

Étude numérique de couches limites sur paroi courbe : rôle de l'instabilité de Görtler et transition à la turbulence

Jérémie DAGAUT

Laboratoire : LEGI

Directeur de thèse : Christophe Brun

École doctorale : STEP

Début / Soutenance : 16/10/2017 – 16/12/2021

Formation : Polytech Orléans – Ingénieur, Mécanique Énergétique

Poste actuel : -



Résultats majeurs et illustrations

L'enjeu de cette thèse était de mieux comprendre et modéliser la dynamique des courants gravitaires sur pente, qui contrôlent la circulation de l'océan, de l'atmosphère et des zones côtières. Le rôle du mélange turbulent induit par les instabilités hydrodynamiques qui s'y développent est primordial. En présence de pentes courbes, on observe un mécanisme particulier de mélange lié au développement d'une instabilité centrifuge, l'instabilité de Görtler. Les conditions d'émergence de cette instabilité et son effet sur la dynamique globale de l'écoulement sont encore mal compris à ce jour, en particulier en condition de stratification thermique stable (inversion thermique hivernale). La thèse inclue des résultats sur une étude numérique LES d'une couche limite sur pente courbe pour mieux comprendre et prévoir le développement des instabilités de Görtler sous deux conditions, des nombres de Reynolds Re et Görtler G élevés ($Re=10,000$ et $G=70$ respectivement), une stratification du fluide ambiant (bicouche ou linéaire) et un terme source à la paroi (refroidissement en surface). L'ensemble a vocation à préciser les processus de mélange dans le développement de vents catabatiques sur pentes alpines, d'intérêt pour des applications de météorologie de montagne et de pollution atmosphérique en vallée, entre autres.

1. Persistance de structures tourbillonnaires longitudinales dans une couche limite turbulente sur paroi courbe.

Le travail de thèse a permis de montrer qu'un écoulement turbulent dont la transition se fait par le déclenchement naturel de l'instabilité de Görtler contient des structures cohérentes visible dans la topologie moyenne de l'écoulement. Ces structures ont un impact très important sur les propriétés turbulentes de l'écoulement.

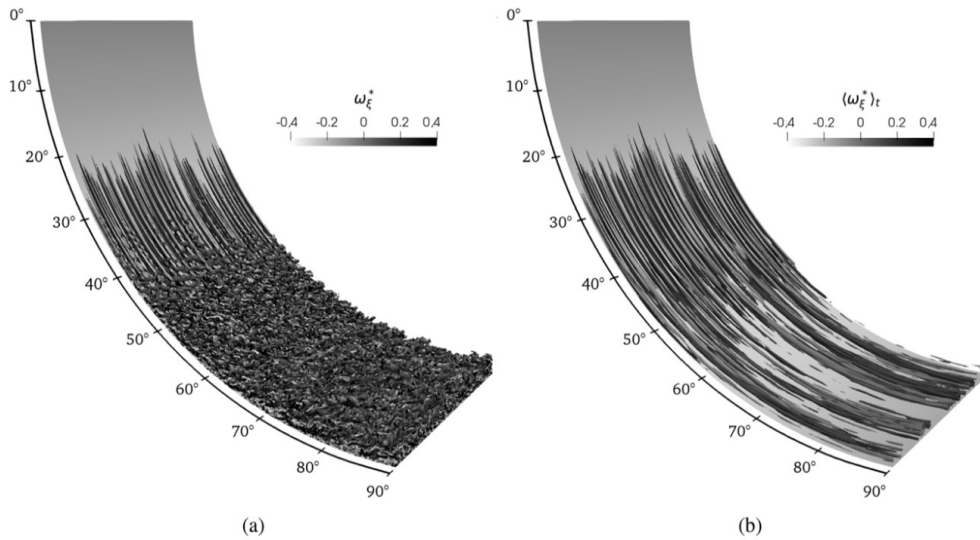


FIG. 5. Three-dimensional views of iso-contours of the normalized Q-criterion $Q^* = QR^2/U_\infty^2 = 1$, computed from the instantaneous flow velocity field (a) and the mean flow velocity field (b) colored by the instantaneous non-dimensional vorticity $\omega_\xi^* = \omega_\xi \delta_0 / U_\infty$ and the mean non-dimensional streamwise vorticity $\langle \omega_\xi^* \rangle_t = \langle \omega_\xi \rangle_t \delta_0 / U_\infty$. Streamwise streak structures (Görtler vortices) are visible in the non-linear region of the instability ($22^\circ < \phi < 42^\circ$) and persistent in the turbulent region (b).

2. Contributions relatives du cisaillement vertical, de la courbure et des tourbillons de Görtler à la production d'énergie cinétique turbulente.

Le travail de thèse a permis de montrer que la production d'énergie cinétique turbulente était fortement impactée par la présence de tourbillons longitudinaux dans la région très proche de la paroi et par les effets de courbure dans la région extérieure. Les tourbillons longitudinaux présents dans la région turbulente sont responsables d'une augmentation de 15% de la production d'énergie cinétique turbulente et les effets de courbure sont responsables d'une augmentation de 10% de la production d'énergie cinétique turbulente.

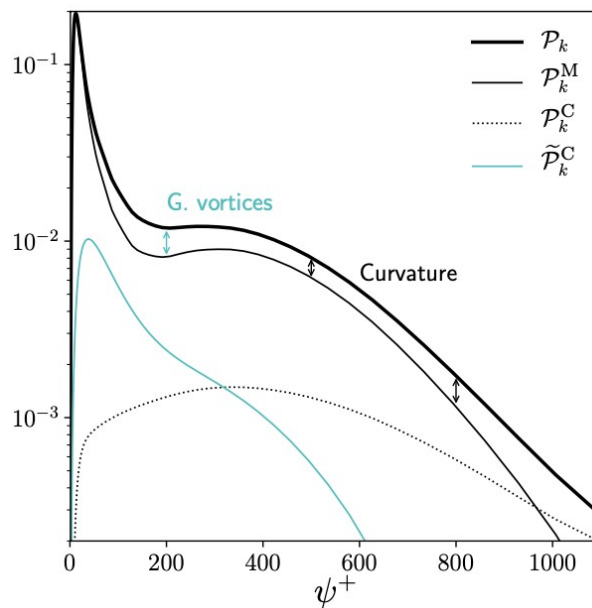


FIG. 2. Contributions relatives du cisaillement (ligne noire continue fine), des tourbillons de Görtler (ligne cyan) et des effets de courbure (ligne pointillée noire) obtenues par simulation des grandes échelles d'une couche limites turbulente sur paroi courbe.

3. Effets de stratification sur le développement de l'instabilité de Görtler les structures tridimensionnelles de l'écoulement.

Le travail de thèse a permis de montrer que le niveau de stratification avait une influence sur le développement de l'instabilité de Görtler. Or, pour des couches limites sur paroi courbe, cette instabilité centrifuge est responsable de la transition à la turbulence. *In fine*, la stratification change radicalement la topologie de l'écoulement aval selon le niveau de stratification.

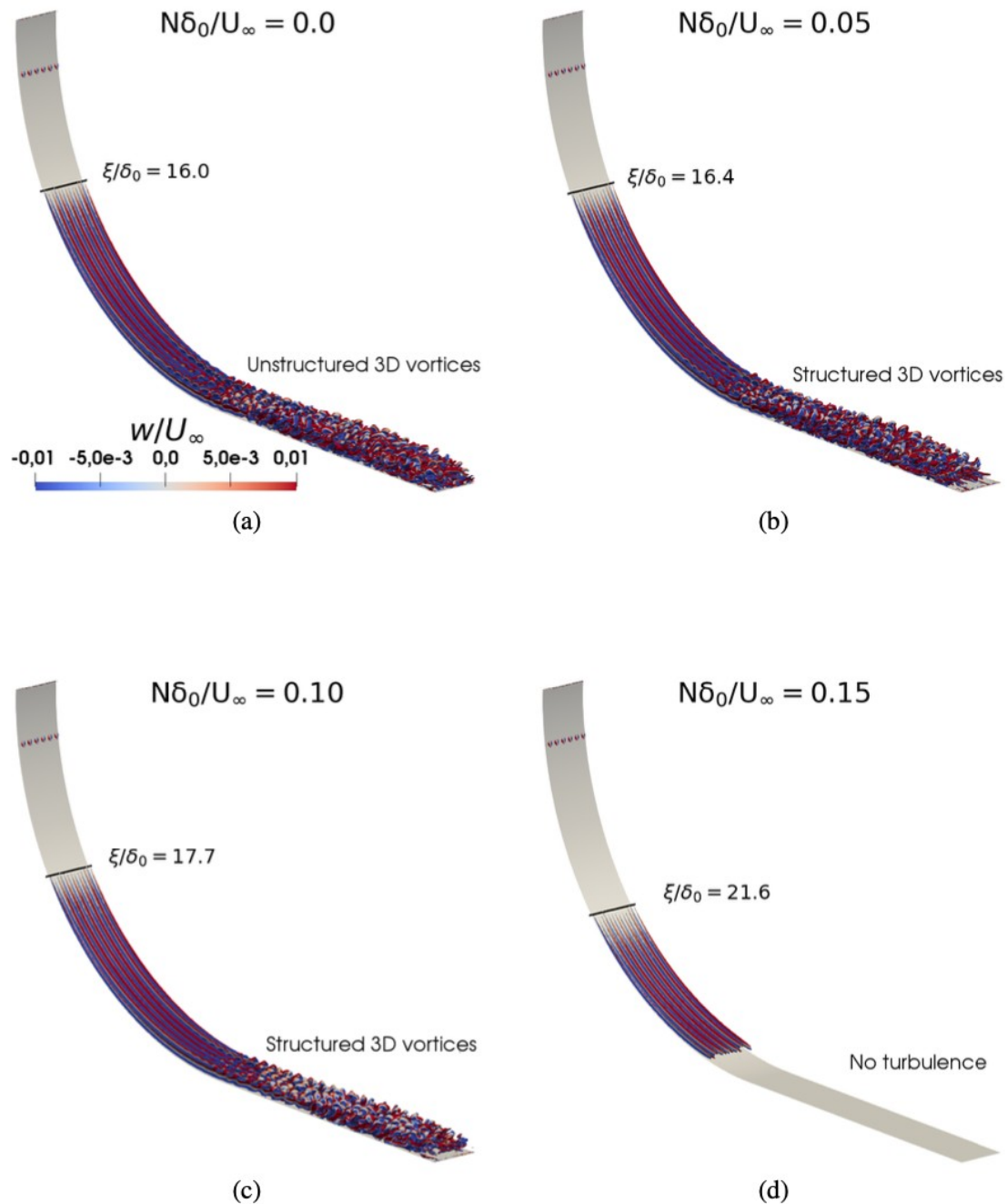


Figure 4.48. Visualisation 3D des structures tourbillonnaires développées dans l'écoulement par l'utilisation d'iso-contours du critère Q coloré par la vorticité longitudinale pour différentes conditions de stratification (a) $N\delta_0/U_\infty = 0.0$ (b) $N\delta_0/U_\infty = 0.05$ (c) $N\delta_0/U_\infty = 0.10$ (d) $N\delta_0/U_\infty = 0.15$.

Résumé de la thèse

Ces travaux s'inscrivent dans le contexte de la simulation numérique d'écoulements géophysiques évoluant en topographie complexe. Dans cette thèse, la topographie réelle est modélisée par une paroi courbe puis plane et la topologie de l'écoulement amont par une couche limite de Blasius. La courbure de la paroi induit la présence d'une instabilité hydrodynamique centrifuge appelée instabilité de Görtler. Cette instabilité est responsable d'une forte hétérogénéité transverse de l'écoulement et impacte la topologie moyenne de la couche limite aval, dans la région de transition à la turbulence mais également dans la région de turbulence développée. En utilisant les approches théorique (LSA) et numérique (SGE), on décrit son développement spatial et ses effets sur les propriétés physiques importantes des écoulements de couche limite. Il est notamment montré que la dynamique de l'écoulement aval est très dépendante de la longueur d'onde que l'on force. La difficulté de prédire la longueur d'onde naturelle de l'instabilité est également mise en avant par une étude paramétrique où l'on fait varier les nombres de Reynolds et de Görtler amont. À l'inverse, la croissance spatiale de l'instabilité est très prédictible et les simulations numériques permettent de voir que de forts nombres de Reynolds et de Görtler induisent une diminution du taux de croissance de l'instabilité (par effets non-linéaires) par rapport aux prédictions théoriques. Les effets de courbure sur l'écoulement turbulent aval sont également étudiés. Dans la région turbulente, la courbure induit une augmentation du frottement pariétal, une augmentation de la production d'énergie cinétique turbulente et une modification des lois de vitesse classiques. Des lois corrigées sont proposées en s'appuyant sur des travaux antérieurs mais également en proposant une nouvelle correction. Enfin, les effets de flottabilité induits par une stratification de la masse volumique, que l'on retrouve par ailleurs dans les configurations géophysiques réelles, sont analysés par voie numérique. L'intérêt des simulations effectuées est alors de mettre en évidence la compétition entre les forces en présence : la courbure et la stratification.

Publications à comité de lecture

J. Dagaut, M. E. Negretti, G. Balarac, and C. Brun, "Linear to turbulent Görtler instability transition", *Physics of Fluids* 33, 014102 (2021) <https://doi.org/10.1063/5.0033944>

Autres publications et présentations

J. Dagaut, G. Balarac, M. E. Negretti, C. Brun, "Transition to turbulence in Görtler flows. Large Eddy Simulations (LES) of a Blasius boundary layer over a curved wall", *17th European Turbulence Conference*, Sep 2019, Turin, Italy. [hal-02330445](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02330445)