînée est sousestimée. Avec le modèle standard le coefficient de traînée et la longueur des zones de recirculation "stationnaires" ne correspondent pas aux valeurs moyennes expérimentales.

3.2 Ecoulement autour d'une colline analytique

Avec le modèle RNG, comme dans l'expérience, on observe au niveau du sommet une zone de survitesse et une zone de recirculation en aval de l'obstacle. Avec le modèle standard, cette zone est totalement absorbée par une zone de forte turbulence. On dispose des profils de vitesse moyenne le long de plusieurs section droites. Seul le modèle RNG donne des profils proches des résultats expérimentaux dans la zone de recirculation (figures 3 et 4). Notons qu'avec ce modèle l'énergie est légèrement sousestimée, alors qu'elle est fortement surestimée par le modèle standard. Près de la paroi inférieure l'utilisation du modèle de fonction de paroi entraîne de légers écarts.

3.3 Ecoulement au dessus d'un changement de rugosité

Le modèle RNG, associé au modèle de fonction de paroi rugueuse, donne des profils de vitesse en bonne concordance avec les profils expérimentaux (figure 6). Ceci permet de suivre l'évolution de la couche limite interne qui se développe en aval de la discontinuité de rugosité. Avec ce modèle, le pic de la contrainte de cisaillement et son évolution vers une valeur pallier sont également correctement représentés (figure 5).

CONCLUSIONS

En présence d'obstacles, les modèles de turbulence basés sur la notion de viscosité turbulente ont tendance à générer des contraintes turbulentes trop importantes et à surestimer la production d'énergie turbulente. Ce comportement explique, en partie, les mauvais résultats du modèle standard lorsque se développe des fluctuations périodiques (premier cas-test) ou des zones de recirculation (deuxième cas-test). Le modèle RNG, moins diffusif, limite ces effets et donne de bien meilleurs résultats que le modèle standard, sans modifier la convergence ni augmenter le temps de calcul. Associé à un modèle de fonction de paroi rugueuse, il donne de bons résultats (troisième cas-test). Aux vues des résultats obtenus sur ces cas-tests significatifs, proches de configurations rencontrées dans la couche limite atmosphérique, nous pensons que ce modèle est parfaitement adapté à la modélisation de la turbulence atmosphérique dans l'environnement proche d'un ouvrage d'art. Pour compléter cette étude, nous envisageons d'étudier l'influence du schéma numérique sur les résultats. En effet, une étude récente [Lee (1997)] a montré que pour modéliser des écoulements instationnaires, le choix du schéma numérique est presque aussi important que le choix du modèle de turbulence.

Références

- Almeida G.P., Durao D.F.G., Heitor M.V. ; 1992, Wake flows behind two dimensional model hills, *Exp. Thermal and Fluid Science*, Vol 7, p. 87
- Bradley E.F. ; 1968, A micrometeorological study of velocity profiles and surface drag in the region modified by a change in surface roughness, *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, No 94
- Franke R., Rodi W. ; 1993, Calculation of vortex shedding past a square cylinder with various turbulence models, *Turbulent Shear Flows 8*, Springer-Verlat
- Lee S. ; 1997, Unsteady aerodynamic force prediction on a square cylinder using $k - \varepsilon$ turbulence models, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 67&68, pp. 79-90
- Magnaud J.P. ; 1996, *Discretisation des équations de Navier-Stokes par la méthode des éléments finis*, CEA-Saclay
- Murakami S. ; 1997, Overview of turbulence models applied in CWE-97, *Proceedings of the 2nd european & African Conference of wind Engineering*, Genova, Italy, June 22-26
- Orszag S.A., Starolesky I., Flannery W.S., Zhang Y. ; 1996, Introduction to renormalisation group modeling of turbulence, *Simulation and Modeling of Turbulent Flows*, Edited by B. Gatski, M. Yousuff Hussaini, J.L. Lumley, Oxford University Press
- Yakhot V., Orszag S.A. ; 1986, Renormalization group analysis of turbulence. I: Basic theory, *J. Sci. Comput.*, Vol 1, pp. 3-51
- Yakhot V., Smith L.M. ; 1992, The renormalization group, the ε -expansion and derivation of turbulence models, *J. Sci. Comput.*, Vol 7, pp. 35-61

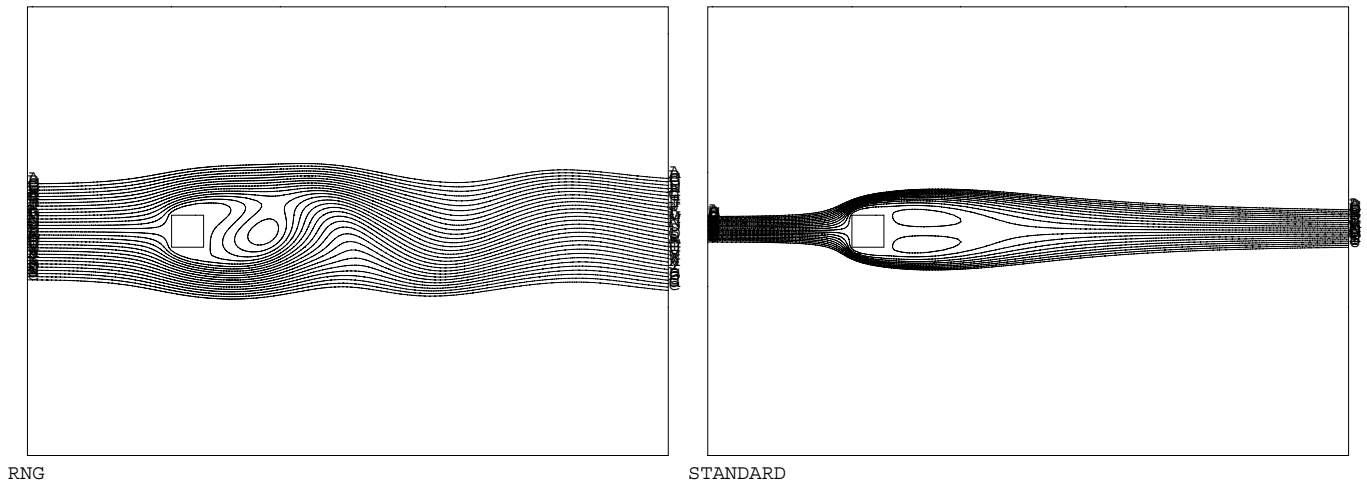


FIG. 1 – Cas No1, Lignes de courant : (a) modèle RNG, (b) modèle standard

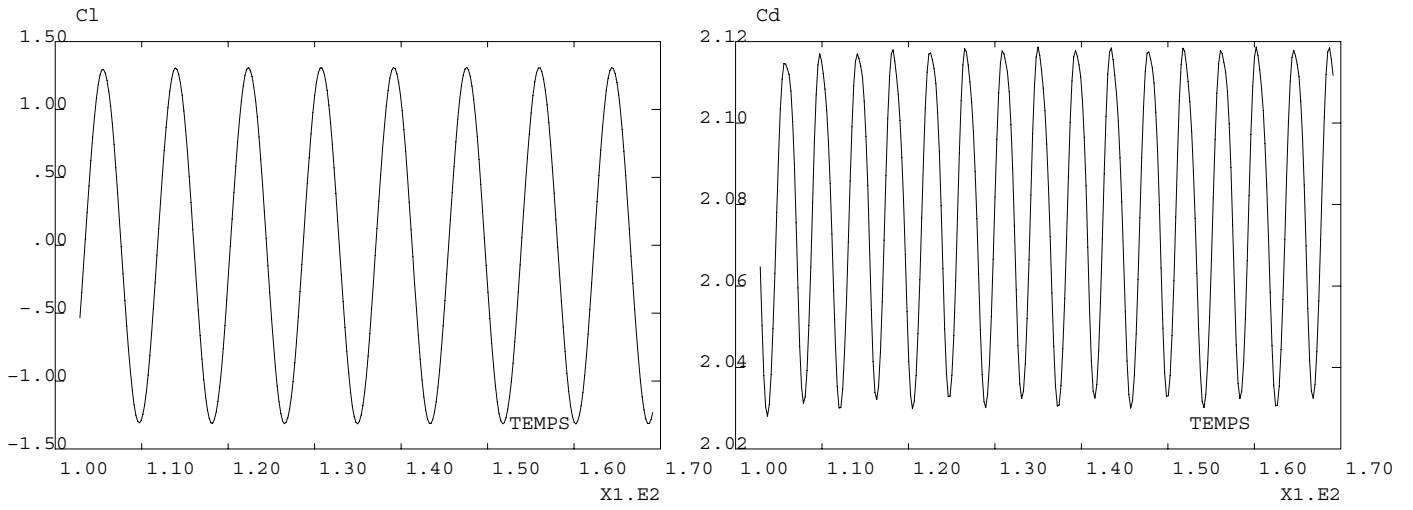


FIG. 2 – Cas No1, Modèle RNG: (a) coefficient de portance, (b) coefficient de trainée

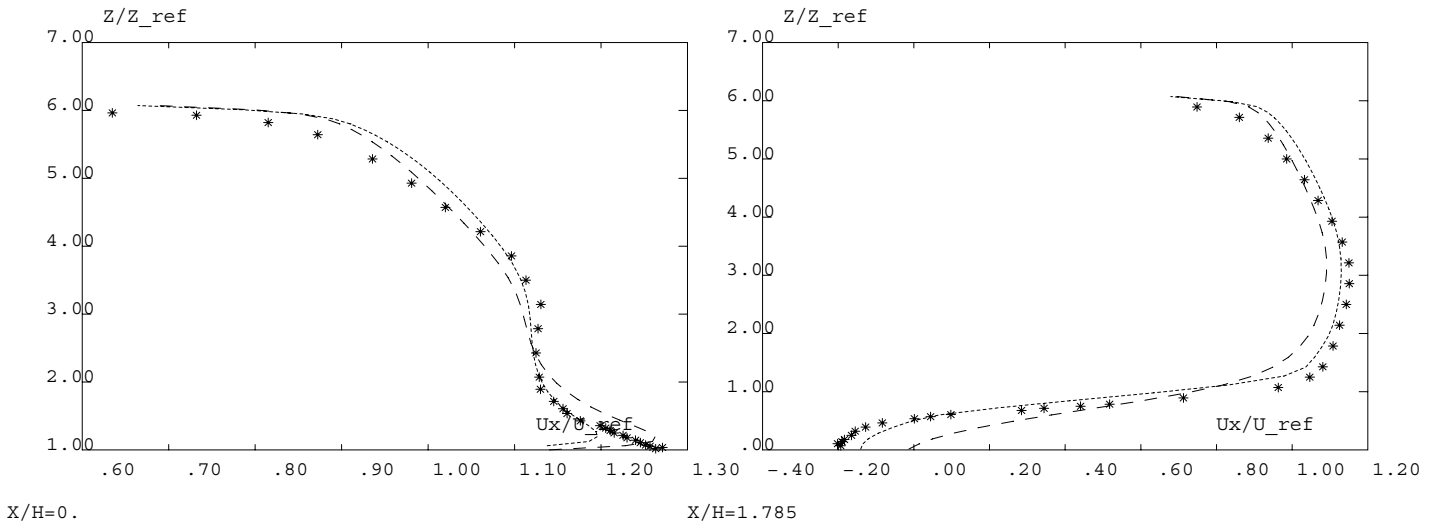


FIG. 3 – Cas No2, Voir figure 4

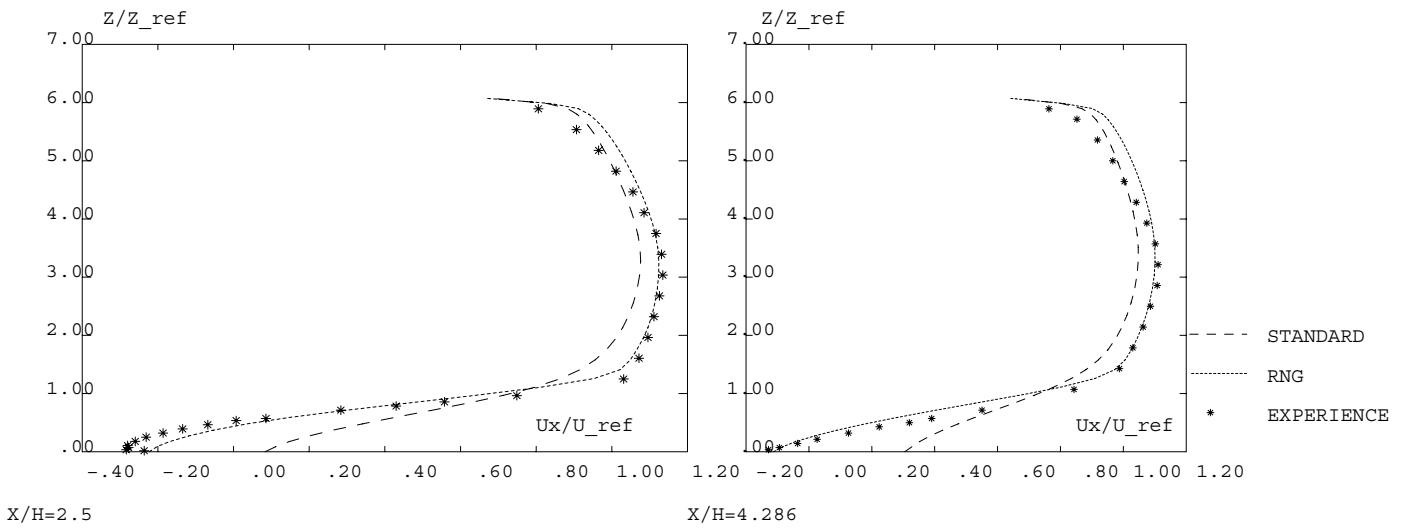


FIG. 4 – Cas No2, Profil de vitesse : comparaison RNG - Standard - Expérience

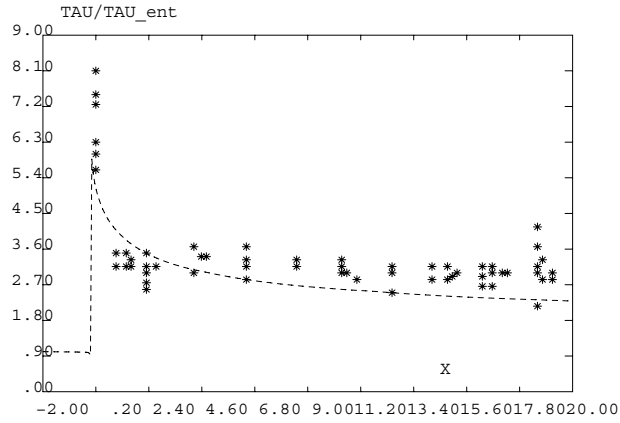


FIG. 5 – Cas No3, Contrainte de cisailment : comparaison RNG - expérience

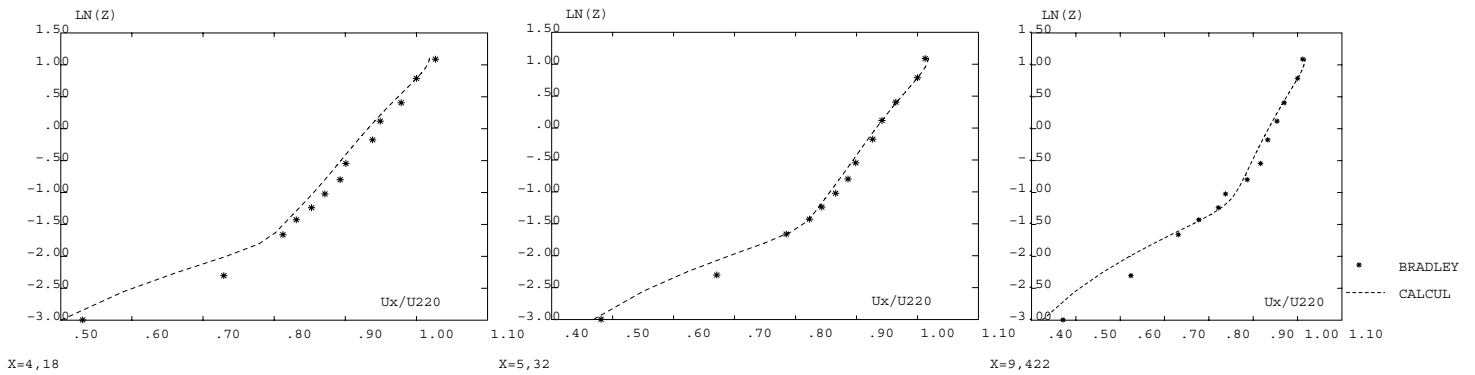


FIG. 6 – Cas No3, Profil de vitesse : comparaison RNG - expérience