Télédétection Radar de turbulences de sillage : retro-propagation en air clair *Radar Monitoring of Wake Vortex : reflection in clear air*

F. Barbaresco*, A. Jeantet**, U. Meier**

*THALES AIR SYSTEMS, Département Stratégie Technologie et Innovation, Unité Surface Radar Hameau de Roussigny, 91470 Limours, France, courriel : <u>frederic.barbaresco@thalesgroup.com</u> ** THALES DEFENCE DEUTSCHLAND GmbH, Land & Joint Division, Pforzheim, Germany, courriel : {alain.jeantet,uwe.meier}@uwe.meier@de.thalesgroup.com

Résumés (en français et en anglais)

Nous présentons dans cet article les résultats des campagnes de mesures Radar (bande-X BOR-A550) 2006 et 2007 à l'aéroport d'Orly et de Juin 2008 à l'aéroport Paris-CDG. Ces campagnes de mesures radar en bande X avaient pour objectif d'estimer les capacités de télédétection en air clair à courte distance (inférieure à 2000 m) des turbulences de sillages générées par les avions de ligne. Les essais positifs et concluants permettent de proposer des campagnes supplémentaires et le développement d'un radar prototype dédié à cette tâche dans le cadre du programme européen SESAR. Ces campagnes de mesures financées par THALES ont été effectuées en coordination avec EUROCONTROL, ADP et la DSNA.

This paper deals with radar (X-band BOR-A550) trials campaign 2006 and 2007 on Orly Airport, and June 2008 on Paris-CDG Airport. These X-band radar trial campaign have been deployed to assess short range (inferior to 2000 m) wake-vortex monitoring capabilities. Positive results of this de-risking phase is opportunity to go forward with additional tests and new radar prototype development in the framework of European SESAR program. These first radar trials have been funded by THALES in close coordination with EUROCONTROL, ADP & DSNA.

Mots clés (en français et en anglais) : turbulence de sillage, mesure de turbulence en air clair, radar bande X

Introduction

« Constater que les théories les plus parfaites sont les guides les plus sûrs pour résoudre les problèmes concrets; avoir assez confiance en sa science pour prendre des responsabilités techniques. Puissent beaucoup de mathématiciens connaître un jour ces joies très saines, quelques humbles qu'ils les jugent ! »

Jean Leray

L'Histoire de l'étude des turbulences de sillage remonte aux premiers travaux de Léonard de Vinci qui fut le premier à analyser la formation de tourbillons dans l'eau ou l'air et les écoulements autour d'un obstacle. C'est lui qui donna le nom actuel de "turbulence" à ces phénomènes. Le champ sémantique latin ('turbo') ou grec ('turbei') du mot `turbulence' est riche de significations : turbo (tumulte, tourbillon), turbidus (agité, désordonné), turbinatio (toupie),... . Son apport ne se place pas tant sur le domaine théorique , mais sur une analyse détaillée du phénomène, qu'il a décrit à l'aide de dessins très précis. En observant l'écoulement des torrents, de l'Arno, il remarque que: *« Les petits tourbillons sont presque innombrables et les grands tourbillons sont mis en rotation que par les grands, non par les petits, tandis que les petits tourbillons le sont à la fois par les grands et les petits »*.

On retrouve au 17ème siècle, dans la pensée de Descartes et dans son ouvrage « *Le monde ou un traité sur la lumière* » des conceptions cosmologiques d'un univers composé d'une infinité de particules en

interaction dont leurs mouvements et leurs collisions donnent naissance à des tourbillons qui entraînent les planètes dans leur course et dont le mouvement rapide au centre produit la lumière des étoiles.

Il faut ensuite attendre Reynolds en 1883, qui étudia théoriquement les conditions d'écoulement des fluides dans des tuyaux et les limites du passage d'un mode "laminaire" à un mode "turbulent". Il montra que les conditions d'écoulement dépendent de la vitesse de l'écoulement, de la géométrie des obstacles et d'une propriété du fluide appelée "viscosité cinématique" qui mesure sa résistance au mouvement. En parallèle, autour de 1821, un mathématicien français, Claude Navier, a établi sur la base d'équations aux dérivées partielles, à partir de la situation simplifiée étudiée auparavant par Euler, la description complète du mouvement d'un fluide. Il faut également noter le nom du français Saint-Venant.

Il faudra attendre ensuite 1941 et les travaux du mathématicien russe Kolmogorov qui permirent de passer d'une analyse globale des turbulences à une analyse individuelle de chaque tourbillon en terme de taille et d'énergie. Il explique ainsi comment un tourbillon de grande taille se scinde en de plus petits éléments qui se divisent à leur tour en « cascade turbulente » dont il analysa l'évolution des vitesses. Landau, Kolmogorov, Arnold et l'école des mécaniciens russes développèrent ainsi la théorie ergodique et la théorie statistique de la turbulence homogène et isotrope.

En parallèle, un jeune mathématicien français, Jean Leray (1906-1998), originaire de Nantes, travaillait sur la turbulence de sillage [1,2,3]. Sa thèse portait sur la mécanique des fluides. Jean Leray était fasciné par ce spectacle qu'il avait dû observé longuement le long des berges de la Loire ou de la Sèvre nantaise. Il écrivit lorsqu'il poursuivit ses études à Paris à l'École Normale Supérieure, ayant changé de fleuve : « Observons la Seine en crue, contournant une pile de pont : son écoulement paraît régulier, puis, dans un domaine de plus en plus petit, il s'accélère de plus en plus, alors un choc local dissipe localement une large part de l'énergie en jeu et rétablit le calme; puis le phénomène se répète ». Il publia ensuite un article qui allait faire avancer de façon profonde la compréhension des équations de Navier et les phénomènes d'écoulement d'un fluide et de tourbillons de sillages. Cet article parut en 1934 dans la revue Acta Mathematica sous le titre « Sur le mouvement d'un fluide visqueux remplissant l'espace ». Leray y montre que les équations de Navier dans l'espace à 3 dimensions ont toujours une solution faible avec des propriétés de croissance appropriées, l'unicité des solutions faibles des équations de Navier n'étant pas connue (pour l'équation Euler, l'unicité de solutions faibles est de façon saisissante fausse). Il s'agissait de la première avancée très significative, permettant de donner un cadre conceptuel renouvelé. Jean Leray publia d'autres articles sur les turbulences de sillage comme «Les problèmes de représentation conforme d'Helmholtz; théories des sillages et des proues » en Juillet 1935. Malgré les conseils de prudence qui lui sont prodigués par Henri Lebesgue « Ne consacrez pas trop de temps à une question aussi rebelle. Faite autre chose», Jean Leray persévéra et il écrivit à ce propos quelques années plus tard : « Dans des cas généraux et importants, j'ai réussi, grâce à la notion d'ensemble compact, à déduire des seules majorations a priori l'existence, indépendamment de toute hypothèse d'unicité; j'ai pu ainsi développer une analyse de la théorie des liquides visqueux qui n'avaient été au'amorcée par l'école de M. Oseen, effectuer une discussion de la théorie des sillages et des iets dont Levi-Civita et H. Vallat avaient signalé les difficultés et l'intérêt, enfin donner des conclusions complètes à la célèbre discussion du problème de Dirichlet qu'avait faite M. Bernstein ». Ainsi, Leray nous montre que le mouvement devient turbulent au moment où la solution réquilère laisse place à une solution faible qui peut avoir du tourbillon (vorticité) ω = rot u infini en certains points. Il est impressionnant aujourd'hui de constater que le nom de Jean Leray reste inconnu du plus grand nombre alors qu'il a été Professeur au Collège de France de 1947 à 1978, membre de l'Académie des Sciences ainsi que de 12 académies étrangères et qu'il a obtenu les prestigieux prix Wolff en 1979 et prix Lomonossov en 1988. Jean Leray est sans conteste l'un des plus grands mathématiciens du 20ème siècle dont les travaux majeurs ont marqués, la dynamique des fluides et les équations aux dérivées partielles, les fonctions de plusieurs variables complexes et la topologie algébrique (avec la création de la théorie des faisceaux). Fait prisonnier en 1940 et interné dans un camp (où il créé une université de captivité pour les jeunes prisonniers), Jean Leray, afin d'être absolument certain que ses recherches ne puissent pas bénéficier à l'effort de guerre allemand, délaisse la mécanique des fluides pour se consacrer à la topologie algébrique. En 1993, Jean Leray évoqua encore ce problème pour parler du sujet qui nous intéresse dans cet article : « Les premiers avions eurent des ailes minces, provoquant de regrettables remous. Des années de pénibles essais furent nécessaires à l'intelligence humaine pour découvrir ce que mémorisent les gènes des volatiles : l'intérêt aérodynamique des ailes épaisses ; à l'avant un bord arrondi, à l'arrière un bord effilé. ». La formulation de Leray des équations de Navier consiste à éliminer le terme de pression pour obtenir une équation d'évolution de la vitesse seule u. Si on suppose qu'à t=0, divu=0, la vitesse u vérifie l'équation : $\frac{du}{dt} = -(u \cdot \nabla)u + v\Delta u - \nabla p$. Il s'agit alors de déterminer la fonction de pression p = p(t, x), telle que la

divergence *u* reste nulle. En remarquant que $div[(u \cdot \nabla)u + \nabla p] = tr(\nabla u)^2 + \Delta p$, il apparaît que $div[(u \cdot \nabla)u + \nabla p] = 0$, uniquement si et seulement si $\Delta p = -tr(\nabla u)^2$. Il faut alors utiliser l'expression de la solution de l'équation de Poisson :

$$\Delta z = f \Leftrightarrow z(x) = \aleph_N * f(x) = \int_{\mathbb{R}^N} \aleph_N(x - y) f(y) dy \quad \text{avec} \quad \aleph_N(x) = \begin{cases} (2\pi)^{-1} \ln|x| & \text{si } N = 2\\ ((2 - N)\sigma_N)^{-1} |x|^{2-N} & \text{si } N = 3 \end{cases}$$

Ce qui permet d'écrire la pression sous la forme : $p(t,x) = \int_{\mathbb{R}^N} \aleph_N(x-y) tr(\nabla u(t,y))^2 dy$

Le gradient de la pression s'exprime alors comme suit :

$$\nabla p(t,x) = \nabla \aleph_N * tr(\nabla u)^2(x) = C_N \int_{\mathbb{R}^N} \frac{x-y}{|x-y|^N} tr(\nabla u(t,y))^2 dy$$

Ceci permet d'enlever le terme de pression dans les équations de Navier qui s'écrivent alors sous la forme de Leray :

$$D_t u(t,x) = v\Delta u - C_N \int_{\mathbb{R}^N} \frac{x-y}{|x-y|^N} tr(\nabla u(t,y))^2 dy$$

Parfois la version de Leray des équations de Navier sont écrites de façon synthétique :

 $u_t = \prod_E (u.\nabla)u + v\Delta u$ avec \prod_E l'opérateur de projection perpendiculaire sur le sous-espace E qui est donné par les champs de vecteurs de divergence nulle (perpendiculaire à tous les champs de vecteurs gradients) :

$$E = \left\{ u \in L^2 / \int u \cdot \nabla \varphi dx = \int div(\varphi u) dx = 0, \forall \varphi \in C_c^{\infty} \right\}$$

Malgré ces avancées successives, la turbulence garde encore aujourd'hui une grande partie de son mystère. La question « la solution cesse-t-elle vraiment d'être régulière au bout d'un temps fini ? » est l'objet du prix Clay en mathématique : « Waves follow our boat as we meander across the lake, and turbulent air currents follow our flight in a modern jet. Mathematicians and physicists believe that an explanation for and the prediction of both the breeze and the turbulence can be found through an understanding of solutions to the Navier-Stokes equations. Although these equations were written down in the 19th Century, our understanding of them remains minimal. The challenge is to make substantial progress toward a mathematical theory which will unlock the secrets hidden in the Navier-Stokes equations.» (Millenium Problems, Clay Mathematics Institut).

L'étude des turbulences de sillage a été relancée à la fin des années 60 par les russes, lorsque Yuri Gagarin décéda accidentellement en perdant le contrôle de son aéronef qui s'écrasa après avoir été déstabilisé par des turbulences de sillage. En 1968, Belotserkovsky, son professeur de mécanique des fluides, a été chargé par l'état soviétique de l'enquête sur la mort de Gagarin. Sergei Belotserkovsky, prit ensuite la tête d'un programme de recherche ambitieux qui permit de mettre au point le premier modèle numérique de modélisation et de prédiction d'évolution des turbulences de sillage. Sergei Belotserkovsky, natif de la ville antique de Livny dans la région Orel de la Russie, a soutenu sa thèse de doctorat en 1955, après laquelle il entra à l'Académie de l'Armée de l'air et à l'Institut central d'Aéro/hydrodynamique. C'est à cette époque, que la formation scientifique des premiers cosmonautes dirigés par Yuri Gagarin a occupé une place importante dans son travail. L'architecte spatial Korolev prévoyait un avenir scientifique brillant pour Gagarin et Belotserkovsky participait intensivement à sa formation scientifique avant sa mort tragique qui en a empêché l'accomplissement. Une dette d'honneur a incité alors l'enseignant à œuvrer à une nouvelle mission : garder pour l'histoire l'image brillante du premier cosmonaute. Le professeur Belotserkovsky repris alors intensément les travaux qu'il avait commencé à construire dans les années 40 sur la description des turbulences de sillage. En 1959 il a publié un ouvrage de référence « Atlas of Unsteady Characteristics for Wings with Various Planeforms". Le professeur Belotserkovsky a fondé le Centre Scientifique-industriel SABIGO conjointement avec ses élèves et est devenu son Président. On lui a attribué le Prix de Zhukovsky en 1967, le Prix d'état de l'URSS en 1975 et de nouveau en 1981 et le Prix du Conseil des ministres de l'URSS, aussi en 1981. En 1995 il a reçu le titre de Scientifique d'Honneur de la Russie. Son fils Andrei anime toujours la communauté « turbulence de sillage » en Russie et participe régulièrement aux travaux des réseaux Wakenet-Europe et Wakenet-USA.

Les études dans les pays occidentaux ont été intenses dans les années 70 aux USA avec l'arrivé du Boeing 747. Des distances de sécurité entre avions, considérées de nos jours comme très (« trop »)

Journées scientifiques 'PROPAGATION ET TÉLÉDÉTECTION'

conservatives, ont été définies à cette époque et sont toujours recommandées par l'OACI. Dans les années 1993 à 2000, « *Transport Canada* » a lancé un programme d'étude et de modélisation des turbulences de sillage. Les objectifs du Projet étaient d'augmenter la capacité d'aéroports majeurs, en maintenant ou améliorant les niveaux existants de sécurité. Dans ce but, les canadiens ont travaillé sur l'évaluation et le développement d'un Système de Prévision de Tourbillon (VFS : Vortex Forecasting System). « *Transport Canada* » coopéra sur cette étude avec l'Université catholique de Louvain en Belgique et SABIGO Ltd de Moscou. Le modèle développé par les russes fut ainsi amélioré et recodé par le professeur Grégoire Winckelman, qui ramena l'expertise en Europe et donna sur cette base naissance au modèle européen actuel WAKE4D. Cette recherche a été étendue à d'autres organisations de recherche au Canada, aux États-Unis, aux Royaume-Uni, en France et en Allemagne. En particulier, « *Transport Canada* » a passé un accord aux États-Unis avec la NASA et le Centre de recherches de Langley (LaRC) pour conduire un certain nombre d'activités coopératives complémentaires. Cette coopération a donné naissance au modèle américain de la NASA, modèle APA, encore employé de nos jours. On voit que les travaux précurseur de Sergei Belotserkovsky, et le modèle VFS développé par SABIGO sont à l'origine de l'ensemble des outils actuellement utilisés dans le monde occidental.



Figure 1 : (à gauche) travaux de Léonard de Vinci sur les turbulence de sillage, (à droite) Yuri Gagarin et Sergei Belotserkovsky

L'intérêt pour les turbulences de sillage a été relancé en ce début de siècle avec le développement du transport aérien dont toutes les études prévoient un développement considérable dans les 20 ans qui viennent. Doublement ou triplement du trafic en Europe, quintuplement en Asie, sous la poussée d'un nombre toujours plus grands de personnes (estimé à 1 milliard de passagers supplémentaires) accédant à un niveau de vie leur permettant d'utiliser les facilités du transport aérien pour le travail ou le tourisme, auquel s'ajoute le développement du fret aérien.

En Europe, pour faire face à la demande nouvelle des compagnies aériennes, la compagnie AIRBUS a lancé le développement et la commercialisation d'une nouvelle famille d'avion de grosse capacité : A380. Comme nous le verrons par la suite, la force des turbulences de sillage d'un avion (mesurée en terme de circulation en m²/s), dépend du rapport entre sa masse sur le produit de son envergure par sa vitesse. L'Airbus A380 possédant sur la base de ces caractéristiques des turbulences de sillage plus intenses que la génération précédente des Boeing B747, il nécessitait une analyse spécifique pour déterminer ses nouveaux paramètres. Ainsi, l'A380 a été le premier avion a passé une « Wake Vortex Certification » et des études spécifiques menées en collaboration avec EUROCONTROL et la FAA. Quelques temps plus tard, la société Boeing a décidé le lancement de la version étendue (« strech ») du Boeing B747, qui porte le nom de B747-8. Comme pour l'A380, le Boeing B747-8 est entré dans une phase de « Wake Vortex Certification » pilotée par la FAA en coordination avec EUROCONTROL depuis 2008.



Figure 2 : Arrivée des "Super-Heavy Aircraft" Airbus A380 et Boeing B747-8 aux turbulences de sillage plus intenses

Les résultats des études successives relatives aux turbulence de sillage de l'A380 ont guidé l'OACI pour l'application de nouvelles règles concernant les distances de sécurité à appliquer derrière le nouveau gros aéronef. Une nouvelle classe « Super-Heavy » a été créée qui rajoute plusieurs miles nautiques aux distances de sécurités « wake vortex » en plus de ceux habituellement appliqués pour la catégorie « Heavy » (Boeing B747 classique). Nous donnons dans la figure ci-dessous, les nouvelles règles OACI pour l'A380 et qui furent révisées en 2005, 2006 et 2008 suite aux essais en vol d'Airbus. Ces distances de sécurité sont données pour l'avion suiveur en fonction de la catégorie de l'avion qui précède (« small », « medium » & « heavy ») et la phase de vol (approche, départ ou en-route).



Figure 3 : Distance de sécurité pour l'avion suiveur en fonction de la catégorie de l'avion qui précède (« small », « medium » & « heavy ») et la phase de vol (approche, départ ou en-route) telles que définies par l'OACI pour un B747 et nouvellement établies pour l'A380 et révisées en 2005, 2006 et 2008 suite aux essais réalisés par la société AIRBUS

Depuis les années 70, de nombreux accidents attribués à des turbulences de sillage ont été référencés : 30 mai 1972, le vol Delta Airlines 9570 en approche finale derrière un DC-10 s'écrase sur un aéroport (C'est cet accident qui a occasionné l'élaboration par la FAA de nouvelles règles de distances pour les gros avions); 15 décembre 1993, un avion léger avec 5 personnes à bord en approche finale derrière un Boeing 757 s'écrase sur l'aéroport John Wayne à Los Angeles; 20 septembre 1999, un JAS 39 Gripen passe dans la turbulence de sillage d'un autre appareil lors de manoeuvres militaires et s'écrase. Le pilote réussit à s'éjecter; 12 novembre 2001 : le vol American Airlines 587 s'écrase peu de temps après avoir décollé de

Journées scientifiques 'PROPAGATION ET TÉLÉDÉTECTION'

l'aéroport John F. Kennedy à New-York. Il était passé dans la turbulence de sillage d'un Boeing 747 de la Japan Airlines qui avait entraîné une panne de ses gouvernes; enfin 4 novembre 2008 : Un LearJet 45 du gouvernement mexicain en approche en virage s'écrase à l'aéroport international de Mexico. L'avion suivait un Boeing 767 de la Mexican Airlines sans en avoir été informé. Pour ce dernier accident, bien que les pilotes du Learjet aient été instruits pour réduire la vitesse et pour maintenir la séparation, l'avion a continué à rattraper le 767. Quand il a rencontré la turbulence, le Learjet n'a pas réussi à contrôler son attitude et est entré en collision avec une des rues de la ville. L'équipage et 6 passagers dont le Ministre de l'intérieur mexicain sont morts dans l'accident. le Learjet était à 6nm (11km) derrière le B767, et approchait plus rapidement que lui quand les contrôleurs lui ont demandé de réduire sa vitesse à 180kt (333km/h). Les données radar montrent que le Learjet n'a pas réduit sa vitesse immédiatement et leur distance de séparation est tombée à 4.15 nm (la distance minimale étant de 5nm) avant l'accident. Nous illustrons dans la figure suivante, l'accident de New-York en 2001 et celui de Mexico en 2008.



Figure 4 : (à gauche) novembre 2001, un B587 s'écrase à l'aéroport JFK de New-York après être passé dans les turbulences de sillage d'un B747, (à droite) novembre 2008, un LearJet 45 s'écrase sur l'aéroport de Mexico en suivant un B767 à trop courte distance

Au niveau européen, de nombreuses études ont été menées dans le cadre du PCRD (Programme Cadre de Recherche et Développement) depuis une décennie. Nous attirons l'attention sur les trois plus récentes ATC-WAKE (http://www.wakenet3-europe.eu/index.php?id=37), FAR-WAKE (http://www.far-wake.org/) et CREDOS (http://www.eurocontrol.int/eec/credos/public/subsite homepage/homepage.html). L'étude ATC-WAKE (Integrated Air Traffic Control WAKE vortex safety and capacity system) était pilotée par le NLR et avait pour objectif principal de développer et construire une plate-forme de simulation d'un système ATC de gestion des alertes de tourbillons de sillage. Thales Air Systems avait la charge de la définition de l'architecture du système. Cette plate-forme est utilisable pour évaluer l'interopérabilité avec des systèmes ATC existants, évaluer le gain en sécurité et les améliorations de capacité, évaluer la rentabilité opérationnelle et l'acceptabilité et faire un plan de mise en oeuvre technologique. Cette plate-forme est un pas essentiel qui peut mener à l'installation d'un système d'aide à la décision ATC intégré aux aéroports, permettant aux contrôleurs aériens d'appliquer de nouveaux temps optimisés d'espacement entre avions. L'étude FAR-Wake est un projet de recherche terminé en 2008 qui a visé à approfondir les connaissances actuelles. Parmi d'autres, les questionnements les plus importants concernent le rôle précis des instabilités de ces tourbillons sur l'affaiblissement du sillage lui-même, les effets du fuselage, des engins de propulsion, et enfin, du sol sur ces tourbillons. Les activités de recherche ont porté sur l'étude de tourbillons en conditions idéales pour accéder à une meilleure connaissance fondamentale des phénomènes physiques sous-jacents en jeu, en complétant les seules connaissances empiriques disponibles à ce jour. L'étude FAR-WAKE a développé des modèles théoriques avec les outils numériques associés pour caractériser et prédire le comportement de ces structures tourbillonnaires en conditions idéales et avec effets de bord. Grâce aux études numériques et expérimentales réalisées mais également en s'appuyant sur d'autres bases de données, des études paramétriques avec une description associée systématique des phénomènes tourbillonnaires ont été alors possibles. Enfin, l'étude CREDOS (Crosswind - Reduced Separations for Departure Operations) toujours en cours examine les possibilités de réduction conditionnelle sûre des

distances minimums de séparation liées aux turbulences de sillage lors des départs en fonction de mesures senseurs de monitoring des turbulences de sillage et de mesures vents associées à des modèles de prédiction d'évolution.

Plus récemment, en Avril 2008, le 7^{ème} PCRD a lancé un réseau d'expertise appelé **WAKENET3-EUROPE** (<u>http://www.wakenet3-europe.eu/</u>), piloté par AIRBUS et pour lequel THALES AIR SYSTEMS est en charge de la tâche « *Wake vortex sensors & advisory systems* ». En janvier 2009, THALES AIR SYSTEMS a organisé le 1^{er} Workshop international du réseau Wakenet-3 à Thales Université à Jouy-en-Josas sur le thème « *Wake Turbulence Safety in Future Aircraft Operations* » (<u>http://www.wakenet3-europe.eu/index.php?id=63</u>). Cet événement a rassemblé 120 participants : des européens, mais également des américains (FAA, NASA, BOEING, ...) membres du réseau **WAKENET-USA**, des russes de **WAKENET-RUSSIA**, des japonais de JAXA et d'ENRI du programme **DREAMS**, des chinois du NUDT (qui ont effectué des essais de monitoring des turbulences de sillage avec un radar bande X, et développé des modèles de SER radar en couplant modèle de mécanique des fluides et modèle électromagnétique).

L'europe vient de lancer la phase de développement du programme **SESAR** (Single European Sky Air Traffic Management Research, <u>http://www.eurocontrol.int/sesar/public/subsite homepage/homepage.html</u>). Le programme SESAR, volet technique de la réalisation du ciel unique européen, a pour objectif de développer une nouvelle génération de systèmes de gestion du trafic aérien (ATM) capable de garantir la sécurité et la fluidité du transport aérien pour les 30 années à venir. Reposant sur des systèmes ouverts, SESAR sera compatible avec d'autres initiatives mondiales de même nature, telles que le projet NextGen (Next Generation Air Transportation System, http://www.jpdo.gov/) de modernisation du contrôle du trafic aérien aux Etats-Unis. Cette refonte se caractérisera entre autres par la généralisation de technologies nouvelles, la gestion dynamique de l'espace aérien, et le développement d'outils automatiques d'aide au contrôle aérien. Thales est, aux côtés de ses partenaires, l'un des initiateurs de ce projet paneuropéen, dans lequel il joue un rôle majeur par son soutien actif et son implication dans le lancement du programme, apportant toute son expertise technique dans le cadre de la phase de définition et dans la préparation des phases à venir. La phase de définition s'est achevée en mai 2008. La phase de développement (2009-2016) déterminera d'ici 2015 tous les éléments techniques qui donneront corps au futur système ATM européen : concepts opérationnels et procédures validées, normes, architectures détaillées, technologies, prototypes et essais en conditions réelles. L'organisation de la phase de déploiement qui débutera en 2015 reste à finaliser. Le nouveau système ATM, dont l'introduction aura lieu en 2020, devrait répondre aux impératifs suivants : une capacité multipliée par 3 et un niveau de sécurité multiplié par 10. Relativement à ces objectifs, la gestion des alertes et des séparations liées aux dangers des turbulences de sillage est au cœur de la problématique.

1. État de l'art dans l'étude de la réflectivité radar des turbulences de sillage

Durant les années 80 et 90, différentes campagnes de mesures radar ont été réalisées en Europe (en France et au Royaume Uni) et aux États-Unis. Ces campagnes ont montré qu'il était possible de détecter les turbulences de sillage dans différentes bandes de fréquences (VHF/UHF/L/S/C/X bands) en air clair jusqu'à plusieurs kilomètres de distance. Toutes les campagnes américaines sont résumées dans l'article de K. Shariff & A Wray [9], et nous synthétisons ici les rapports d'étude de GEC-MARCONI en angleterre et du CNRS/CRPE en France :

Noonkester & Richter (1980) :

- Détection de turbulences de sillage sur des avions au décollage à la distance de R = 0.3 Km
- Bande S (3 GHz)
- Chadwick et al. (1984):
 - \circ Détection de turbulences de sillage au décollage et à l'atterrissage à la distance R = 1 Km
 - Bande S (3 GHz) (200 W, diamètre de l'antenne : 8 feet)

• Sheppard (1992), GEC-MARCONI

- Détection des turbulences de sillage à l'arrivée à la distance de R = 2.8 Km
- Bande S (3 GHz) (radar GEC-MARCONI DX 04)
- Bertin (1992), CNRS/CRPE
 - Détection des turbulences de sillage à l'arrivée à la distance de R = 0.5 Km
 - Bande UHF (961 MHz) (radar PROUST, CNRS/CRPE)
- Nespor et al. (1994)
 - Détection des turbulences de sillage d'un petit avion de chasse en approche en regardant dans l'axe à la distance de R= 2.7 Km
 - Bande C (5.6 GHz) (1 MW Doppler pulsé)
- Russel et al. (1997)
 - Détection avec un radar bi-statique à la distance de R= 2 Km

- Bande X (9.5 GHz) (radar bi-statique)
- *Mackenzie (1997)*
 - Détection avec un radar bi-statique à la distance de R= 1.4 Km
 - Bande C (5.6 GHz) (radar bi-statique)
- Iannuzelli at al. (1998), Rubin & Rubin et al. (2000)
 - Détection des turbulences de sillage à la distance de R= 2.5 Km
 - Bande UHF (915 MHz) (radar RASS 'Radio Acoustic Sounding System")
- Gilson, MIT Lincoln Lab (1992)
 - Détection des turbulences de sillage d'un C-5A à la distance de R = 15 Km dans différentes bandes
 - Bandes VHF (162 MHz), UHF (422 MHz), L (1.32 GHz), S (2.95 GHz), C (5.67 GHz), (pas de mesures réussies en bande Ka, 35 GHz) (puissance radar de 2 to 7 MW crête)

Les conclusions de cette dernière campagne furent les suivantes :

- La SER était relativement plate en fonction de la fréquence
- La réflectivité spéculaire induite par des particules dans l'atmosphère ne semble pas en être la cause (pas de réflectivité de type Rayleigh en f⁴)
- La dépendance en fréquence n'était pas de type Kolmogorov $f^{1/3}$
- Les facteurs de dépendance remarqués sont :
 - la décroissance de réflectivité avec l'altitude lié à la stratification de l'air (fréquence de Brunt-Vaisala)
 - la mesure du gradient de densité de l'atmosphère relatif au gradient adiabatique
 - La SER 1 km derrière l'avion était insensible à la poussée des moteurs
- La SER à 10000 pieds d'altitude et 0.6 Km derrière l'avion était insensible à la manœuvre des volets
- Le mécanisme principal était sensible au mixage turbulent des indices de l'atmosphère existants des gradients de réfraction.

Nous donnons dans les images suivantes des illustrations de ces campagnes de mesures Radar aux États-Unis et en Europe.



Figure 5 : Illustration des campagnes de mesure radar des turbulences de sillage aux États-Unis et en Europe dans les années 90



Figure 6 : (à gauche) détail de la campagne radar Anglaise en bande S, (à droite) détail de la campagne radar française en bande UHF

Ces essais, dans les années 90 ont révélé des échos radar de sillages d'avion en air clair. Le mécanisme causant des gradients d'indice de réfraction dans ces essais semblent différents des turbulences atmosphériques isotropes à l'échelle inertielle de Kolmogorov, tels que décrit dans les études de Tatarski : dans un champ de vitesse turbulent, la présence de gradients verticaux moyens d'humidité et de température potentielle conduit à des fluctuations de l'indice de réfraction (la SER par unité de volume de la turbulence isotrope à l'échelle inertielle est $\eta = 0.38.C_n^2.\mathcal{X}^{-1/3}$). Les mécanismes ne dépendent pas des conditions atmosphériques, l'humidité a une influence négligeable et la poussée des moteurs ne joue aucun rôle dans la réflectivité radar des turbulences de sillage.

Les deux causes principales de réflectivité radar des turbulences de sillage ont été analysés et corrélés avec les mesures réelles par K. Shariff & A Wray [9]. Il s'agit principalement :

• Gradient de densité radial dans le Coeur des 2 rouleaux (vortex):

- Le Coeur de chaque vortex , qui a une densité plus faible et donc un indice de réfraction plus faible.
- Un gradient de pression radiale et donc de densité dans la colonne du vortex induit par le flot rotationnel.

La SER est généré principalement par un gradient de densité dans les vortex induit par un équilibre du gradient de pression radial avec les forces centrifuges :

$$(n-1).10^{6} = 77.6 \left(\frac{P_{a}}{T}\right) + 64.8 \left(\frac{P_{v}}{T}\right) + 3.776.10^{5} \left(\frac{P_{v}}{T^{2}}\right)$$

(n : indice de réfraction de l'air humide pour les frequences inf érieures à 20 GHz

avec $\begin{cases} P_a : la pression partielle (mb) de l'air sec \\ P_a : la pression par$

 P_{v} : la pression partielle (mb) de vapeur d'eau

T: la température (K) , $T_{\infty} = 288K$

$$\frac{P(r)}{P_{\infty}} = \left(\frac{\rho(r)}{\rho_{\infty}}\right)^{\gamma} = \left(1 - (\gamma - 1)\int_{r}^{\infty} \frac{1}{r} \frac{V_{\theta}^{2}}{c_{\infty}^{2}} dr\right)^{\gamma/(\gamma - 1)}$$

avec la vitesse radiale dans le vortex $V_{\theta} = \frac{\Gamma}{2\pi . r} \begin{cases} (r^2/r_0^2) & \text{for } r < r_0 \\ 1 & \text{for } r \ge r_0 \end{cases}$

 $\int \rho(r)$: densité dans chaque vortex

où
$$\left\{ \rho_{\infty} : densité ambiante \right\}$$

 c_{∞} : vitesse ambiente du son (341 m/s)

$$et \quad \frac{T(r)}{T_{\infty}} = \left(\frac{P(r)}{P_{\infty}}\right) \left(\frac{\rho(r)}{\rho_{\infty}}\right)^{-1}$$

• Transport de fluide atmosphérique dans l'ovale entourant les deux rouleaux (vortex):

L'ovale entourant la paire de vortex transporte de l'air d'une altitude vers une autre. Lorsqu'il descend, le fluide dans l'ovale se compresse adiabatiquement en réponse à la pression ambiante qui augmente:

$$\begin{split} [\widetilde{n}(z) - \overline{n}(z)] 10^{6} &= 223 [\widetilde{\rho}(z) - \overline{\rho}(z)] + 76.7 [\widetilde{\rho}_{v}(z) - \overline{\rho}_{v}(z)] \\ &+ 1.75.10^{6} \left[\frac{\widetilde{\rho}_{v}(z)}{\widetilde{T}(z)} - \frac{\overline{\rho}_{v}}{\overline{T}(z)}(z) \right] \\ " &= -\frac{\overline{\rho}(z)N^{2}}{g} \varDelta z \left[223 + \frac{\overline{RH}(z)P_{sat}(T_{z})}{\overline{P}(z)} \left(76.7 + \frac{3.49.10^{6}}{\overline{T}(z)} \right) \right] \\ avec \begin{cases} N : \text{ fréquence de } Brünt-Väisälä (paramètre \ de \ stratification) \\ au \ niveau \ de \ la \ mer : N = 0.014s^{-1} \\ (en \ été) \ N = 0.02s^{-1} - 0.03s^{-1} \ (en \ hiver) \\ \varDelta z : \ var \ iation \ d' \ altitude \\ P = P_{a} + P_{v} \end{split}$$

Dans les figures ci-dessous, nous illustrons la géométrie des rouleaux (vortex) des turbulences de sillage qui sont la cause de leur réflectivité radar : gradient de densité radial dans les chaque rouleau, et transport global dans l'ovale entourant les deux rouleaux.



Figure 7 : (à gauche) mélange d'air de températures et pressions différentes dans chaque rouleau et déplacement global d'air autour de l'ovale constitué des deux rouleaux, (à droite) évolution temporelle de la géométrie des rouleaux en fonction du temps

2. Description de la physique des turbulences de sillage

Les turbulences de sillage générées par un avion sont une conséquence naturelle de sa portance. L'écoulement du sillage derrière un avion peut être analysé par des description en champ proche et en champ lointain. En champ proche, de petits vortex émergent en bout d'aile et aux bords des volets. Après enroulement, les turbulences de sillage consistent généralement en deux rouleaux de flots contre-rotatifs horizontaux, de forces égales.

Quand les forces qui agissent sur l'avion sont en à l'équilibre, la poussée de l'avion et la quantité de mouvement verticale du flux de sillage sont égaux au poids de l'avion. Nous pouvons alors observer que la force de ces tourbillons de sillage (la circulation exprimée en m²/s) est proportionnelle à la masse de l'Avion et inversement proportionnelle au produit de la Vitesse de l'avion par son envergure :

 $\Gamma_{0} = \frac{M.g}{(\rho.V.s.B)} \begin{cases} M: \text{ masse de l'avion} \\ V: \text{ vitesse de l'avion} \\ B: \text{ envergure} \end{cases} \begin{cases} g: \text{ accélération gravitation} \\ \rho: \text{ densité de l'air} \\ \Gamma_{0}: \text{ Circulation} \\ s = \pi/4 \end{cases}$

Pour un tourbillon (vortex) simple axi-symétrique la circulation est donnée par : $\Gamma(r) = 2\pi r v_{\theta}(r)$

Une façon de décrire le tourbillon est de donner la loi d'évolution de la vitesse tangentielle en fonction du rayon. De nombreuses lois empiriques ont été établies en fonction des mesures, de la forme :



Figure 8 : Exemple de lois d'évolution de la vitesse tangentielle en fonction du rayon dans chaque tourbillon

Les autres paramètres importants décrivant la dynamique des tourbillons de sillage sont les suivants :

- L'espacement initial des tourbillons (m) : $b_0 = s.B$ with $s = \frac{\pi}{4}$
- La loi de décroissance de la circulation des tourbillon de sillage: $\Gamma = \Gamma_0 \left(1 \frac{t^*}{8} \right)$ avec $t^* = \frac{t}{t'}$

Il est raisonnable de considérer pour les distances de sécurité qu'une turbulence de sillage n'est plus dangereuse pour aucun type d'avion, si la circulation atteint un taux proche d'une turbulence classique de l'atmosphère, soit une circulation $\Gamma_{bg} = 70 \text{ m}^2/s$. Ce qui donne un temps relative pour atteindre cette valeur:

 $t_{\Gamma_{bg}} = 8.t' \left(1 - \frac{\Gamma_{bg}}{\Gamma_0} \right)$

A cette dynamique interne des turbulences de sillage, il faut rajouter une dynamique induite par les conditions externes, qui va piloter la cinématique et le comportement des tourbillons en particulier proche du sol :

- Effet induit par le cisaillement du vent (stratification du vent en altitude ou induit par les infrastructures au sol) :
 - Les deux rouleaux pivotent l'un par rapport à l'autre et l'un des rouleaux augmente de taille. Ce phénomène peut augmenter la circulation et le danger des turbulences de sillage
- Effet de sol (rebond) :
 - Lorsque les deux rouleaux touchent le sol, ils 'écartent en roulant sur le sol et rebondissent en repartant vers le haut. On observe également parfois après le contact au sol, l'apparition de vortex miroirs par effet de sol.
- Transport par le vent de travers
 - Le vent de face a peu d'influence sur la cinématique des deux rouleaux en revanche le vent de travers va pousser les turbulences de sillage dans la direction du vent dominant
- Déclin (action de la turbulence naturelle de l'atmosphère et des instabilités de Crow) :
 - Les tourbillons au court du temps s'enroulent autour d'eux-mêmes et interagissent mutuellement les uns sur les autres créant des instabilités qui détruisent la cohérence du sillage. A cela s'ajoute la turbulence naturelle de l'atmosphère qui détruit les vortex.

Dans la figure ci-dessous, nous illustrons ces différents effets :



Figure 9 : (en haut à gauche) effet du vent de travers sur le transport latéral des tourbillons, (en haut à droite) pivotement des deux rouleaux sous l'action du cisaillement du vent, (en bas à gauche) rebond d'un rouleau par effet de sol, (en bas à droite) déclin des turbulences de sillage par la turbulence naturelle de l'atmosphère et les instabilités de Crow.

3. Étude de la signature Doppler Radar des turbulences de sillage

Nous allons décrire dans la suite les campagnes de mesure radar de THALES en bande X, mais nous donnons dès à présent les signatures Doppler obtenues qui sont cohérentes avec la géométrie des tourbillons telle que décrites précédemment. Les tourbillons de sillage ont été observés avec un axe de visé radar perpendiculaire à l'axe de descente au décollage de l'avion antenne arrêtée, ce qui permet une mesure directe de la vitesse radiale dans chaque vortex. La résolution distance est de 40 m, soit la taille d'un vortex (une cellule radar contient l'ensemble du rouleau), et une résolution Doppler de 0.2 m/s avec une plage Doppler non-ambiguë de +/-26 m/s.

Lors des campagnes de mesures radars nous avons observé des signatures Doppler très caractéristiques des sillages. Nous avons remarqué dans chaque signature doppler des raies Doppler très marquées dont la pente Doppler/Temps évolue en fonction de la géométrie et de l'âge du vortex. La pente Doppler/Temps de ces raies évoluent suivant l'évolution géométrique de la spirale du rouleau.

- En fonction de l'âge des vortex :
 - Pentes Doppler/Temps positives très nombreuses (la vitesse augmente sur un horizon court temporel) pour les vortex jeunes. Avec de nombreuses raies pour les vortex les plus jeunes et des vitesses très élevées.
 - Pentes Doppler/Temps positives ou nulles (la vitesse reste stable sur un horizon court temporel) pour les vortex matures
 - Pentes Doppler/Temps négatives ou nulles (la vitesse diminue sur un horizon court temporel) pour les vortex vieux. On observe quelques fois, des mélanges de pentes positives et négatives.
 - Pentes Doppler/Temps négatives et très peu nombreuses ou raies Doppler/temps très incohérentes pour les vortex en déclin.
- En fonction de la géométrie des vortex :
 - Plus la vitesse augmente, plus la pente Doppler/Temps est importante.

Nous illustrons sur l'image suivante la signature Doppler d'un vortex jeune en croissance : Le zéro Doppler se trouve en bas et en haut de l'image du spectre Doppler/Temps. La vitesse maximum est au centre +/-26 m/s (modulo la vitesse ambiguë). Dans cette enregistrement, nous observons une signature également de la pluie. Sur cette image nous observons :

- Des raies Doppler/Temps qui ont des pentes positives
- Des pentes Doppler/Temps dont la pente augmente avec la vitesse
- La signature de la pluie (qui permet de mesurer le vent de travers et la turbulence naturelle de l'atmosphère)



Figure 10 : Signature Doppler/Temps significative d'une turbulence de sillage

Cette signature est tout à fait cohérente avec la géométrie des turbulences de sillage. Le double millefeuilles de lames d'air de températures et pressions différentes crée pour chaque rouleau des réflectivités radar à l'interface de chaque enroulement de la double spirale. Cette réflectivité radar a une signature Doppler de la vitesse tangentielle en ces points. En effet, si on considère que la loi d'évolution de la vitesse

tangentielle dans le rouleau en fonction du rayon r est donnée par la loi empirique $v_{\theta}(r) = \Gamma_0 / 2\pi r(1 - e^{-r(\overline{B})})$, et la géométrie du rouleau est une double spirale de lames d'air imbriquées dont l'enroulement décrit la courbe géométrique $r = ae^{b\theta}$, il est possible d'expliquer les pentes Doppler/Temps. Dans le cas de la figure précédente :

- Il s'agit d'un vortex jeune. Seul le cœur du vortex est formé et génère de la réflectivité radar. Le cœur du vortex correspond à la pente positive de la loi empirique $v_{\theta}(r) = \Gamma_0 / 2\pi r (1 e^{-f\left(\frac{r}{B}\right)})$. La vitesse augmente avec le rayon *r*.
- Si nous sommes sur une lame de spirale dont le rayon est élevé, alors la vitesse sera élevée. Les vitesses Doppler élevées sont donc représentatives des lames de rayons élevés dans le cœur du vortex pour ce vortex jeune
- Pour ce vortex jeune, quand le temps évolue, la spirale tourne et le rayon du point réfléchissant à l'intérieur du cœur du vortex augmente car sa géométrie suit une spirale $r = ae^{b\theta}$.Comme nous

sommes dans la partie, ou la loi de vitesse tangentielle $v_{\theta}(r) = \Gamma_0 / 2\pi r (1 - e^{-f\left(\frac{r}{B}\right)})$ a une pente positive en fonction du rayon, la vitesse augmente quand le rayon augmente. Ceci génère donc une pente Doppler/Temps positive.

• Comme la géométrie est celle d'une spirale $r = ae^{b\theta}$, la variation de rayon sur un rayon fixé augmente proportionnellement au rayon quand la spirale tourne au cours du temps comme suit $dr = \alpha . r . d\theta$. Aussi, pour les lames de rayon élevée, lorsque la spirale tourne, le rayon du point réfléchissant augmente plus vite que pour les lames de rayon plus faible, et comme la vitesse augmente en fonction du rayon, la pente Doppler/Temps sera plus élevée dans ces cas, qui correspondent comme on l'a vu précédemment, aux raies de Doppler les plus grands dans le

spectre. On comprend alors que la pente Doppler/Temps de ces raies augmente en fonction du Doppler de la raie.

En vieillissant, le cœur diminue en intensité et la réflectivité commence a être importante dans les lames externes du rouleau. Dans cette phase intermédiaire, la réflectivité radar permet de mesurer à la fois la signature du cœur du vortex et son enveloppe externe, ce qui induit une signature Doppler avec des pentes Doppler/Temps simultanément mesurées positives et négative comme illustré dans la figure suivante.



Figure 11 : signature Doppler/Temps avec pentes positives et négatives représentatives respectivement du cœur et de l'enveloppe du vortex

Nous donnons dans la figure suivante, les évolutions des signature Doppler/Temps en fonction de l'âge de la turbulence de sillage. Au démarrage, les deux double-spirales sont très enroulées sur elle-mêmes et tournent extrêmement rapidement. Au cours du temps, les double-spirales de détendent en se déroulant et leurs vitesses diminuent progressivement. En vieillissant, le cœur est détruit par diffusion et le rouleau converge vers une géométrie de type tube.



Figure 12 : Signature Doppler/Temps Radar caractéristiques de la géométrie et l'age des turbulences de sillage

Des mesures radar ont également été effectuées antenne en scanning à la vitesse de 8°/s. Nous avons, comme indiqué sur la figure ci-dessous, obtenue les même signature Doppler/Temps avec les pentes caractéristiques. Comme l'antenne tourne et l'observation est intermittente, on mesure les pentes de façon discontinues, mais les alignements sont facilement observables.



Figure 13 : Mesure antenne tournante en scanning à 8°/S des signature Doppler/Temps des turbulences de sillage

Lors de la campagne de mesure 2006 à ORLY, des mesures d'opportunités ont été faites sur des avions en approche sur la piste d'atterrissage opposée. Des signatures radar de turbulences de sillage ont été mesurées à plus de 7 km sur un secteur de scan de 45° an azimut .



Figure 14 : (à gauche) condition de mesure radar à 7 km, (à droite) spectre doppler d'une turbulence de sillage à 7 Km

4. Description des traitements Doppler développés pour la détection et la caractérisation du danger des turbulences de sillage.

A partir des données I&Q du radar échantillonnés à 3 KHz, une chaîne de traitement du signal a été définie pour réaliser les fonctions suivantes :

- Détection des turbulences de sillage (par temps humide et sec) jusqu'à une distance de 2 Km en mode balayage de l'antenne en azimut (8°/s)
- Localisation des deux tourbillons en distance/azimut
- Caractérisation de chaque tourbillon :
 - Géométrie (paramétre de la spirale/du tube), dont on déduit l'âge et la durée de vie du tourbillon
 - Force du tourbillon exprimée par la Circulation en (m²/s)

Ces traitements ont été testé en temps réel sur un PC quadri-core.

La procédure de détection des turbulences de sillage est basée sur un traitement Doppler haute résolution régularisé, qui sera détaillé dans la suite. Pour cette fonction, nous calculons un terme d'« *entropie Doppler* » (défini par l'opposée du logarithme du déterminant de la matrice de covariance Toeplitz Hermitienne définie positive des données brutes I&Q) [41,42]. Ce terme traduit la « richesse

spectrale » contenue dans la cellule. Nous avons montré qu'il est possible d'exprimer ce terme d'entropie Doppler à partir des coefficients de réflexion régularisés $\{\mu_k\}_{k=2,...,n-1}$ (brevet THALES):

$$S = \sum_{k=2}^{n-1} (n-k) \left(\frac{1}{2} \ln \left(\frac{1+|\mu_k|}{1-|\mu_k|} \right) \right)^{\frac{1}{2}}$$

A partir des données d'entrée I & Q , x(k) = 1,...,N (*N* nombre d'impulsions dans la rafale) et un paramètre γ_1 de régularisation réel, on calcule un modèle auto-régressif complexe d'ordre M = N-1, à partir d'un algorithme de Burg régularisé (brevet THALES) qui fournit les paramètres auto-régressifs $a_k^{(M)} = 0,...,M$, les coefficients de réflexion $\mu_k = 1,...,M$ régularisés (coefficient complexes de module inférieur à l'unité), et la puissance du résidu d'estimation à l'ordre $M : P_M$

L'algorithme est le suivant : I. Initialisation :

$$\begin{aligned} & \int_{0}^{n} (k) = b_{0}(k) = x(k) , \quad k=1,...,N \quad (N:nb. ech.) \\ & P_{0} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^{N} |x(k)|^{2} \\ & a_{0}^{(0)} = 1 \\ . \textit{Itération} (n): \text{Pour } n = 1 \text{ à } M \\ & \mu_{n} = -\frac{\frac{2}{N-n} \sum_{k=n+1}^{N} f_{n-1}(k) b_{n-1}^{*}(k-1) + 2 \sum_{k=1}^{n-1} \beta_{k}^{(n)} a_{k}^{(n-1)} a_{n-k}^{(n-1)}}{\frac{1}{N-n} \sum_{k=n+1}^{N} |f_{n-1}(k)|^{2} + |b_{n-1}(k-1)|^{2} + 2 \sum_{k=0}^{n-1} \beta_{k}^{(n)} |a_{k}^{(n-1)}|^{2}} \quad \text{avec} \quad \beta_{k}^{(n)} = \gamma_{1} (2\pi)^{2} . (k-n)^{2} \\ & \begin{cases} a_{0}^{(n)} = 1 \\ a_{k}^{(n)} = a_{k}^{(n-1)} + \mu_{n} a_{n-k}^{(n-1)*} , \quad k=1,...,n-1 \\ a_{n}^{(n)} = \mu_{n} \end{cases} \\ & \begin{cases} f_{n}(k) = f_{n-1}(k) + \mu_{n} b_{n-1}(k-1) \\ b_{n}(k) = b_{n-1}(k-1) + \mu_{n}^{*} . f_{n-1}(k) \end{cases} \end{aligned}$$

Pour le calcul de la circulation, on utilise la méthode proposée par Rubin dans [7,8] qui permet d'exprimer la force de la turbulence de sillage proportionnellement au terme suivants où les V_i représentent la vitesse moyenne Doppler du filtre « i » et $S(V_i)$ la puissance du filtre Doppler « i » de transformée de Fourrier FFT du signal I&Q :

$$\Gamma \propto \left[2\int_{V_{\min}}^{V_{\max}} V_i^2 [S(V_i)]^{2/3} dV_i\right] \left[\int_{V_{\min}}^{V_{\max}} [S(V_i)]^{2/3} dV_i\right]$$

Pour obtenir cette formule de la circulation, il faut considérer la loi empirique des vitesses tangentielles en fonction du rayon dans le tourbillon :

$$V_r = \begin{cases} \frac{r}{r_c} V_{\max} & \text{si } 0 \le |r| \le r_c \\ \frac{r_c}{r} V_{\max} & \text{si } r_c \le |r| \end{cases}$$

Le spectre Doppler est lui relié à la vitesse Doppler par la relation :

$$S(V_i) = \int_{-\pi/2}^{+\pi/2} \int_{r(v_i)}^{r(V_i + \Delta V)} V_{i.d}\theta r.dr = \int_{-\pi/2}^{+\pi/2} \int_{r(v_i)}^{r(V_i + \Delta V)} V_{i.cos}\theta d\theta r.dr$$

La circulation est définie comme étant l'intégration du produit ci-dessous :

$$\Gamma(r) = \int_{0}^{2\pi} r V_r d\theta = \int_{0}^{2\pi} r \frac{r_c}{r} V_{\text{max}} d\theta = 2\pi r_c V_{\text{max}} = \Gamma \Longrightarrow V_{\text{max}} = \frac{\Gamma}{2\pi r_c} \text{ et } V_r = \frac{r_c}{r} V_{\text{max}} = \frac{\Gamma}{2\pi r_c} \text{ si } r_c \le |r|$$

On a donc la relation suivante avec la vitesse Doppler :

$$V_i = V_r \cdot \cos\theta = \frac{\Gamma\cos\theta}{2\pi \cdot r} \Longrightarrow S(V_i) = \frac{\Gamma}{\pi} \int_{-\pi/2}^{+\pi/2} \int_{r(V_i)}^{r(V_i + \Delta V)} \cos\theta d\theta dr = \int_{-\pi/2}^{+\pi/2} \int_{0}^{\cos\theta} \int_{0}^{2\pi \cdot r/i} d\theta dr$$

On considère alors l'aire pour $V > V_1$:

$$A = \int_{-\pi/2}^{+\pi/2} d\theta \int_{0}^{r(V_{1})} r dr = \int_{-\pi/2}^{+\pi/2} d\theta \int_{0}^{\cos\theta \frac{2\pi V_{1}}{2\pi V_{1}}} r dr = \int_{-\pi/2}^{+\pi/2} \left[\frac{r^{2}}{2} \right]_{0}^{\cos\theta \frac{\Gamma}{2\pi V_{1}}} d\theta = \frac{1}{2} \left(\frac{\Gamma}{2\pi V_{1}} \right)_{-\pi/2}^{2+\pi/2} \theta d\theta = \frac{\Gamma^{2}}{16\pi V_{1}^{2}}$$

Mais comme est lié à la dérivée de A, on en déduit $S(V_i) = \frac{dA}{dV_i} = \frac{\Gamma^2}{8\pi V_i^3}$

Maintenant si on calcule le moment suivant normalisé :

$$2\frac{\int_{V_{\min}}^{V_{\max}} V_i^2 [S(V_i)]^{2/3} dV_I}{\int_{V_{\min}}^{V_{\max}} S(V_i)^{2/3} dV_i} = k_1 \frac{\int_{V_{\min}}^{V_{\max}} dV_i}{\int_{V_{\min}}^{V_{\max}} V_i} = k_1 V_{\max} V_{\min} = k_2 V_{\max}$$
 avec $k_1 = 2$ et $k_2 = k_1 V_{\min}$

et comme la circulation est égale à $\Gamma = 2\pi J_c V_{max}$, on retrouve la formule de Rubin :

$$\Gamma = k_3.2 \frac{\int_{V_{min}}^{V_{max}} V_i^2 [S(V_i)]^{2/3} dV_I}{\int_{V}^{V_{max}} [S(V_i)]^{2/3} dV_i} \text{ avec } k_3 = \frac{2\pi r_o}{k_2}$$

Rubin a validé cette formule avec un radar RASS :



Figure 15 : corrélation entre la formule de Rubin mesurée et la circulation observée

Pour calculer cette expression, on effectue au préalable une transformée de Fourier 256 sur les données I&Q, comme illustrée ci-dessous :



Figure 16 : Spectre FFT Doppler d'une turbulence de sillage (évolution du spectre au cours du temps)

Journées scientifiques 'PROPAGATION ET TÉLÉDÉTECTION'



Figure 17 : (à gauche) Superposition des Spectres Doppler FFT d'une turbulence de sillage, (à droite) normalisation du spectre FFT sur l'axe fréquence pour en extraire les pics de fréquence

La formule précédente ne peut pas être utilisée directement sur le spectre FFT, car on ne doit pas intégrer sur le bruit. Pour résoudre ce problème, on normalise le spectre sur l'axe fréquentielle pour ramener le niveau moyen à zéro, ensuite on seuille le résultat. A partir des pics ainsi détectés, on reconstruit un spectre Doppler composé des pics détectés mais avec leur puissance déterminée à partir du spectre Doppler initial avant traitement de normalisation. La formule de Rubin est alors employée pour estimer la circulation. On observe que le spectre est en accord avec la théorie qui prévoit que le spectre FFT, S(Vi) décroît en puissance cubique en fonction de la vitesse Doppler.

Si on considère le modèle spiral du tourbillon de la turbulence de sillage, il est possible d'exprimer sa géométrie par la relation $r = ae^{b\theta} \Rightarrow \frac{dr}{d\theta} = br$ qui permet de remonter au paramètre "b" en analysant le spectre

Temps/Doppler (extraction des pentes des lignes dans le plan Temps/Doppler) :

$$\begin{cases} V(r) = \frac{\Gamma_0}{2\pi r_c} \frac{r}{r_c} \Rightarrow b = \frac{1}{2\pi} \log\left(1 + \frac{\delta_r V}{V}\right) \\ r = ae^{b\theta} \end{cases}$$

Cette formule est déduite du calcul suivant :

$$V(r) = \frac{1_0}{2\pi r_c} \frac{r}{r_c} \Rightarrow V(r) = \alpha r$$

$$r = ae^{b\theta} \Rightarrow r + \delta r = ae^{b(\theta + 2\pi)} = r \cdot e^{b2\pi} \Rightarrow \frac{r + \delta r}{r} = e^{b2\pi} \Rightarrow \frac{\delta r}{r} = e^{b2\pi} - 1$$

$$V = \alpha \cdot r \Rightarrow \frac{\delta_r V}{V} = \frac{\delta r}{r} = e^{b2\pi} - 1 \Rightarrow b = \frac{1}{2\pi} \log\left(1 + \frac{\delta_r V}{V}\right)$$

Nous donnons ci-dessous un schéma descriptif de l'algorithme global de détection, mesure de la force et caractérisation de la géométrie des turbulences de sillage (brevet THALES).



Figure 18 : Chaîne algorithmique de détection et caractérisation des "turbulences de sillage"

5. Campagnes de mesure radar

1.1 Campagne de mesures sur l'aéroport d'Orly en 2006

THALES a installé le radar bande X BOR-A550 sur l'aéroport d'Orly. Le radar était positionné sur le toit de la zone du radar Mode-S d'Orly. THALES disposait d'un PC de commande permettant de contrôler via une liaison par fibre optique le radar. Ce PC était également relié par le même lien à une caméra numérique fixée sur l'antenne du radar. THALES disposait également d'un second PC pour l'enregistrement et le dépouillement des données I& Q.



Figure 19 : Radar BOR-A550 sur le toit du site Mode-S d'Orly et les PC de commande et d'enregistrement

Pour les mesures, THALES avait demandé à la société LEOSPHERE d'amené son profileur de vent Lidar à $1.5 \mu m$ WLS7. Ce profileur de vent a mesuré le vent sur les 150 premiers mètres (cône de mesure en visée zénithale) pour corréler la vitesse de déplacement des turbulences de sillage avec la mesure vent. Le Lidar WLS7 était au sol, les deux senseurs Radar et Lidar étaient à une vingtaine de mètres l'un de l'autre.



Figure 20 : Positionnement du radar BOR-A550 de THALES et du Lidar profileur de vent WLS7

Le radar a été utilisé avec deux modes de fonctionnement :

- Antenne arrêtée avec une mesure sur 5 cases distances radar de 40 m entre 520 m et 720 m centré sur la piste de décollage
- Antenne tournante en scanning à 8°/s sur 45° avec une mesure sur 5 cases distances radar de 40 m entre 460 m et 660 m

Les essais ont été fait par temps de pluie et par temps sec. Les avions lourds, type B747, ayant un seuil de décollage plus éloigné sur la piste, seuls les avions de taille moyenne (type A320) ont été enregistrés au décollage et dans leur sillage les turbulences dont nous avons montré les spectres Doppler au chapitre 2.



Figure 21 (à gauche) mode de fonctionnement antenne arrêtée, (à droite) mode de fonctionnement antenne tournante à 8°/S du radar bande-X BORA550

Nous donnons ci-dessous les mesures du Lidar profileur de vent WLS7 de LEOSPHERE (vitesse horizontale et direction) aux altitudes de 50 m et 80 m pendant une journée entière). On peut remarquer à cette altitude une très bonne stabilité du vent sur de longues périodes.



Figure 22 : Mesure de vent horizontal à 50 et 80 m sur l'aéroport d'Orly (amplitude, direction, et écart type)

Ces mesures de vent ont corrélées avec la durée de passage d'une turbulence de sillage dans une cellule radar de 40 m dans le mode antenne arrêtée.

Nous donnons ci-dessous les détections de turbulences de sillage le long de la piste en mode scanning sur 5 cases distances radar de 40 m, par seuillage de l'entropie Doppler précédemment définie, entre deux scans de l'antenne. Le déplacement des turbulences est cohérent avec le vent de travers mesuré.



Figure 23 : détection des turbulences de sillage sur deux scans successifs en mode scanning par seuillage de l'entropie Doppler

1.2 Campagne de mesures depuis le site THALES de Limours sur les avions en approche sur l'aéroport d'Orly par l'Ouest en 2007

Le site de Limours de THALES est juste au dessous de l'interception de l'ILS et du début du cône de descente des avions sur ORLY lorsqu'ils arrivent de l'Ouest. THALES a installé en 2007 le radar BOR-A550 sur la tour de test en mode scanning vertical. Les avions passaient à l'altitude de 1500 m. Le radar scannait un secteur de 45° à 8°/s toujours avec une résolution spatiale de 40 m et une PRF de 3 KHz. Un dispositif spécial d'attache du radar au positionneur de la tour a été développé pour incliné à 90° le radar.



Figure 24 : Installation du radar BOR-A550 sur la tour de test du site THALES de Limours 1500 m au dessous de l'interception ILS et du cône de descente des avions en approche sur Orly



Figure 25 : Trajectoires des avions en approches sur Orly par rapport à la position du site de Limours et du radar BOR-A550 en visée zénithale

Nous représentons ci-dessous les mesures de l'entropie Doppler dans le sillage des avions. Lors des essais, l'atmosphère était très turbulent, mais l'on observe que le critère d'entropie est insensible à l'agitation de l'atmosphère car l'entropie mesure une « richesse des vitesses doppler » et non pas le doppler moyen. Sur ces deux mesures, on observe l'entropie des turbulences de sillage derrière l'avion et après quelques scans, on observe très bien les deux rouleurs de la turbulence de sillage dans l'un des deux qui est descendu en altitude et a été transporté par le vent de travers.



Figure 26 : Monitoring des turbulences de sillage en air clair à 1500 m d'altitude à partir de la mesure d'entropie Doppler mesurée à partir des données I&Q

1.3 Campagne de mesures sur l'aéroport de Paris-CDG en 2008

En Juin 2008, le radar BOR-A550 a été installé sur la tour située entre le terminal A et B de l'aéroport de Paris CDG. Le radar était co-localisé avec le Lidar 2 μ m WINDTRACER installé par EUROCONTROI. Le radar a été utilisé avec différents modes de fonctionnement : scanning horizontal, scanning vertical et antenne arrêtée. Le Scanning vertical était perpendiculaire aux deux pistes du doublet sud (1 piste d'atterrissage et 1 de décollage parallèles). En scanning vertical, le plan d'analyse était identique à celui du Lidar avec pour objectif de comparer les performances des deux senseurs. La première piste était à 700 mètres du radar et la seconde à 1100 mètres. La résolution distance du radar était comme pour les campagnes précédente réglée à 40 m et l'échantillonnage Doppler à 3KHz (+/- 26m/s). La puissance crête d'émission était de 75 W.



Figure 27 : Positionnement du Radar BOR-A550 sur l'aéroport de Paris-CDG, co-localisé au Lidar Windtracer

Nous illustrons ci-dessous les mesures Doppler et les détections de turbulences de sillage sur les deux pistes avec un mode antenne arrêtée et un axe de visée perpendiculaire aux pistes. Dans cette configuration, les avions sont au décollage sur la piste la plus proche et à l'atterrissage sur la piste la plus éloignée. On observe très bien les turbulences de sillage via l'entropie Doppler sur la première piste : les avions au décollage ne sont pas détectés car ils sont déjà au dessus du faisceau radar, mais on observe les turbulences de sillage qui redescendent dans le lobe d'antenne et qui s'éloignent du radar en étant transportées par le vent de travers. Sur la piste la plus éloignée , les avions à l'atterrissage qui sont déjà au roulage sont détectés : ayant déjà touchés le sol, sans portance l'avion ne génère plus de turbulences de sillage, et on ne détecte que des traces des turbulences générées juste avant le touché au sol. On illustre également la mesure de la circulation, en faisant un zoom sur les spectres Doppler des cases correspondantes. On détecte également sur les spectres des phénomènes transitoires qui correspondent au touché et rebond des turbulences sur le sol.



Figure 28 : (à gauche) mesure de l'entropie Doppler suivant les axes distances et temps avec le positionnement des 2 pistes 26R et 26L, (à droite) mesure de la circulation des turbulences de sillage préalablement détectées par le seuillage de l'entropie et spectres Doppler associés

Nous pouvons suivre sur les spectres Doppler/Temps de chaque cellule radar en distance, le déplacement et le transport des turbulences de sillage au cours du temps. En zoomant sur les spectres Doppler, on retrouve les signatures Doppler/Temps caractéristiques des turbulences de sillage et de leur géométrie en spirale, précédemment décrites au chapitre 2.



Figure 29 : (à gauche) Suivi sur le spectre Doppler/Temps de chaque cellule du transport des turbulences de sillage avec le vent de travers et l'évolution des vitesses dans les rouleaux, (à droite)

Lors de l'interaction des turbulences de sillage avec le sol, on peut observer le phénomène de rebond, qui génère des variations rapides du spectre à faible vitesse Doppler comme illustré sur l'image Doppler/Temps de 6 cases distance de 40 m contiguës.



Figure 30 : Représentation Doppler/Temps des mesures de turbulences de sillage proche du sol avec apparition du phénomène de rebond (6 cases distances de 40 m)

Nous donnons maintenant les résultats en mode antenne tournante : scanning horizontal ou scanning vertical à la vitesse de 8°/s.

Dans la figure ci-dessous (à gauche), nous montrons la mesure de turbulence de sillage en scanning horizontal, pour laquelle on observe sur la seconde piste les traces des deux rouleaux du sillage laissé le long de la piste. Sur la même figure (à droite), on observe sur la première image (du haut) ddeux rouleaux, l'un d'eux touche le sol au second scan sur la piste la plus proche et l'autre se transporte de 200 m en 3 scans sous l'action du vent de travers. Les mesures de forte intensité proches du sol correspondent à des phénomènes de convection induit par un gradient très élevé de température (le temps était caniculaire lors de ces essais).



Figure 31 : (à gauche) mesure de l'élongation des turbulences de sillage en mode scanning horizontal, (à droite) suivi de rouleaux de turbulences de sillage en mode scanning vertical

Dans l'image ci-dessous de mesures en mode scanning vertical, on observe une entropie Doppler très forte de deux rouleaux laissés par un avion au décollage sur la première piste la plus proche, et la mesure de deux rouleaux de moindre intensité laissés par un avion à l'atterrissage au dessus de la seconde piste la plus éloignée.



Figure 32 : Entropie Doppler mesurée faisant apparaître deux rouleaux sur la première piste d'un avion au décollage, deux rouleaux au dessus de la seconde piste d'un avion à l'atterrissage (les rectangles rouges foncés sur le sol indiquent la position des pistes)

Ci-dessous, nous faisons un zoom sur l'entropie Doppler sur un cas semblable avec (à gauche) l'évolution de rouleaux d'avion au décollage sur la première piste et (à droite) l'évolution de rouleaux d'avion à l'atterrissage sur la seconde piste, pendant 4 scans successifs (renouvellement de l'information toutes les 5 secondes). On observe sur la première piste, l'écartement des deux rouleaux et sur la seconde piste le phénomène de rebond.



Figure 33 : (à gauche) écartement de rouleaux d'avion au décollage sur la première piste, (à droite) rebond de rouleaux d'avion à l'atterrissage sur la seconde piste, pendant 4 scans successifs de 5 secondes

Pour illustrer plus nettement le phénomène d'écartement des rouleaux proches du sol lors du décollage, nous donnons une séquence plus longue de mesures d'entropie Doppler et une représentation 3D du plan de mesure sur l'aéroport de Paris-CDG. Sur l'image de gauche, les tracés en mauve représentent les trajectoires au décollage, et les tracés en bleu les trajectoires à l'atterrissage. Nous avons superposé la mesure radar d'entropie doppler, qui fait apparaître les deux rouleaux laissés par l'avion proche du sol au décollage. Sur l'image de droite, nous voyons une séquence de 45 secondes (9 scans séparés de 5 secondes), qui illustre très nettement l'écartement des rouleaux proches du sol qui s'écartent au cours du temps après le passage de l'avion dans le faisceau de l'antenne.



Figure 34 : (à gauche) position du plan de mesure radar et sa mesure d'entropie doppler avec les deux rouleaux laissés par un avion au décollage sur la première piste, (à droite) séquence de 45 secondes (9 scans séparés de 5 secondes), avec l'écartement des rouleaux proches du sol qui s'écartent au cours du temps

Pour le benchmark des performances du radar par rapport au Lidar, les données ont été exploitées et transmises à Eurocontrol pour comparaison avec les mesures du Windtracer. Pour ce faire, THALES a constitué des fichiers avec la position des rouleaux au cours du temps par rapport aux pistes et la force/la circulation (en m²/s) des turbulences de sillage.

Nous illustrons sur l'image ci-dessous l'exploitation d'un fichier sur une durée de mesure de 35 s. Dans la colonne de gauche, on représente en haut la position des deux rouleaux au cours du temps, et en dessous la circulation également pour chacun des rouleaux. Le cas de la colonne de gauche correspond à un vent de travers soutenu. On observe très bien le transport des deux rouleaux et la décroissance de la circulation. Sur la colonne de droite, on représente les mêmes informations, mais en absence de vent de travers. Dans ce cas, on observe l'écartement des deux rouleaux au cours du temps et une décroissance très faible de la turbulence



Figure 35 : (colonne de gauche) évolution de la position et de la circulation des deux rouleaux avec du vent de travers, (colonne de droite) même type d'évolution mais sans vent de travers

Pour donner un comportement statistique du transport des turbulences de sillage en fonction de la météo et du vent, THALES a exploité une série de données et calculé l'histogramme de la position des turbulences mesurées par rapport à la position de la seconde piste pour les avions à l'atterrissage. On observe qu'en fonction de la puissance du vent de travers, l'histogramme est plus ou moins étalé (vent de niveau 1 : histogramme très resserré, les rouleaux migrent de 100 à 150 m; vent de niveau 2, on observe des migrations de plus de 600 m ; vent de niveau 3, on observe des occurrences très nombreuses de migrations supérieures à 500 m et au delà de 800 m).



Figure 36 : histogramme de la positions des turbulences de sillage en fonction du vent (niveau 1, 2, 3)

6. Autres travaux dans le monde

A la suite des campagnes de mesures de THALES de 2006 à 2007, d'autres pays ont lancés des campagnes de mesures similaires. Ainsi, aux Etats-Unis, Lockheed-Martin qui développe déjà le lidar windtracer, a effectué des campagnes de benchmark entre le lidar et un radar bande X Raptech 200I. Ces premières campagnes concernent la mesure de vent en air clair, mais l'objectif est également de mesurer les turbulences de sillage avec l'usage conjoint des deux technologies. Nous donnons ci-dessous l'illustration des premières campagnes de mesures Radar bande-X / Lidar pour la mesure de vent en air clair.



Figure 37 : Campagnes de mesures aux États-Unis pour la mesure conjointe Radar bande X et Lidar

En chine, des campagnes de mesures avec un Radar en bande X ont été conduites par le College of Electronic Science and Engineering du NUDT (National University of Defense Technology, Changsha, Hunan). En Octobre 2008, le NDUT a deployé un radar météo Doppler en bande X sur véhicule, en mode antenne arrêtée et en mode scanning pour le monitoring de turbulences de sillage à Nanjing, à peu près à 30 kilomètres de l'aéroport International de Lukou. Ce laboratoire a également développé un modèle de SER radar des turbulences de sillage en mixant les modèles de mécanique des fluides et les modèles de mesures électromagnétiques.

Sur l'image ci-dessous, nous voyons les premiers résultats de mesures avec les mesures faites sur les turbulences de sillage d'un avion à 10,39 Km du radar et la trace du sillage dont on mesure la vitesse de descente autour de 1.5 m/s. Les spectres Doppler/Temps montrent à 1.4 Km, les mêmes signatures que celles obtenues lors de la campagne radar de THALES. On observe toujours ces lignes Doppler/Temps représentatives de la géométrie spirale des rouleaux. Nous comparons sur cette image en bas (à gauche) la SER estimée en fonction de la fréquence par le NUDT en dB²/m³ et (à droite) les courbes obtenues par les modèles développés aux États-Unis.



Figure 38 : Campagne chinoise du NUDT de mesure radar en bande X, (en haut) les mesures Doppler/Temps des turbulences de sillage, (en bas à droite) SER estimée des turbulences de sillage en fonction de la fréquence par le NUDT en dB2/m3 et (en bas à droite) les courbes obtenues par les modèles développés aux États-Unis

7. Utilisation opérationnelle : les systèmes d'alerte sur aéroport

De nombreux pays étudient le couplage de senseurs de monitoring des turbulences de sillage par tout temps avec des modèles de prédiction d'évolution de la dynamique de ces phénomènes sur la base de modélisations en mécanique des fluides sur la base des seules informations relatives aux caractéristiques de l'avion (poids, vitesse, envergure) et à la mesure du vent de travers. Nous illustrons ci-dessous deux systèmes étudiés respectivement en Russie (à gauche) et aux États-Unis (à droite). Ces systèmes sont principalement basés sur des senseurs Lidar, qui ont comme inconvénient majeur de ne pas être opérationnel par temps de pluie. Or, les spécifications établies dans les programmes NEXTGEN et SESAR précisent que ces systèmes doivent fonctionner par temps, ce qui pousse à utiliser de façon alternative le radar en bande X, couplé à du Lidar par temps sec. Ces deux senseurs peuvent également être complémentaires pour la mesure de vent en air clair.



Figure 39 : Systèmes de gestion des risques de turbulences de sillage étudiés en Russie (à gauche) et aux États-Unis (à droite)

Dans le cadre du programme européen SESAR, THALES propose d'étudier un système de gestion des risques liés aux turbulences de sillage, en couplant :

- Des modèles de prédiction météo
- Des mesures temps-réel du vent par des senseurs locaux incluant des radars bande-X, des profileurs de vent Lidar et UHF et des anémomètres sur mâts.
- Des modèles de prédiction d'évolution des turbulences de sillage en fonction du vent et des caractéristiques de l'avion
- Des senseurs de monitoring des turbulences de sillage Radar et Lidar (Radar bande X et Lidar 1.5 μ m)

Les senseurs de monitoring de turbulences de sillage doivent être utilisés dans les zones à risques, c'est à dire :

- À l'interception ILS, à l'entrée du cône de descente (à l'atterrissage)
- Dans le cône de départ (au décollage)
- Proche des pistes (au décollage et à l'atterrissage)

Nous illustrons ci-dessous l'approche envisagée pour le cas de l'approche. Le système peut-être coopératif et peut transmettre des alertes « turbulence de sillage » au pilote. Inversement, l'avion peut transmettre des informations vent au sol. De façon générale, le déploiement de ces systèmes dépend beaucoup, de la configuration des pistes et des procédures opérationnelles mises en place par les contrôleurs, et doit être reconfigurable en fonction de ces contraintes.



Figure 40 : Exemple de déploiement de senseurs radar bande X pour le monitoring des turbulences de sillage à l'atterrissage.

8. Conclusions

Les campagnes de mesures Radar bande X de THALES en 2006, 2007 et 2008 sur les aéroports d'Orly et de Paris-CDG ont permis de monter que :

- La surface équivalente Radar des turbulences de sillage se situait entre 0.01 m² (pour les avions de la classe « moyen » type A320) et 0.1 m2 (pour les avions de la classe « gros » type B747)
- Le radar en bande X de la classe 75 W crête était susceptible de détecter ces turbulences par tout temps (temps humide et temps sec) jusqu'à une distance de 2 km, grâce à la mesure d'entropie Doppler

- La signature Doppler radar était capable de caractériser la force des turbulences de sillage en terme de circulation (exprimée en m²/s).
- La signature Doppler/Temps radar pouvait caractériser l'âge (et donc la durée prévisible de décroissance du phénomène) et la géométrie spirale (et tube suivant l'âge) de ces turbulences de sillage.

Ces performances pourront être améliorées en utilisant un radar bande X avec :

- des formes d'onde Doppler optimisées
- un dimensionnement du faisceau radar optimisé
- une résolution distance optimisée
- l'utilisation du balayage électronique deux plans pour optimiser la durée et la cadence d'observation

L'utilisation du balayage électronique [43] permettra également de disposer de capacité multi-mission :

- monitoring des dangers aérologiques : turbulences de sillages et cisaillements de vent
- mesure du vent sur la zone de l'aéroport
- localisation des aéronefs en zone terminale pour les approches et les départs

Évidemment, la gestion des risques liés aux turbulences de sillage passera aussi par une modification des procédures pour les approches et les départs. Comme l'illustre la photo ci-dessous, les oiseaux migrateurs, avant l'homme, ont résolus le vol rapproché en V, imité par la patrouille de France. Personne n'a jamais vu un oiseau en suivre un autre, alors que c'est ce que préconise le transport aérien depuis 50 ans. Aux États-Unis, avec cette même idée, la FAA travaille à des procédures d'approche sur pistes parallèles proches en décalant des descentes d'avion synchronisées et décalées de 1.5 Nm en diagonale avec une ségrégation du type d'avion par rapport au vent de travers (le plus petit porteur arrivant sur la piste exposé au vent).



Figure 41 : Quand l'homme imite la nature pour éviter les turbulences de sillage

9. remerciements

THALES tient à remercier pour leur aide logistique et la facilitation des campagnes de mesures :

- l'équipe radar d'ADP (Aéroport de Paris) à Orly : Jean-Paul Lecorre, Jean-Marc Receveau, Daniel Duong et Gilbert Herbulot
- la DSNA : André Simonetti, Alfred Harter et Jean Jezequel
- la direction des aires aéronautiques d'ADP à l'aéroport Paris-CDG : Gérard Batistella et Guillaume Auquier
- L'équipe « wake vortex » du centre de recherche d'Eurocontrol à Bretigny : Andrew Harvey, Antoine Vidal, Vincent Treve et Jean-Pierre Nicolaon

Nous tenons également à remercier la commission européenne, qui finance maintenant depuis plusieurs années de nombreuses études dans le domaine des « wake vortex », ainsi que tout le réseau d'experts européens fédérés autour du réseau Wakenet3-Europe, piloté par Andreas Reinke d'Airbus. Journées scientifiques 'PROPAGATION ET TÉLÉDÉTECTION'



Figure 42 : communauté internationale WAKENET (Europe, États-Unis, Russie, Japon, chine,...) rassemblée les 8 et 9 Janvier 2009 au Workshop « Wake Turbulence Safety in Future Aircraft Operations » à Thales Université à Jouy-en-Josas

Références bibliographiques

- 1- Jean-Yves Chemin , « Jean Leray et les fondements mathématiques de la turbulence », Société Mathématique de France, coll. *Un texte un mathématicien*, 14 février 2007
- 2- Jean-Yves Chemin , « Le système de Navier-Stokes incompressible, soixante dix-ans après Jean Leray » , Séminaires et Congrès, n°9, p. 99–123, Société Mathématique de France, 2004
- 3- Yves Meyer, « Jean Leray et la recherche de la vérité », Journées anniversaire Jean Leray, Nantes
- 4- F. Barbaresco & U. Meier," Wake Vortex Data Collection using X-band Radar", CEAS'07, Berlin, Sept. 2007
- 5- F. Barbaresco & U. Meier," Wake Vortex Detection & Monitoring by X-band Radar", Radar Conference, Edinburgh, Oct. 2007
- 6- F. Barbaresco & U. Meier, "The ATC-Wake Predictor system", JISSA Conference, June 2005, Paris, France.
- 7- W.L. Rubin, "RASS Detection of Aircraft Wake Vortices", Jour. of AOT., Vol.17, n°8, pp.1058–1065, Aug. 2000
- 8- William L. Rubin, "Radar–Acoustic Detection of Aircraft Wake Vortices", Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, Volume 17, Issue 8, pp. 1058–1065, August 2000
- 9- K. Shariff, "Analysis of the Radar Reflectivity of Aircraft Vortex Wakes", J. Fluid Mech., vol. 463, pp. 121-161, 2002
- 10- F. Barbaresco & al "Wake Vortex Monitoring & Profiling by Doppler X-band Radar in all weather conditions", 6th Eurocontrol Innovation Workshop, France, December 2007
- 11- F. Barbaresco & U. Meier, "Wake Vortex Profiling by Doppler X-Band Radar : Orly Trials at Initial Take-off & ILS Interception Critical Areas", IEEE Int. Radar Conf., RadarCon'08, Rome, May 2008
- 12- F. Barbaresco,& U. Meier, "Study of wake vortex roll up spiral geometry based on Radar Trials", Int. Workshop on Fundamental Issues Related to Aircraft Trailing Wakes, Marseille, May 2008

- 13- F. Barbaresco & U. Meier "Wake vortex X-band radar monitoring: Paris-CDG airport 2008 campaign results & perspectives", Wakenet3-Europe Workshop on "Wake Turbulence Safety in Future Aircraft Operations", Thales University, Jouy-en-Josas, Janvier 2009
- 14- F. Barbaresco & U. Meier, "Wake Vortex X-band Radar Monitoring : Paris-CDG airport 2008 Campaign Results & Prospectives", soumis à Radar'09, Bordeaux, Octobre 2009
- 15- L.J.P. Speijker, F. Barbaresco, M. Frech, A. Vidal, G. Winckelmans & H. Barny, "ATC-Wake : Integrated Wake Vortex Safety & Capacity System", Journal of Air Traffic Control, Volume 49, No 1, pp.17-32, April 2007
- 16- G. Winckelmans, F. Barbaresco & al. "The ATC-Wake Predictor system and its potential use to increase the capacity at airports", JISSA Conf., 20 21 June 2005, Paris, France.
- 17- F. Barbaresco & al., "ATC-WAKE System Design and Evaluation", Technical report D2_12, European ATC-WAKE Study, IST-2001-34729, http://www.nlr.nl/eCache/DEF/502.html
- 18- L.Spiejker, F. Barbaresco & al., "ATC-WAKE : Integrated Wake Vortex Safety and Capacity System", Technical report D6_2, European ATC-WAKE Study, IST-2001-34729, http://www.nlr.nl/eCache/DEF/502.html
- 19- "Detection and Analysis of hazardous meteorological phenomena : Windshear & microbursts (Study for US FAA)", Revue Technique Thomson-CSF, vol.25, n°3, Sept. 1993
- 20- William L. Rubin, "Detection and Strength Measurement of Wake Vortices at JFK using Rass", Final Report, WLR Research Inc., Whitestone, NY. FAA Contract DTFAO1-92C-00061
- 21- S.A. COHN, "Radar Measurements of Turbulent Eddy Dissipation rate in the Troposphere: A comparison of Techniques", American Meteorological Society, 1995
- 22- W. K. Hocking, "Measurement of Turbulent Eddy Dissipation Rates in the middle atmosphere by Radar Techniques: A Review", Radio Science, n° 20, pp. 1403-1422, 1985
- 23- E.E. Gossard & R.G. Strauch, "Radar Observations of Clear Air and Clouds", Elsevier, 1983
- 24- A.S. Frisch a R.G. strauch, "Doppler Radar Measurements of Turbulent Kinetic Energy dissipation rates in a northeastern Colorado Convective Storm", J. Appl. Meteor., nº 15, pp.1012-1017, 1976
- 25- P.J. Morris, D.K. McLaughlin & T.B. Gabrielson, "The Development of a Plan for the Assessment, Improvement and Deployment of a Radar Acoustic Sounding System (RASS) for Wake Vortex Detection (Final Report)", NASA Grant NAG1-03084, NASA Langley Research Center, September 2004
- 26- Boluriaan S. and Morris P.J., "Two-Dimensional Simulations of Wake Vortex Detection using RASS", AIAA Journal, vol. 40, n°11, pp.224-2256, 2002
- 27- Rubin W.L., Burnham D.C, Spitzer E.A. and Rudis R.P., "Robust Low Cost Airport wake Vortex Sensor", Journal of Aircraft, vol. 37, n°3, pp.377-382, 2000
- 28- Burnham D.C. "Review of Wake Vortex Sensor Development since 1970", Proceedings of the Aircraft Wake Vortices Conference, Report N° FAA-RD-77-68, June 1977
- 29- Tatarski V.I., "Wave Propagation in a Turbulent Medium", McGraw-Hill, 1661
- 30- ChadwickK & al., "Radar cross section measurements of a wingtip vortices", Proc. ESA IGARSS, vol.1, pp.479-483, 1984
- 31- Gilson W.H., "Radar measurements of aircraft wakes", Project Rep. AAW-11, Lincoln Lab, MIT, Lexington, Mass, 1992
- 32- Gilson W.H., "Aircraft RCS measurement", In NASA Contractor Rep. 10139, Part 2, pp.603-623, 1994

- 33- Iannuzelli & al., "Aircraft wake detection using bistatic radar: analysis of experimental results", John Hopkins Appl. Phys. Lab. Tech. Digest, n°19, pp. 299-314, 1998
- 34- R.E. Marshall & T.J. Myers, "Wingtip generated wake vortices as radar targets", IEEE AES Systems Magazine, pp.27-30, 1996
- 35- Nespor & al, "Doppler radar detection of vortex hazard indicators", in NASA Conf. Proc. CP-10139, Part2 , pp. 651-688, 1994
- 36- Otterstein H. , "Atmospheric structure and radar backscattering in clear air", Radio Science, n°4, pp.1179-1193, 1969
- 37- F. Holzälpfel & al., "Analysis of wake vortex decay mechanisms in the atmosphere", Aerospace Science & Technology, n°7, pp.263-275, 2003
- 38- D.J. Shephard, A.P. Kyte & P.D.F. Tait, "Radar measurement of the Wake Vortex of a H.S. 748 and a B.A.C. One-Eleven", Preliminary trials Report, GEC-Marconi Research Center, MTR-92/55A, 1992
- 39- T. Tani & F. Bertin, "Restitution en temps réel du champ de vitesses créé par des vortex d'avions", Convention d'étude CNRS/CRPE & STNA, 1992
- 40- G. Rat & F. Bertin, "Etude théorique de la détection des vortex générés dans le sillage des avions à l'aide d'un radar", CNRS/CRPE, 1992
- 41- F. Barbaresco, "Innovative Tools for Radar Signal Processing Based on Cartan's Geometry of SPD Matrices and Information Geometry", IEEE International Radar Conference, Rome, May 2008
- 42- F. Barbaresco, "Interactions between Symmetric Cone and Information Geometries : Bruhat-Tits and Siegel Spaces Models for High Resolution Autoregressive Doppler Imagery", ETCV'08 Conf., Ecole Polytechnique, Nov. 2008, published by Springer, in Lecture Notes in Computer Science, vol.5416, February 2009
- 43- F. Barbaresco, "Senseur multi-usage autonome, agile et cognitif : les radars multi-mission de nouvelle génération", Gestion de la complexité et de l'information dans les grands systèmes critiques, éditions SEE-CNRS, Janvier 2009