

GDR Structure de la turbulence et mélange

Compte rendu du thème 3

Ecole Centrale de Nantes (10 Novembre 2005)

Animateur : Ganbo Deng

Intervenants : Ganbo Deng, Rémi Manceau

Compilé par Anne Cadiou

Cette session aborde quelques aspects de l'état de l'art en modélisation statistique de la turbulence en un point à travers deux exposés.

Modélisation de la turbulence - application en hydrodynamique navale

Ganbo Deng, Laboratoire de Mécanique des Fluides, Ecole Centrale de Nantes

Les écoulements autour de navires présentent les caractéristiques spécifiques associées à la géométrie allongée des carènes : l'écoulement transitionne rapidement à l'avant du navire, et devient particulièrement complexe à l'arrière du navire où se développent des couches limites tridimensionnelles, soumises à des gradients de pression adverses, dans une géométrie présentant de fortes courbures et conduisant au développement de tourbillons longitudinaux intenses. Ces écoulements évoluent à des nombres de Reynolds élevés (de l'ordre de 10^6), et la prise en compte de ces différents mécanismes dans les simulations numériques nécessite une modélisation fine de ce qui se passe dans l'écoulement jusqu'à la paroi.

Les simulations numériques autour de carènes de navire poursuit principalement deux objectifs pratiques : le calcul de la traînée et la connaissance de la topologie de l'écoulement dans le plan de travail de l'hélice. L'optimisation des formes de carènes repose donc sur un compromis permanent entre la réduction de la traînée et l'amélioration des conditions de propulsion.

A l'heure actuelle, les méthodes numériques qui permettent d'aborder ce type d'écoulement ont atteint un degré de maturité relativement universel, comme l'atteste le récent CFDWS Workshop de Tokyo (2005) où les simulations réalisées avec un même maillage, un même modèle, mais différents codes conduisent aux mêmes résultats. L'influence du modèle de turbulence est en revanche déterminante dans la qualité des résultats, ce qui permet de passer en revue les différentes classes de modèles utilisées dans la communauté.

Les modèles les plus fréquents sont les modèles algébriques de type Baldwin-Lomax, le modèle à une équation de Spalart-Allmaras, et la classe des modèles à deux équations de type $K - \varepsilon$, $K - \omega$, avec un regain d'intérêt pour les modèles basés sur d'autres échelles, comme $K - \Phi$ ou $K - KL$, ou le modèle $\bar{v}^2 - f$ de Durbin. La classe des modèles au second ordre de type $R_{ij} - \varepsilon$ s'étend des formulations les plus simples, aux fermetures sophistiquées fortement non-linéaires. Dans ces modèles, la diffusion par viscosité et les termes de production d'énergie cinétique turbulente sont exacts, ce qui de fait les rend théoriquement attractifs, mais l'ensemble des autres mécanismes (redistribution, diffusion et dissipation) doit être modélisé de façon cohérente, et associé avec une équation complémentaire pour représenter l'évolution des échelles caractéristiques de la turbulence. Les modèles au second ordre de

type $R_{ij} - \varepsilon$ ou $R_{ij} - \omega$ ne sont pas encore très largement exploités, ce qui rend délicat l'examen des capacités des différentes formulations à traiter les écoulements d'hydrodynamique navale. Les modèles algébriques non-linéaires, en proposant de s'affranchir de l'hypothèse de Boussinesq tout en s'appuyant sur le transport de deux échelles scalaires est un compromis a priori intéressant, et tout particulièrement les modèles de type EASM, qui sont des modèles à deux équations construits à partir des modèles au second ordre.

Le choix d'un modèle plutôt qu'un autre repose bien entendu très largement sur leur capacité à représenter correctement les différents phénomènes physiques qui régissent l'écoulement.

Le développement des couches limites 3D est caractérisé par le fait que le tenseur des taux de déformation du mouvement moyen n'est pas aligné avec les composantes du tenseur de Reynolds, ce qui met en défaut toutes les approches basées sur l'hypothèse de Boussinesq. Un exemple typique d'un tel écoulement est le développement d'un tourbillon en fer à cheval à la jonction d'un cylindre posé sur une plaque plane.

L'action d'un gradient de pression adverse se rencontre dans des couches limites bidimensionnelles et est donc un phénomène très largement répandu. Les résultats montrés par Bézard et al. à la conférence ETMM6 en 2005 montrent pourtant que peu de modèles capturent le bon profil de vitesse et le bon coefficient de frottement.

Pour juger de la capacité des modèles à représenter l'effet de courbures des parois solides, il faut distinguer le cas d'une paroi convexe de celui d'une paroi concave. Dans le premier cas, l'écoulement est stabilisé par la courbure et sa représentation ne pose généralement pas de problème aux modèles dans des applications d'hydrodynamique navale où elle ne s'accompagne pas de décollements brusques et de décrochages comme dans des applications d'aérodynamique externe. Le cas d'une paroi concave est plus complexe, l'écoulement étant déstabilisé avec éventuellement l'apparition de nouvelles structures (Taylor-Görtler). L'écoulement met également un temps plus long à réagir à la présence de la courbure concave, qui doit être traduit dans le modèle. Un exemple typique de ce type d'écoulement est celui d'une conduite coudée. Du fait que leurs termes de production sont exacts, les effets de courbure sont explicitement pris en compte par les modèles au second ordre alors qu'ils doivent être intégrés dans les modèles de type EASM par un terme de correction de courbure.

Une représentation correcte de la formation et du développement de tourbillons longitudinaux présente quelques caractéristiques communes avec la capacité des modèles à capturer des effets de rotation. A l'arrière des navires, dans le plan de l'hélice, la présence des tourbillons longitudinaux est visible sur la forme en crochet des contours de vitesse moyenne. Les modèles EASM linéaires ne voient pas cet écoulement secondaire, alors qu'avec une correction explicite pour prendre en compte des effets de rotation, ils fournissent une réponse bien meilleure. La solution qu'ils fournissent est très voisine de celle du modèle au second ordre présenté (SSG) qui restitue le bon comportement, sans modification explicite particulière, mais au prix d'un effort de calcul deux fois plus élevé.

En résumé, pour aborder des problèmes d'hydrodynamique navale, les différents phénomènes physiques qui régissent l'écoulement sont tous des effets complexes à prendre en compte dans les modèles, et il convient de les classer par ordre d'importance. L'action des gradients de pression adverse semble le moins crucial. Sa restitution est un problème partagé dans de nombreuses applications et d'une façon générale, l'effet des couches limites 3D est un problème difficile à qualifier qui n'est pas spécifique à l'hydrodynamique navale. La prise en compte des effets de courbure est importante, mais n'est pas déterminante, alors qu'une représentation correcte des effets de rotation semble être le point le plus crucial pour les modèles, car c'est un effet à la fois important et déterminant pour une bonne représentation de la topologie dans le plan de l'hélice et des efforts sur la carène.

G. Deng, Three-dimensional flow computation with Reynolds stress and algebraic stress models, ETMM6, Sardinia, Italy, 23-25 May 2005

Effet de la paroi sur la turbulence en modélisation statistique (RANS)

Rémi Manceau, Laboratoire d'Etudes Aérodynamiques, Poitiers

Cet exposé propose de faire un bilan sur la prise en compte de l'influence des parois par relaxation elliptique dans les modèles statistiques en un point. Ces modèles sont généralement développés et calibrés pour des écoulements turbulents à grand nombre de Reynolds et les fermetures obtenues sont adaptées pour prendre en compte le comportement particulier de la turbulence au voisinage de parois solides en introduisant des fonctions d'amortissement dépendant par exemple du nombre de Reynolds turbulent ou de la distance à la paroi. Une alternative à ces approches heuristiques consiste à calculer l'amortissement comme solution d'une équation elliptique.

L'objectif est d'intégrer dans les modèles statistiques les effets dus à la présence d'une paroi solide tout ne en retenant dans les fermetures que les termes développés dans l'approximation des grands nombres de Reynolds.

La présence d'une paroi solide modifie l'écoulement et le développement de la turbulence par trois actions principales. L'adhérence du fluide à la paroi rend le rôle de la viscosité prédominant dans la zone de proche paroi et conduit à un amortissement local de toutes les composantes turbulentes. En outre, la présence de la paroi induit un confinement de l'écoulement qui renforce les gradients de vitesse moyenne dans son voisinage proche et conduit par une action non locale à un blocage rendant la turbulence proche d'un état 2C en diminuant les tensions normales dans la direction orthogonale à la paroi et en renforçant les composantes normales dans le plan parallèle à la paroi. Enfin, la présence de la paroi génère un terme d'écho de la fluctuation de pression qui modifie elle aussi la redistribution d'énergie cinétique entre les composantes normales du tenseur de Reynolds par l'intermédiaire des corrélations pression-déformation.

Le développement du modèle elliptique s'appuie sur l'équation de Poisson pour la pression fluctuante pour prendre en compte la modification de ces corrélations et exploite les développements asymptotiques des différents termes intervenant dans le transport des corrélations doubles de fluctuation de vitesse au voisinage d'une paroi, dans le cadre d'un écoulement turbulent développé de canal plan, pour construire une fonction de corrélation non-locale, associée à une échelle de corrélation L , permettant d'écrire une équation de relaxation elliptique de type

$$f_{ij} - L^2 f_{ij,kk} = f_{ij}^h$$

où f_{ij} traduit l'action des corrélations pression-déformation et le terme source s'exprime en fonction des fermetures classiques loin des parois. En couplant ces équations aux équations d'évolution du tenseur de Reynolds, la zone de proche paroi est corrigée par l'intermédiaire de l'équation elliptique, et non explicitement comme dans les modèles de fermeture classiques. Le bon comportement asymptotique aux parois est assuré par les conditions aux limites associées à l'équation de relaxation elliptique. Elles sont prescrites en cherchant à exprimer dans une équation modèle les termes dominants à la paroi, afin de trouver une solution analytique simple. L'importance du choix des conditions aux limites est montrée par comparaison avec les simulations directes de Kim, Moin et Moser du canal plan.

La construction de l'équation elliptique n'est pas unique et dépend de la fonction de corrélation retenue, de l'échelle de corrélation et du couplage avec les mécanismes de redistribution et dissipation dans l'équation du tenseur de Reynolds.

En retenant une équation tensorielle pour le terme de relaxation elliptique, le modèle résultant est constitué d'un système couplé de 13 équations ($R_{ij} - f_{ij} - \varepsilon$) avec des conditions aux limites sur f_{ij} en $1/y^4$ à la paroi. Ces caractéristiques le rendent instable et peu adapté à des applications réalistes. Ce constat a conduit à proposer une formulation plus simple, basée sur une fonction de pondération elliptique, scalaire, dont les conditions aux limites sont de type Dirichlet. Cette stratégie modifie le couplage avec les tenseurs de corrélation pression-déformation et des taux de dissipation de l'équation des corrélations doubles de fluctuation de vitesse et reporte l'anisotropie pariétale de ces termes sur le

choix d'un modèle a priori, l'amortissement étant géré par l'équation de pondération elliptique. Les modèles de proche paroi retenus reprennent des hypothèses de fermeture qui s'inspirent des propositions classiques, dans lesquelles intervient la normale à la paroi. L'estimation de cette normale est un problème complexe à résoudre en vue d'applications en configuration complexe. L'originalité de la proposition consiste à construire une estimation de la normale à partir des gradients de α . Le modèle, associé aux modèles au second ordre classiques (SSG) a été validé dans des simulations de canal plan, avec ou sans rotation et des jets impactants.

Pour réduire encore le nombre d'équations intervenant dans le modèle, une formulation algébrique incorporant l'action de la pondération elliptique par l'intermédiaire d'un tenseur dépendant des normales construites à partir de α a également été proposé. Il permet de retrouver une forme étendue des modèles de type EASM classique et fournit un comportement satisfaisant de l'amortissement des contraintes normales du tenseur de Reynolds dans la direction normale à la paroi. En revanche, l'anisotropie du tenseur et l'estimation de la répartition de l'énergie entre les composantes normales dans le plan de la paroi n'est pas sensiblement améliorée. Une autre approche pour réduire les degrés de liberté des modèles elliptique a été proposée par Durbin avec le modèle $\overline{v^2} - f$, qui consiste à se servir de $\overline{v^2}$ comme d'une échelle caractéristique de la turbulence et l'introduire dans l'expression de la viscosité turbulente comme échelle caractéristique de vitesse, le temps pouvant être estimé par l'échelle classique K/ε ou encore sa pondération en fonction de l'échelle de Kolmogorov suivant $T = \max(K/\varepsilon, C_T(\nu/\varepsilon)^{1/4})$. Ce modèle a été appliqué à de nombreux écoulements complexes et est actuellement intégré dans des codes commerciaux.

R. Manceau, K. Hanjalić, Elliptic blending model: a new near-wall Reynolds-stress turbulence closure, Phys. of Fluids, vol. 14-2, 2002