

# Détection axiale de turbulences de sillage par LIDAR Doppler dans un volume fluide simulé et reconstruction d'images 2,5 D

Sébastien LUGAN, Benoît MACQ

Laboratoire de communication et télédétection – Université catholique de Louvain  
2, place du Levant, BE-1348 Louvain-la-Neuve, Belgique  
{lugan,macq}@tele.ucl.ac.be

**Résumé** – Les turbulences de sillage, causées par le déplacement dans l'atmosphère des ailes d'un avion, sont potentiellement extrêmement dangereuses pour un avion suivant l'avion générateur. Celles-ci peuvent être détectées par LIDAR Doppler ; toutefois, l'utilisation (par exemple dans le cas d'un capteur embarqué) d'une configuration d'analyse coaxiale aux vortex rend cette détection plus délicate. Cet article présente une méthode de génération d'images 2,5 D par triangulation de Delaunay à partir d'une simulation simplifiée de tirs LIDAR Doppler balayant suivant un motif sinusoïdal bruité des turbulences de sillage simulées. Nous validons ainsi la viabilité d'un balayage axial des turbulences de sillage et par suite la faisabilité d'un dispositif de détection et d'avertissement embarqué dans un avion.

**Abstract** – Wake turbulence, caused by the movement in the atmosphere of an aircraft's wings, is potentially extremely dangerous for an aircraft following the wake-vortex generator aircraft. This turbulence could be detected using a Doppler LIDAR sensor; however, the use (for instance in the case of an aircraft embedded sensor) of a coaxial scanning configuration makes this detection process harder. This article presents a new Delaunay-based 2.5 D images generation method from a simplified Doppler LIDAR shot simulation following a noisy sinusoidal scanning pattern of simulated wake turbulences. We thus validate the viability of an axial scanning of the wake turbulences and hence the feasibility of an aircraft embedded detection and warning system.

## 1 Introduction

Un profil d'aile d'avion en déplacement dans l'atmosphère génère une surpression sous son intrados et une dépression sur son extrados. Cette différence de pression, à l'origine de la portance (et de la traînée) de l'aile, génère également des turbulences de sillage (*wake turbulence*). Celles-ci regroupent d'une part les tourbillons de fuite, issus de la différence de direction entre les flux d'air circulant sous l'intrados et sur l'extrados de l'aile, et d'autre part les tourbillons marginaux (*wake vortices*), issus du repliement en bout d'aile du tourbillon de Prandtl, causé par le déplacement dissymétrique de l'air entre zone de surpression et zone de dépression. Ces tourbillons contra-rotatifs (sens direct derrière l'aile droite et indirect derrière l'aile gauche) peuvent être extrêmement puissants. Leur force est proportionnelle à la masse de l'avion et inversement proportionnelle à sa vitesse. Ces turbulences, particulièrement dangereuses[3] au moment du décollage et de l'atterrissage en raison du rapprochement entre les avions, de la coïncidence de leurs trajectoires, de leur faible vitesse et de leur faible altitude, peuvent entraîner pour un aéronef pris en leur cœur un taux de rotation jusqu'à 80°/s et un taux de descente de plus de 1500 pieds par minute (soit 7,6 m/s). De plus, si ces turbulences peuvent disparaître de quelques secondes à plusieurs minutes après le passage de l'avion générateur, il est arrivé de les détecter 20 minutes après. Actuellement, un temps de séparation arbitraire de quelques minutes est appliqué en fonction du type de l'avion générateur

et de celui de l'avion suiveur (« *heavy* », « *medium* », « *light* »).

L'objet de la détection des turbulences de sillage par LIDAR (*Light Detection And Ranging*) Doppler consiste à permettre aussi bien aux autorités aéroportuaires qu'aux pilotes de déterminer la présence de ces turbulences (voire le niveau de danger). Son principe repose sur l'évaluation par effet Doppler de la vitesse des particules en suspension de l'atmosphère à l'aide d'un LASER infrarouge (2,0  $\mu\text{m}$  dans le cas d'un LASER à état solide ou 1,55  $\mu\text{m}$  dans le cas d'un LASER fibré). Deux configurations principales de capteur LIDAR Doppler sont possibles pour une telle détection :

- détection transverse, autrement dit selon un axe perpendiculaire à la trajectoire de l'avion ;
- détection axiale, c'est-à-dire selon l'axe de la trajectoire de l'avion.

Le premier cas est typiquement utilisé dans le cas d'une détection sur piste (dispositif au sol). Il s'agit de la configuration la plus facile à mettre en œuvre, les particules suivant une trajectoire essentiellement normale à la trajectoire de l'avion dans les turbulences de sillage. En revanche, elle ne permet qu'une mesure en une section de la trajectoire présumée de celles-ci. La détection axiale (dispositif embarqué), objet de la présente communication, permet quant à elle une détection des vortex quelles que soient leurs positions dans l'angle de vue ainsi que la détermination de leurs caractéristiques géométriques principales (orientation, longueur, voire trajectoire). En revanche, une telle détection est plus complexe à mettre en œuvre et doit

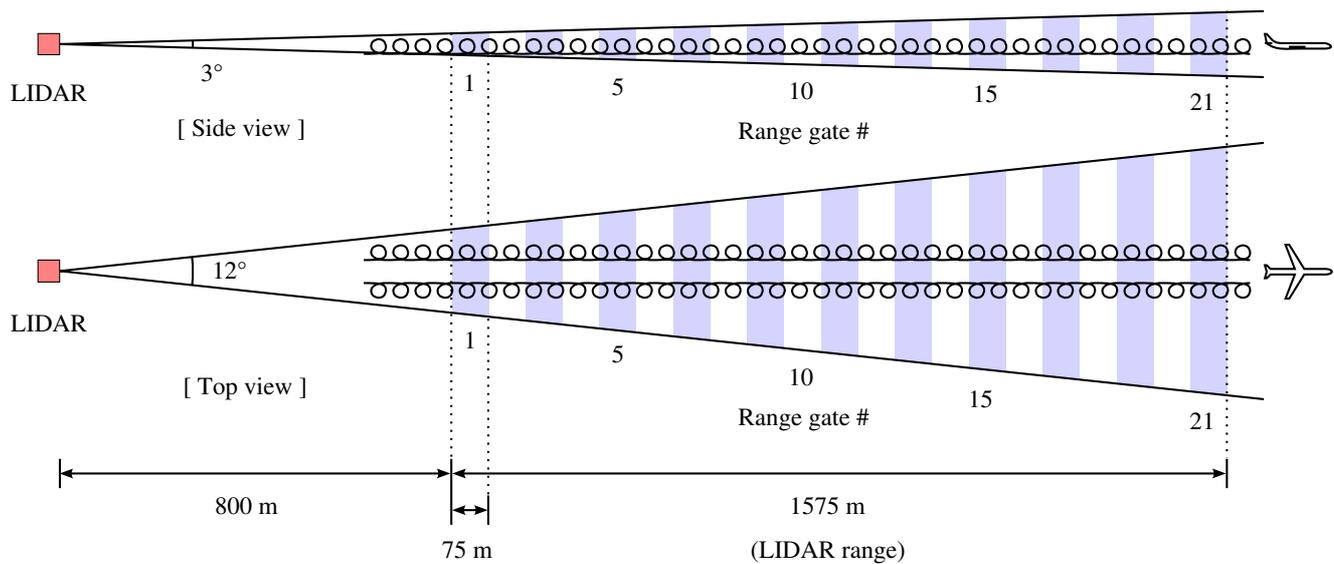


FIG. 1 – Configuration de la méthode de balayage étudiée ; les cercles indiquent la position des turbulences de sillage.

faire appel plus à une détection des turbulences qu'à une simple mesure de vitesse. À cette fin, le spectre issu du signal de retour LIDAR doit être analysé afin d'en extraire les informations caractérisant les turbulences de sillage.

## 2 Simplification du processus de simulation de tirs LIDAR

Différentes campagnes d'essais menées au cours de deux projets financés par l'Union européenne, M-FLAME (*Multifunction Future Laser Atmospheric Measurement Equipment*)[2] et I-WAKE (*Instrumentation Systems for On-board Wake Vortex and Other Hazards*), ont permis la collecte de signaux de retour LIDAR (configuration de détection axiale, le prototype étant destiné à être embarqué) dans diverses situations et pour différents types d'avions. Cependant, ces données ne permettent pas d'aisément isoler les phénomènes spécifiquement causés par les turbulences de sillage. Il était donc indispensable de procéder à des simulations permettant de mieux étudier ces phénomènes. L'unité de thermodynamique et turbomachines de l'Université catholique de Louvain a réalisé plusieurs simulations à haute résolution (2,1 voxels/m<sup>3</sup> pour un volume de simulation cubique de 8 000 000 m<sup>3</sup>) de paires de vortex algébriques de Hallock-Burnham[1], correspondant aux vortex générés par un avion de type A340, considérés à différents instants (20, 60 et 120 secondes après leur création) et au sein d'une turbulence environnante moyenne. Nous avons alors simulé plusieurs « tirs » LIDAR au sein de ces volumes simulés, en suivant un motif de balayage identique à celui utilisé dans les projets M-FLAME et I-WAKE. Il est rapidement apparu, après confrontations entre les résultats issus de ces simulations et les résultats issus des campagnes au sol et en vol de ces deux projets, que l'approximation directe du spectre issu du signal

de retour temporel LIDAR selon chaque ligne de visée par un histogramme des vitesses radiales obtenues par propagation d'une impulsion gaussienne de 400 ns (ce qui correspond aux caractéristiques des impulsions LASER utilisées dans M-FLAME et I-WAKE) le long de la ligne de visée et ré-échantillonnage est pertinente et suffisante pour l'étude des principales caractéristiques de ces spectres (dans le cas des mesures expérimentales) ou histogrammes de vitesses (dans le cas des simulations fluides). Nous nous sommes donc limités à considérer dans un premier temps ces seules distributions de vitesses et non les phénomènes optiques et de propagation atmosphérique afin de nous concentrer sur la caractérisation directe des turbulences de sillage dans le cas hypothétique d'une mesure réalisée avec un senseur LIDAR idéal.

## 3 Reconstruction d'images 2,5 D

La configuration du senseur LIDAR utilisée pour les projets M-FLAME et I-WAKE est du type axial. Un certain volume ( $\theta = \pm 6^\circ$  horizontalement,  $\phi = \pm 1,5^\circ$  verticalement) est balayé par un mouvement sinusoïdal (utilisation de prismes contra-rotatifs dans le cas M-FLAME et de miroirs dans le cas I-WAKE) du faisceau LASER, émis à raison de 2500 impulsions par balayage (d'une durée de l'ordre de 5 secondes). Pour chaque impulsion (correspondant donc à une ligne de visée différente), le signal temporel issu du mélange hétérodyne sur le photodétecteur est enregistré (à une cadence de 128 à 500 Méch/s). Compte tenu de la propagation du faisceau LASER dans l'atmosphère, à chaque échantillon correspond une certaine distance le long de cette ligne de visée. De ce fait, il est possible de restituer une information de profondeur en plus des deux angles  $\theta$  et  $\phi$ . Dans le cadre des projets I-WAKE et M-FLAME, il a été choisi de diviser le volume d'analyse, compris entre 800 et 2375 m, en 21 *range gates* d'approximativement 75 m. L'analyse spectrale du

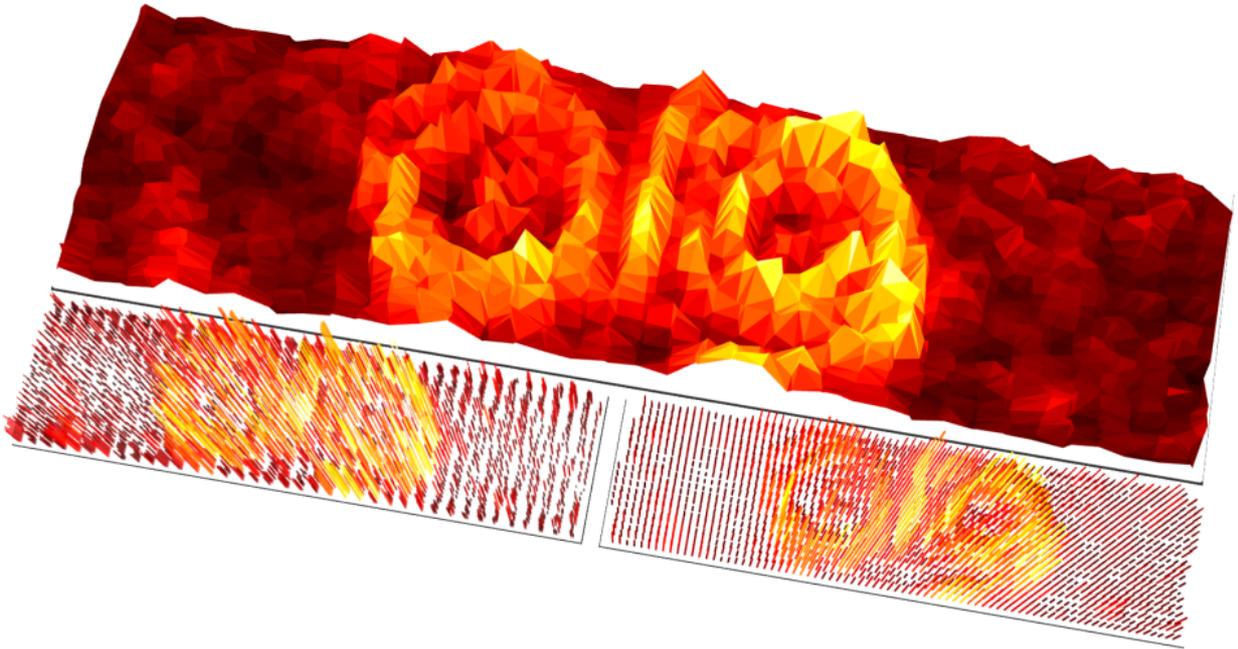


FIG. 2 – Remaillage par triangulation de Delaunay : en bas à gauche, dispersion des vitesses suivant chaque ligne de visée du balayage sinusoïdal bruité ; en haut, triangulation de Delaunay ; en bas à droite, interpolation sur une grille cartésienne

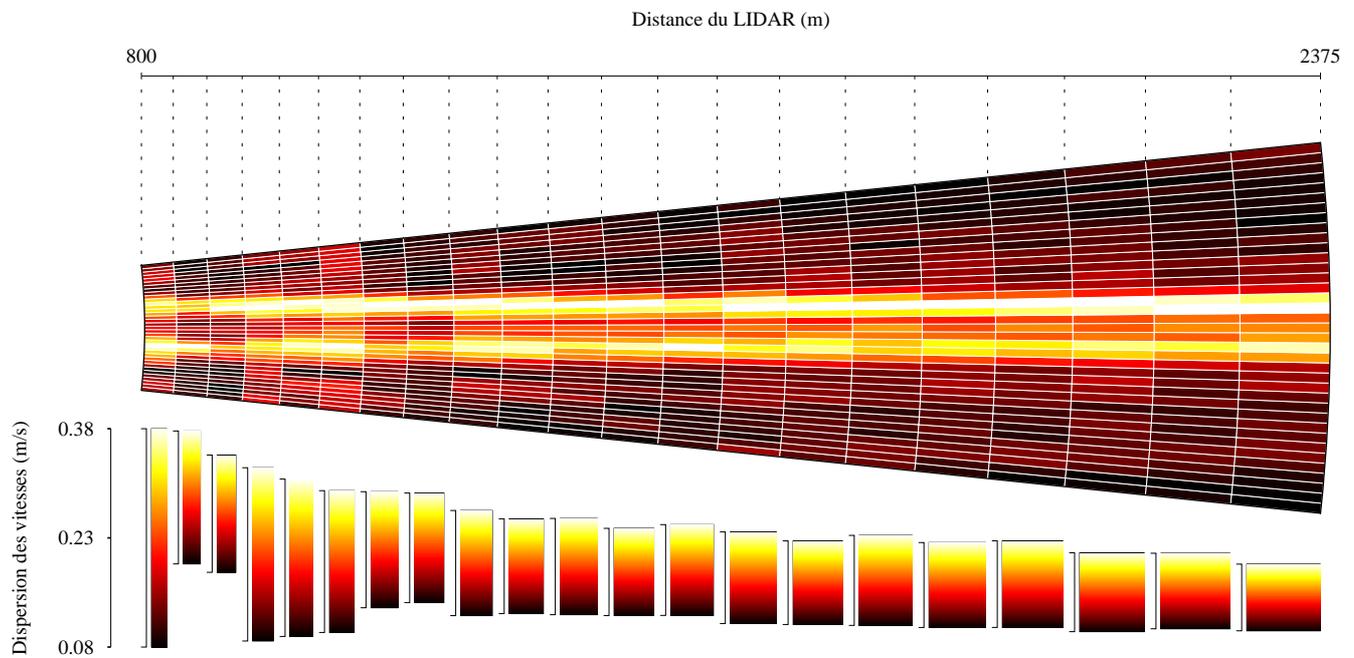


FIG. 3 – Vue de dessus : division du volume analysé en 21 *range gates* de longueur suivant une suite géométrique

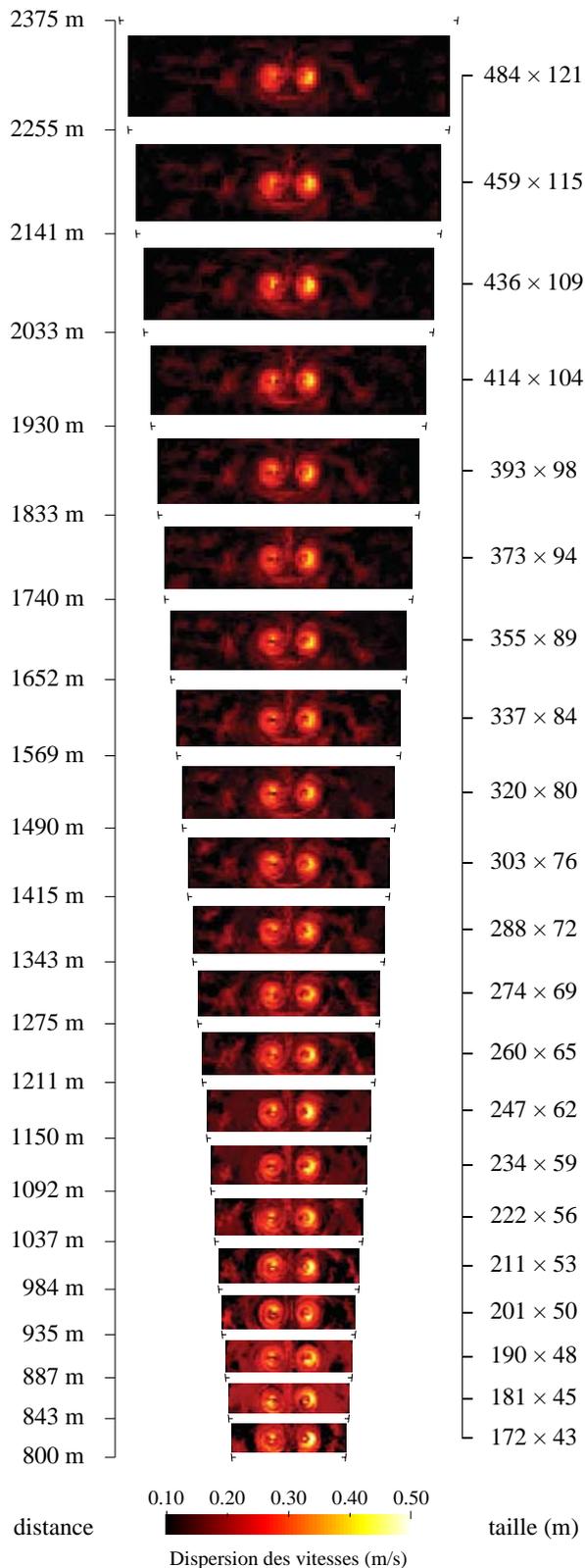


FIG. 4 – Vue de face : images correspondant aux 21 *range gates* précédentes (fig. 3) reconstruites selon la méthode présentée

signal de retour est donc typiquement effectuée soit par blocs séparés chacun du nombre d'échantillons correspondant à la longueur de la *range gate* considérée, soit selon une fenêtre glissante. Les différentes caractéristiques spectrales (à commencer par ses moments d'ordre 1 et 2) en sont extraites. Dans le cadre de nos simulations simplifiées de tirs, nous considérerons la valeur moyenne et la variance des distributions de vitesses selon chacune des lignes de visée. Les mouvements des miroirs, commandés par des moteurs pas à pas et soumis aux vibrations de l'avion dans le cadre du projet I-WAKE, génèrent un motif sinusoïdal bruité, non déterministe, mesuré en temps réel par des capteurs de position couplés aux miroirs. Nous avons donc choisi d'effectuer une triangulation de Delaunay sur les points de position correspondant à chacune des impulsions LASER (valeurs  $\theta$  et  $\phi$  des déviations horizontale et verticale), leur hauteur étant donnée par la caractéristique considérée. Une interpolation (linéaire ou cubique) est ensuite réalisée selon un maillage rectangulaire afin de reproduire une image 2D par *range gate*.

## 4 Conclusion

Nous avons procédé à des simulations de tirs LIDAR de type axial sinusoïdal bruité dans un volume fluide simulé de turbulences de sillage, et procédé à l'analyse statistique des distributions de vitesses radiales pour chaque ligne de visée, approximant une analyse spectrale de signaux temporels. Nous avons ensuite effectué une triangulation sur les données résultantes puis réalisé une interpolation suivant une grille cartésienne. Les résultats obtenus montrent la faisabilité d'une détection coaxiale des turbulences de sillage, de leur visualisation et de la visualisation de leur trajectoire.

## 5 Remerciements

Ce travail a été financé conjointement par la Commission Européenne (projet FP6 Fidelio) et par la DGTRE - Région Wallonne (projet LASEF).

## Références

- [1] D. Burnham and J. N. Hallock. Chicago monoacoustic vortex sensing system. Vol. IV. Wake vortex decay. Technical report, National Technical Information Service, Springfield, VA, July 1982.
- [2] M. Keane, D. Buckton, M. Redfern, Christoph Bollig, Carsten Wedekind, and Friedrich Kopp. Axial detection of aircraft wake vortices using Doppler lidar. *Journal of Aircraft*, 39(5) :850–861, September 2002.
- [3] D. Vicroy, J. Brandon, G. Greene, R. Rivers, G. Shah, E. Stewart, and R. Stuever. Characterizing the hazard of a wake vortex encounter. In *Proc. Aerospace Sciences Meeting and Exhibit (AIAA'97)*, Reno, NV, January 1997.