

La Turbulence de sillage

Note d'information technique



Direction
générale de
l'Aviation civile

Service
technique de
l'Aviation civile

Avril 2016

La Turbulence de sillage

Note d'information technique

Service technique de l'aviation civile
Département Aménagement, Capacité, Environnement



Résumé

Tous les aéronefs en vol génèrent de la turbulence de sillage qui prend essentiellement la forme de deux tourbillons. Le risque pour l'aéronef qui traverse la turbulence de sillage de l'aéronef qui le précède, est d'autant plus important que l'aéronef qui génère la turbulence de sillage est grand (l'intensité de la turbulence est alors très élevée) et l'aéronef qui la rencontre est petit, avec une faible contrôlabilité en roulis notamment.

Pour minimiser les rencontres dangereuses, des règles d'espacement entre aéronefs sont définies. Aujourd'hui, au niveau international comme au niveau national, les aéronefs sont classifiés dans des catégories en fonction de leur masse et des minima de séparation sont définis entre les différentes catégories d'aéronefs. Certains aéroports, contraints en termes de capacité, mettent en œuvre des séparations réduites, fondées sur une classification d'aéronefs différente. En Europe, c'est le projet porté par Eurocontrol, RECAT-EU, et validé par l'agence européenne de la sécurité de l'aviation civile à l'automne 2014, qui fait référence.

Les rencontres avec de la turbulence de sillage doivent faire, selon la réglementation européenne, l'objet d'une notification d'événements auprès de l'autorité de surveillance. Ces événements font alors l'objet d'un suivi et les incidents les plus notables ou les événements récurrents font l'objet d'analyses approfondies afin de faire évoluer au besoin la réglementation.

Mots-clés

Turbulence de sillage, tourbillon, circulation, sévérité, coefficient de moment de roulis, séparation, classification d'aéronefs, notification d'événements, RECAT-EU.

Summary

Aircraft in flight generate wake turbulence which essentially takes the form of two wake vortices. The risk for aircraft flying through the wake turbulence of preceding aircraft is even more important than the generating aircraft is big - the intensity of the wake turbulence is then very high - and the encountering aircraft is small, with a low roll controllability.

To minimize dangerous encounters, minimum separation between aircraft is defined. Today, internationally and nationally, aircraft are classified in categories according to their mass and separations are defined between the different aircraft categories. Some airports, constrained in terms of capacity, implement reduced separations based on a different aircraft classification. In Europe, the project led by Eurocontrol - RECAT-EU - and validated by the European aviation safety agency in the fall of 2014, is the reference.

The wake turbulence encounters shall be reported, according to European regulations. These occurrences are then monitored and the most notable incidents or recurring events are subject to further analysis in order to amend regulations, if necessary.

Keywords

Wake turbulence, vortex, circulation, severity, rolling moment coefficient, separation, aircraft categories, wake turbulence encounter report, RECAT-EU.

Sommaire

Résumé	3
1. Description du phénomène	8
1.1. Formation	8
1.1.1. Origine aérodynamique	8
1.1.2. Enroulement de la nappe tourbillonnaire	9
1.1.3. Modélisation d'un tourbillon	10
1.1.4. Conditions initiales	11
1.2. Évolutions spatiale et temporelle	13
1.2.1. Évolution naturelle	13
1.2.2. Conditions atmosphériques	14
1.2.3. Effet de sol	15
1.2.4. Vent atmosphérique	16
1.3. Cas de la turbulence générée par un hélicoptère	17
1.3.1. Formation	17
1.3.2. Effet de sol	19
1.3.3. Différences avec un avion	19
2. Effets sur les aéronefs	20
2.1. Effets sur les avions	20
2.2. Effets sur les hélicoptères	21
3. Séparations entre les aéronefs	23
3.1. Les dispositions françaises et OACI	24
3.1.1. Les catégories d'avions	24
3.1.2. Séparations pour la circulation aérienne d'aérodrome	24
3.2. Le projet RECAT-EU	27
3.2.1. De nouvelles catégories d'avions	27
3.2.2. Principes de sécurité	29
3.2.3. Modification des minima de séparation	29

3.3. Séparations avec un hélicoptère	33
3.3.1. Un aéronef particulier	33
3.3.2. Séparation vis-à-vis d'un hélicoptère en stationnaire	34
4. Notification d'incidents	35
4.1. L'obligation de notification pour l'aviation civile	35
4.2. Le type de notifications	36
4.3. L'utilité de la notification	36
4.4. Classement du risque associé	37
4.5. Quelques tendances	38
4.6. Notifications des évènements	
« Turbulence de sillage » générée par un hélicoptère	39
Bibliographie	40
Glossaire	42

Le 10 octobre 2014, l'Agence Européenne de la Sécurité de l'Aviation Civile (AESA) formalisait son accord pour la mise en œuvre de nouvelles catégories d'aéronefs et de réductions des minima de séparation dues à la turbulence de sillage (RECAT-EU) dans ses états membres.

Faisant écho à ce sujet d'actualité internationale, cette note expose un état des lieux synthétique sur la compréhension du phénomène physique de la turbulence de sillage, les risques associés, les moyens de prévention de ces risques notamment par la mise en œuvre de minima de séparation entre aéronefs ainsi que sur l'intérêt et la nécessité de notifier les événements de rencontre avec une turbulence de sillage.

Historique

La turbulence de sillage, indissociable d'un aéronef en vol, est d'une manière générale d'autant plus problématique que l'aéronef qui la génère est grand et l'aéronef qui la subit est petit. Ainsi, la relative homogénéité des types avion et la faible densité du trafic des années 1960 imposaient peu de contraintes du fait de la turbulence de sillage. L'introduction de très gros porteurs tels que le Boeing B747 dans les années 1970 ou l'Airbus A380 dans les années 2000, ainsi que la hausse sensible du trafic aérien, ont conduit à définir de nouvelles procédures en particulier des règles d'espacement afin de maintenir le risque dû à la turbulence de sillage à un niveau de sécurité acceptable. Les premières règles d'espacement, toujours appliquées aujourd'hui, ont été adoptées par l'Organisation Internationale de l'Aviation Civile (OACI) en 1976. Les connaissances actuelles sur le phénomène de turbulence de sillage et les méthodes de caractérisation du risque associé, théoriques comme empiriques, ainsi que les nouvelles technologies permettent de proposer une révision de ces dispositions, à l'instar des propositions de re-catégorisation des avions et de réductions des minima de séparation (RECAT).

Vocabulaire

L'OACI [OACI, Doc 9426] utilise le terme **turbulence de sillage** (*Wake Turbulence*) pour désigner « l'effet des masses d'air tournantes engendrées derrière les extrémités d'aile des aéronefs », préférentiellement au terme **tourbillon de sillage** (*Wake Vortex*) qui désigne davantage la nature de ces masses d'air.

La turbulence de sillage est essentiellement constituée de deux tourbillons, tournant de façon organisée, en sens inverse l'un de l'autre et évoluant derrière l'avion qui les génère, dit le **générateur** (*leader*). L'aéronef qui pénétrerait dans la turbulence de sillage et en subirait les effets est nommé le **suiveur** (*follower*).

Le **risque** (*Wake Turbulence Risk*) est quant à lui défini pour une paire d'aéronefs générateur/suiveur. En cas de **rencontre** avec une turbulence de sillage (*Wake Turbulence Encounter*), le pilote de l'aéronef suiveur est invité à remplir a posteriori un **formulaire de notification d'évènement** (*Wake Turbulence Report*) décrivant la situation pour permettre d'évaluer la **sévérité** (*severity*) de la rencontre afin que des mesures de réduction du risque puissent être définies en tant que de besoin.

La turbulence de sillage est un phénomène différent du **souffle moteur** (*jet blast/prop wash*), même si les deux phénomènes sont combinés au voisinage de l'avion.

Pour les hélicoptères, usuellement le terme « turbulence de sillage » est utilisé pour caractériser l'ensemble des déplacements d'air induits lorsque l'hélicoptère évolue à vitesse élevée (au-delà de 40 nœuds). Le terme « **souffle rotor** » (*rotor downwash*) renvoie aux déplacements d'air induits lorsque l'hélicoptère évolue à faible vitesse (jusqu'à environ 20 nœuds).

1. Description du phénomène

Le chapitre 3 de la section 5 du Doc. 9426-AN/924 [OACI, Doc 9426], deuxième partie, décrit sommairement l'origine physique de la turbulence de sillage ainsi que les paramètres qui l'influencent. Les paragraphes ci-dessous proposent un descriptif plus complet du phénomène.



1.1. Formation

1.1.1. Origine aérodynamique

La portance de l'avion, qui lui permet de compenser son poids et donc de voler, est produite par une différence de pression entre l'air circulant sur l'extrados de la voilure, zone de dépression, et l'air circulant sur l'intrados, zone de surpression. Cette différence de pressions s'explique par la plus grande vitesse de l'écoulement d'air sur l'extrados, liée à la géométrie du profil de l'aile et à son incidence.

La somme des vitesses selon le contour de l'aile, appelée **circulation**¹, diffère selon la distance à l'emplanture de l'aile. Cette répartition non uniforme est ainsi à l'origine de deux phénomènes :

- ▶ la formation d'un petit tourbillon à l'extrémité de l'aile, appelé **tourbillon marginal**;
- ▶ la formation d'une multitude de petits **tourbillons corotatifs** en aval du bord de fuite de l'aile; le sens de rotation des tourbillons est horaire pour la demi-aile gauche, antihoraire pour la demi-aile droite (avion vu de l'arrière).

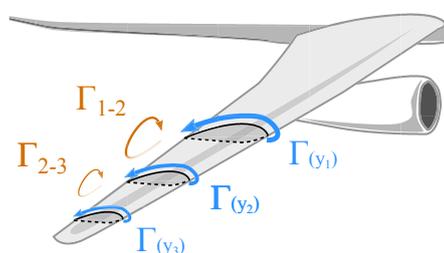


Figure 1: Création de petits tourbillons en aval du bord de fuite de l'aile.

¹ Mathématiquement, la circulation d'un écoulement sur un contour fermé (par exemple le profil d'aile), notée Γ et exprimée en m^2/s , correspond à l'intégrale sur le contour de la vitesse tangentielle V de l'écoulement le long de ce contour L , $\Gamma = \int_L V dl$

1.1.2. Enroulement de la nappe tourbillonnaire

Le décollement de la couche limite, zone d'interface entre la surface de l'aile et l'air environnant, au niveau des extrémités de l'aile (extrémités de chaque demi-aile) amorce l'**enroulement** de la nappe tourbillonnaire. Ce tourbillon marginal entraîne alors dans sa rotation le tourbillon corotatif voisin, ils s'apparient pour ne former plus qu'un tourbillon, plus important, qui va à son tour entraîner le petit tourbillon corotatif voisin. De proche en proche, en direction de l'emplanture, l'ensemble des tourbillons de la demi-nappe fusionnent et s'enroulent pour ne former qu'un unique tourbillon.

En aval de l'avion générateur :

- ▶ pour les avions de ligne l'enroulement de la nappe tourbillonnaire s'effectue sur une distance de l'ordre d'une dizaine de fois l'envergure;
- ▶ la nappe tourbillonnaire s'est enroulée en **deux tourbillons contrarotatifs**, d'égales intensités, descendants: les tourbillons de sillage.



Enroulement de la nappe tourbillonnaire et formation des tourbillons de sillage, visualisation du sillage d'un PZL-106 lors de l'épandage.

⚠ Ne pas confondre avec le souffle des moteurs !

La localisation du risque est différente. Pour le souffle moteur, le risque est localisé sur l'aire de mouvement pour les avions circulant au sol.

Souffle d'un bi-turboréacteur lors de sa mise en mouvement sur l'aire de trafic.



1.1.3. Modélisation d'un tourbillon

Un tourbillon se caractérise par un champ de vitesses v_θ tangentielles à l'axe de rotation du tourbillon. Cette vitesse varie selon la distance au centre du tourbillon.

Plusieurs modèles analytiques existent pour décrire un tourbillon issu d'un enroulement de nappe tourbillonnaire, mais deux grandes familles se distinguent : l'une regroupant des modèles définis par une seule échelle de longueur caractéristique comme celui de Lamb-Oseen ou encore de Burnham-Hallock, l'autre des modèles basés sur deux échelles de longueur caractéristique comme ceux de Fabre et Jacquin ou Proctor-Winckelmans.

À titre d'exemple, le modèle de Burnham-Hallock [Burnham, 1982] définit la vitesse tangentielle d'une section du tourbillon (modèle à un seul tourbillon) comme suit :

$$v_\theta(r) = \frac{\Gamma_{\text{tot}}}{2\pi r} \cdot \frac{r^2}{r^2 + r_c^2}$$

où

- ▶ r est la distance à l'axe de rotation du tourbillon,
- ▶ r_c est la longueur caractéristique, appelée **rayon visqueux** (*core radius*), définie par la distance à l'axe de rotation du tourbillon à laquelle la vitesse tangentielle est maximale. Communément, sa valeur est déterminée par la relation $r_c = 0,05b_0$, b_0 étant la distance d'espacement initial des tourbillons, Γ_{tot} est la **circulation totale** du tourbillon, c'est-à-dire la circulation pour un rayon infini.

En réalité, un tourbillon de sillage a un rayon proche de la demi-envergure de l'avion et le tourbillon de rayon r_c concentre 50 % de la circulation totale du tourbillon [Donaldson, 1975].

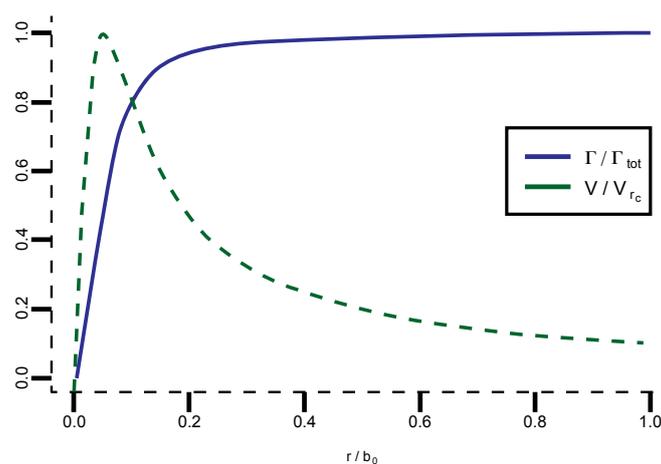


Figure 2: Répartition de la circulation et de la vitesse tangentielle au sein d'un tourbillon (modèle Burnham-Hallock).

↳ La circulation, Γ , caractérise l'intensité du tourbillon. Ainsi, la circulation est une métrique courante pour caractériser la turbulence de sillage générée par un avion.

↳ La circulation des tourbillons de sillage peut se déduire d'une connaissance du champ des vitesses. C'est ce dernier qui est évalué lors des campagnes de mesures par Lidar (*Light Detection and Ranging*) sur les aéroports. Sur le même principe que le radar qui utilise des ondes radioélectriques, le Lidar utilise des ondes électromagnétiques (lumière) pour repérer des objets qui peuvent être aussi petits que des particules ou des molécules. La position des centres des tourbillons ainsi que leurs trajectoires sont également mesurables.

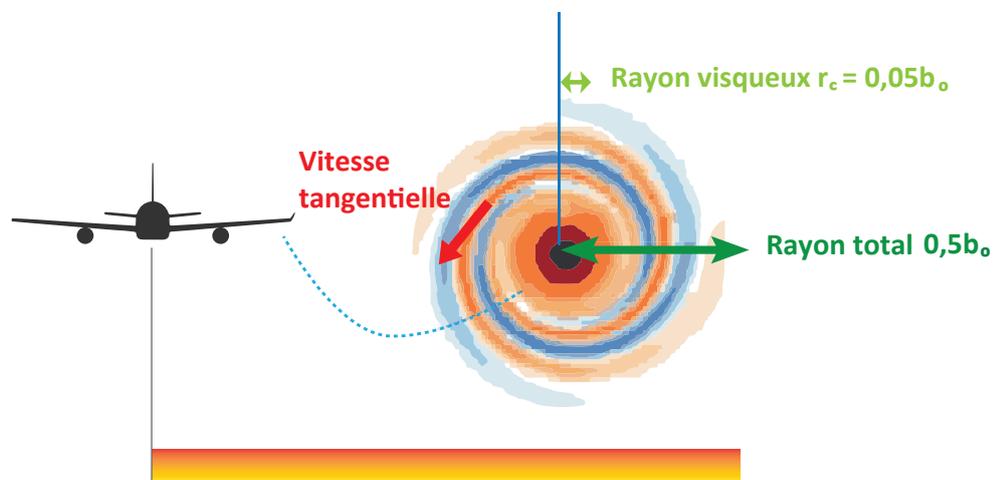


Figure 3 : Schématisation d'un tourbillon, vue de derrière l'avion.

1.1.4. Conditions initiales

Les caractéristiques de l'avion déterminent les conditions suivantes [Gerz, 2002]:

- ▶ une **distance d'espacement initial des tourbillons b_0** , légèrement inférieure à l'envergure de l'avion, qui s'exprime en m, définie par la relation:

$$b_0 = s.B$$

- ▶ s : paramètre fixe représentatif de la forme de l'aile: $s = \pi/4$ pour une aile elliptique;
- ▶ B : envergure de l'avion générateur en m;

- ▶ une **circulation initiale Γ_0** (identique pour les deux tourbillons, au signe près étant donné qu'ils sont contra-rotatifs), qui s'exprime en m^2/s , définie par la relation:

$$\Gamma_0 = \frac{M.g}{\rho.V.b_0}$$

- ▶ M: masse de l'avion générateur en kg;
- ▶ g: accélération de la pesanteur en m/s^2 ;
- ▶ ρ : masse volumique de l'air en kg/m^3 ;
- ▶ V: vitesse de l'avion générateur en m/s ;

▶ une **vitesse initiale de descente des tourbillons V_0** , qui s'exprime en m/s , définie par la relation:

$$V_0 = \frac{\Gamma_0}{2\pi \cdot b_0}$$

▶ une durée caractéristique, définie comme la durée nécessaire à un tourbillon pour descendre de b_0 à la vitesse V_0 :

$$t_0 = \frac{b_0}{V_0}$$

➡ **Ordres de grandeur: un avion de ligne, avec une envergure de 60 m et une masse de 130 t, génère à l'approche deux tourbillons de sillage séparés d'une distance initiale d'environ 50 m, d'intensité initiale de l'ordre de $350 m^2/s$ et descendant d'environ 2,5 m/s (500ft/min).**

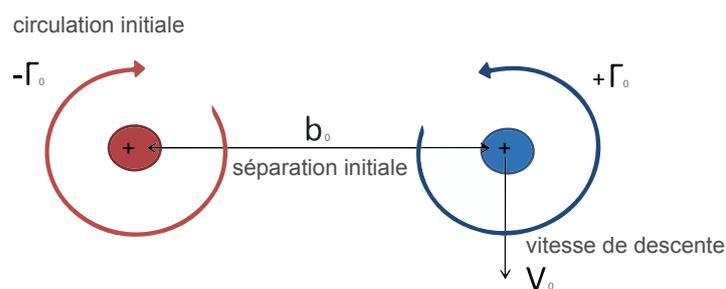


Figure 4: Conditions initiales des tourbillons: une séparation, une intensité, une vitesse de descente.

L'intensité initiale, Γ_0 , des tourbillons :

- ▶ augmente lorsque la masse de l'avion augmente, car la masse d'air déplacée (de l'ordre de la masse de l'avion) et brassée par les tourbillons est plus élevée;
- ▶ augmente lorsque l'envergure de l'avion diminue;
- ▶ augmente lorsque la vitesse de l'avion diminue;
- ▶ dépend enfin de la configuration de l'avion: une aile lisse (dispositifs hypersustentateurs rentrés) favorise la cohérence et l'organisation des tourbillons.

1.2. Évolutions spatiale et temporelle

1.2.1. Évolution naturelle

La circulation du tourbillon varie en fonction du temps. Elle est maximale au moment de la formation du tourbillon (circulation initiale) puis elle décroît jusqu'à un niveau de circulation qui se confond avec la turbulence atmosphérique (environ $70 \text{ m}^2/\text{s}$).

La durée nécessaire à la désintégration complète des tourbillons de sillage dépend de l'avion qui les a générés ainsi que des conditions atmosphériques et peut atteindre quelques minutes (la distance équivalente derrière l'avion peut aller jusqu'à 10 NM (cf. Figure 5)).

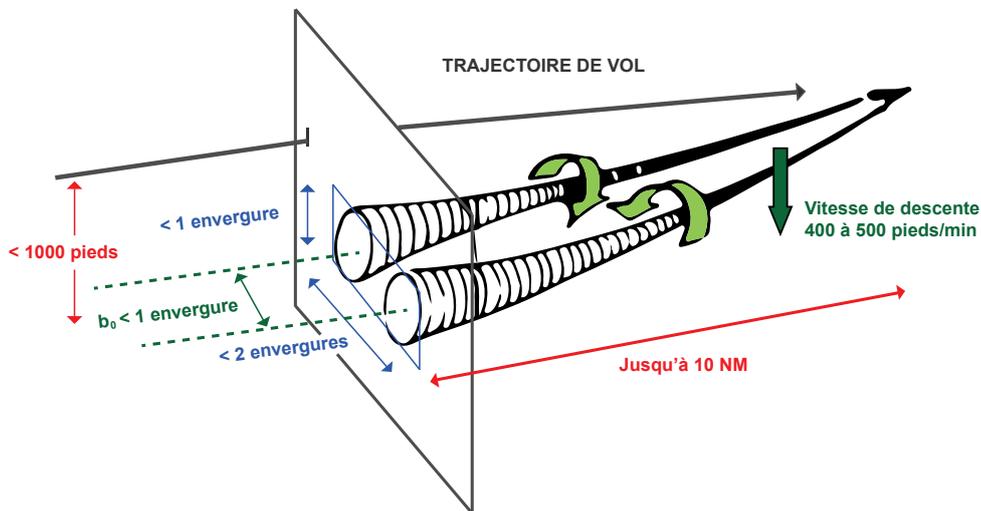


Figure 5 : Domaine d'influence de la turbulence de sillage.

Le principal mécanisme d'instabilité conduisant à une dissipation du sillage est l'instabilité de Crow, à grande longueur d'onde (de l'ordre de quelques b_0) qui se caractérise par une déformation des tubes tourbillonnaires sous forme d'anneaux (cf. Figure 6).



Figure 6 : Visualisation par fumigènes des 3 stades d'évolution temporelle de la turbulence de sillage, illustration de l'instabilité de Crow: tubes parallèles, déformations sinusoïdales, anneaux.

La vitesse de décroissance de l'intensité des tourbillons est également influencée par la distance d'espacement initial des tourbillons b_0 . Pour des types d'avions d'envergure similaire et dans des conditions atmosphériques similaires, une distance d'espacement initial b_0 plus faible conduira à une décroissance plus rapide.

À la dynamique interne des tourbillons, il faut ajouter l'influence de facteurs ambiants, extérieurs à l'avion :

- ▶ les conditions atmosphériques;
- ▶ l'effet de sol;
- ▶ le vent météorologique.

La réglementation de la FAA [FAA, AC 90/23-G] donne des indications sur ces trois paramètres, reprises ci-après.

1.2.2. Conditions atmosphériques

Le comportement des tourbillons est influencé par certaines conditions atmosphériques, notamment la turbulence atmosphérique, la température ambiante (en particulier son gradient vertical) ainsi que le vent de travers (cf. section 1.2.4).

Des conditions atmosphériques calmes favorisent la persistance des tourbillons; au contraire la turbulence atmosphérique accélère leur désintégration. L'intensité de cette turbulence atmosphérique peut être quantifiée par le **taux de dissipation d'énergie** turbulente, l'EDR (*Eddy Dissipation Rate*), exprimé en m^2/s^3 ou plus généralement selon sa racine cubique en $\text{m}^{2/3}/\text{s}$. Une racine cubique de l'EDR inférieure à $0,4 \text{ m}^{2/3}/\text{s}$ correspond à une atmosphère très calme, une racine cubique de l'EDR supérieure à $0,7 \text{ m}^{2/3}/\text{s}$ correspond à une atmosphère très turbulente [Météo France, 2007].

Par ailleurs une stratification thermique stable, réduit la durée de vie des tourbillons et l'amplitude des mouvements verticaux. La stabilité de la stratification thermique peut être quantifiée par la **fréquence de Brunt-Väisälä**, N , exprimée en rad/s , qui représente la fréquence de l'oscillation d'une « particule » fluide déplacée d'une position d'équilibre. N est typiquement de l'ordre de $10^{-2} \text{ rad}/\text{s}$ dans l'atmosphère [Sato, 2013]. $N = 0$ correspond à une stabilité nulle. L'absence de variation de la densité implique qu'une particule déplacée restera à sa nouvelle altitude une fois le déplacement terminé.

L'EDR et N sont deux paramètres d'entrée importants dans les modèles de décroissance de la turbulence de sillage en fonction du temps, tel que le modèle de Sarpkaya [Sarpkaya, 2001].

Des campagnes de mesure de la circulation par Lidar sur l'aéroport de Londres-Heathrow (EGLL) ont permis de déterminer le profil de la décroissance de la circulation en fonction du temps, dans des conditions atmosphériques favorables à la persistance des tourbillons de sillage [De Visscher, 2015 (2)].

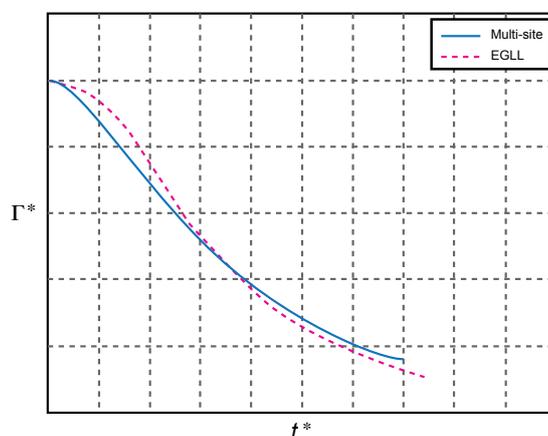


Figure 7: Décroissance de la circulation en fonction du temps (grandeurs adimensionnées).

La Figure 7 illustre cette décroissance, les grandeurs ont été adimensionnées (annotées par une *) pour les rendre indépendantes de l'avion générateur à des fins de comparaison.

1.2.3. Effet de sol

Lorsque les tourbillons qui descendent vers le sol atteignent une hauteur inférieure à leur distance d'espacement initiale notée b_0 (légèrement inférieure à une envergure d'avion), ils sont dits « dans l'effet de sol ».

Les tourbillons s'éloignent alors latéralement l'un de l'autre, et en générant un fort gradient de pression au niveau du sol ils créent des tourbillons secondaires.



Les tourbillons secondaires, qui tournent autour et en sens inverse des tourbillons principaux, induisent une remontée de ces derniers qui finissent par éclater.

Le phénomène de « rebond » maintient les tourbillons principaux à une distance de l'ordre de $2b_0$ de part et d'autre de l'avion, jusqu'à leur désintégration.

Enfin, le phénomène d'effet de sol accélère la désintégration des tourbillons.

La figure ci-après schématise, sans vocation à démontrer une trajectoire précise, l'évolution spatiale des centres des tourbillons principaux dans un plan de coupe perpendiculaire à l'axe de l'avion.

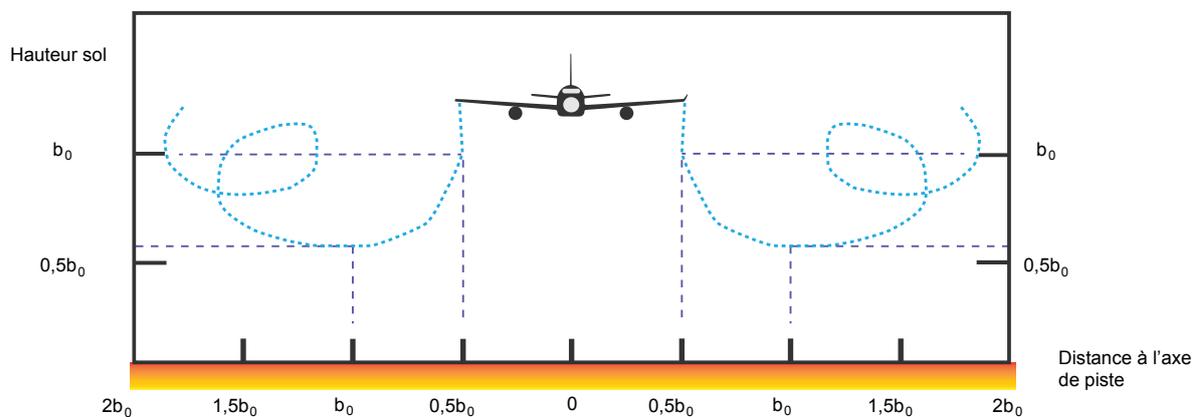


Figure 8 : Schématisation des trajectoires latérales des centres des tourbillons principaux dans l'effet de sol, sans vent de travers.

1.2.4. Vent atmosphérique

La force du vent a un effet sur l'évolution tant spatiale que temporelle des tourbillons.

Un vent léger de quelques nœuds favorise un maintien des tourbillons à l'endroit de leur génération. Au-dessus de cette valeur, le vent déporte les tourbillons, à une distance d'autant plus grande que le vent est fort.

La composante traversière du vent déporte les tourbillons latéralement à la trajectoire.

S'ils sont hors effet de sol, les tourbillons (qui en l'absence de vent n'auraient pas de propagation latérale) sont déportés tous les deux vers le côté aval du vent.

S'ils sont dans l'effet de sol :

- ▶ le tourbillon en amont du vent voit son déplacement contré. Il peut être maintenu sur place:
 - ▶ c'est-à-dire au voisinage de la trajectoire de l'avion;
 - ▶ ou déporté dans la direction opposée;
- ▶ le tourbillon en aval du vent voit son déplacement dans l'effet de sol renforcé par l'effet du vent, ce qui favorise sa propagation à une distance très supérieure en largeur à $2b_0$ de la trajectoire de l'avion.

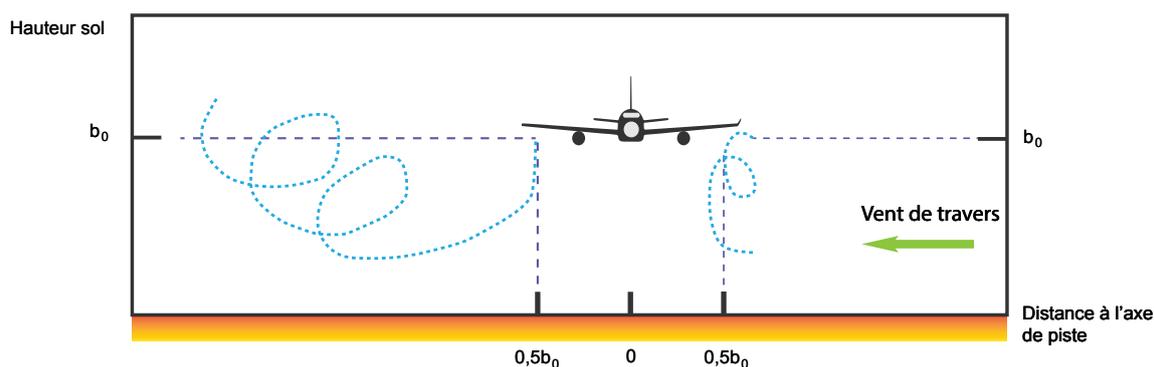


Figure 9: Schématisation des trajectoires latérales des centres des tourbillons principaux dans l'effet de sol, avec vent de travers.

Parallèlement, le vent accélère la désintégration des tourbillons, d'autant plus rapidement qu'il est fort. Cet effet limite donc la distance de transport des tourbillons latéralement à la trajectoire.

En effet, un vent latéral fort déporte les tourbillons mais ceux-ci sont dans le même temps désintégrés rapidement.



Le forum européen WakeNet réunissant des partenaires de divers horizons (industriels, universitaires, régulateurs, etc.) fournit une connaissance actualisée [WakeNet, 2012] en matière de turbulence de sillage: <http://www.wakenet.eu/>.

1.3. Cas de la turbulence générée par un hélicoptère

1.3.1. Formation

Les pales du rotor principal, assurant la sustentation (et la propulsion), sont les équivalents mobiles des ailes fixes d'avion.

Les pales du rotor en rotation, par leur profil et leur incidence, créent une dépression au-dessus d'elles et une surpression au-dessous, qui moyennées sur un tour complet, génèrent une portance et donc une turbulence de sillage.



Visualisation de la turbulence de sillage générée par un hélicoptère en vol.

La turbulence de sillage sous sa forme simplifiée de deux tourbillons de sillage prédomine lorsque l'hélicoptère est en translation (vol horizontal, $V > 40$ nœuds).

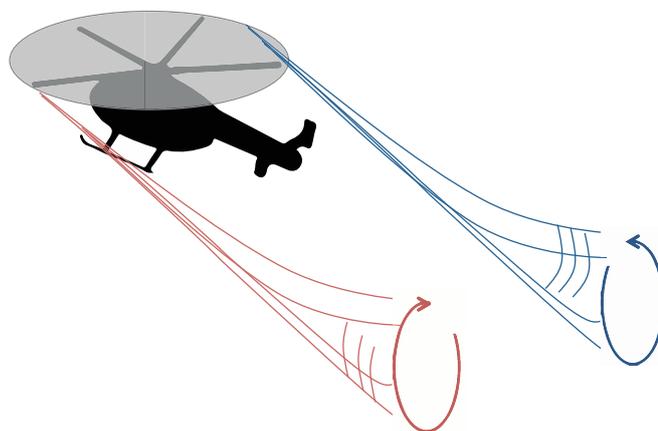


Figure 10: Hélicoptère en vol, générant des tourbillons de sillage.

Le **souffle rotor**, quant à lui, est perpendiculaire au rotor lorsque l'hélicoptère est en stationnaire (vol vertical) ou évolue à faible vitesse ($V < 20$ nœuds).

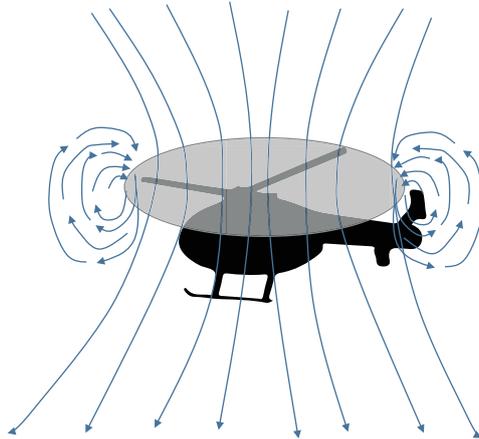


Figure 11: Hélicoptère en stationnaire, hors effet de sol.

Les travaux de simulation numérique du souffle rotor d'un hélicoptère sont moins nombreux que ceux concernant la turbulence de sillage générée par un avion. La modélisation des pales la plus couramment employée est celle du « disque actuateur » :

- ▶ les pales sont modélisées par un disque plein de diamètre équivalent.

Des modèles plus complexes intègrent le rotor anticouple ou le fuselage de l'hélicoptère.

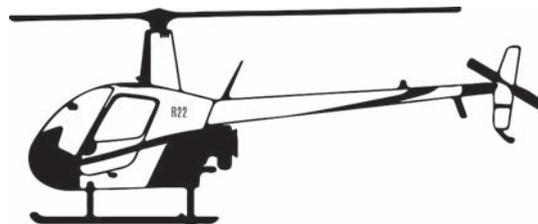
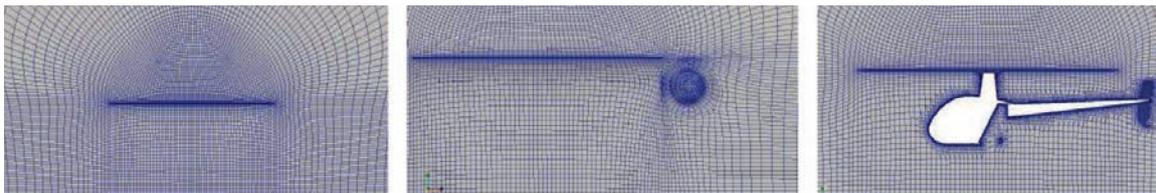


Figure 12: Maillage du Robinson R22 pour différents modèles (disque seul, disque avec rotor anticouple, ensembles rotors avec fuselage).

1.3.2. Effet de sol

Lorsque l'hélicoptère vole à une hauteur inférieure à son diamètre rotor, le souffle rotor « s'écrase » sur le sol.

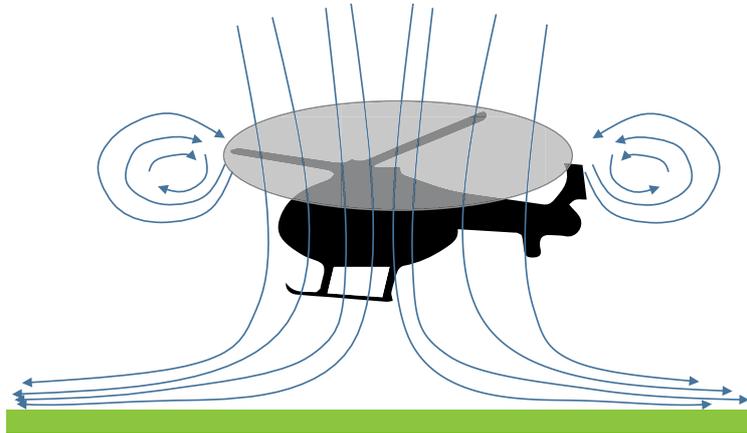


Figure 13: Hélicoptère en stationnaire, dans l'effet de sol.

1.3.3. Différences avec un avion

- ▶ Un hélicoptère en stationnaire génère un souffle rotor assimilable à un vent de travers induit. Ainsi, l'impact du souffle rotor sur un autre aéronef est simplifié : il suffit de connaître la résistance au vent de travers de l'aéronef suiveur qui est une donnée démontrée.
- ▶ Un hélicoptère générateur peut subir sa propre turbulence de sillage lorsque sa vitesse de translation est faible (vol quasi stationnaire ou vol vertical), en présence de vent arrière (vitesse du vent arrière supérieure à la vitesse de déplacement de l'hélicoptère). Le souffle est alors ramené sous l'appareil et celui-ci repasse à travers son propre sillage ce qui peut conduire au décrochage des pales et à la perte de contrôle de l'appareil.



Visualisation du souffle généré par un hélicoptère en stationnaire.

2. Effets sur les aéronefs



Visualisation par fumigènes des tourbillons de sillage en formation générés par le G550 du DLR.

- ↳ Le risque associé à la turbulence de sillage n'est pris en compte qu'à partir du décollage, dès que le train avant quitte la piste lors de la rotation, jusqu'à l'atterrissage quand le train principal prend contact avec le sol lors du toucher des roues. C'est en effet lorsque l'avion est porté par l'air que la turbulence de sillage s'organise et qu'il existe une circulation des tourbillons.
- ↳ Si le risque associé à la rencontre avec de la turbulence de sillage est défini pour une paire d'avions, générateur/suiveur, il concerne le suiveur qui subit la turbulence de sillage.

2.1. Effets sur les avions

Les trois principaux effets de la turbulence de sillage sur les avions qui la rencontrent, sont :

- ▶ le **roulis** induit ;
- ▶ la variation d'altitude ;
- ▶ les contraintes sur la structure.

Le plus grave danger pour un avion qui rencontre une turbulence de sillage est le roulis induit car, si les ailerons de l'avion sont pris dans les tourbillons, ce qui dépend du diamètre des tourbillons (fonction de l'envergure du générateur) et de l'envergure du suiveur, l'action en butée sur les commandes peut ne pas suffire à contrer ce roulis : il s'ensuit une perte de contrôle de l'avion.

Le **coefficient de moment de roulis** (*Rolling Moment Coefficient* - RMC) induit par la turbulence de sillage constitue dans certains travaux de recherche un critère d'évaluation de la gravité de la turbulence rencontrée. Il caractérise l'effet initial d'une rencontre avec de la turbulence de sillage sur l'avion en tenant compte de sa stabilité en roulis.

Cette métrique adimensionnelle est définie par le moment de roulis, normalisé de sorte à être indépendant du type avion (envergure, vitesse, etc.). La formule retenue pour le projet européen RECAT-EU (cf. section 3.2) peut s'écrire [De Visscher, 2015 (1)]:

$$RMC = \frac{M}{\frac{1}{2} \rho V_f^2 \cdot S_f \cdot b_f} \text{ avec}$$

- ▶ S_f : surface alaire en m^2 ;
- ▶ M : Moment de roulis induit par la turbulence de sillage en $kg \cdot m^2 \cdot s^{-2}$.

Cette formule a été confrontée avec succès à des mesures d'essais en vol réalisés par le constructeur aéronautique Airbus en 2011.

Une approximation au premier ordre de ce coefficient s'écrit [Hallock, 2015]: $RMC = \frac{\Gamma}{V_f \cdot b_f}$

- ▶ Γ : circulation du tourbillon à l'instant de la rencontre en m^2/s ;
- ▶ V_f : vitesse de l'avion suiveur en m/s ;
- ▶ b_f : envergure de l'avion suiveur en m .

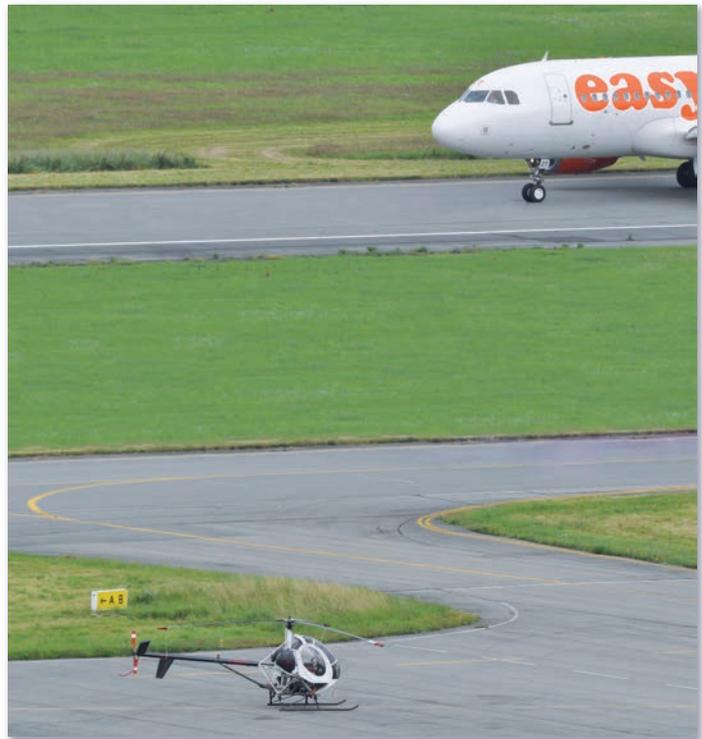
Si cette dernière, sans facteur correctif, est facile à appréhender, elle reste néanmoins insuffisante pour comparer des avions entre eux.

Toutes les phases de vol sont concernées par la problématique de la turbulence de sillage. En croisière, le roulis induit peut causer une chute d'objets ou une déstabilisation du personnel navigant ou des passagers causant ainsi des blessures car ceux-ci sont souvent non attachés au cours de cette phase de vol. Néanmoins, les phases de vol les plus critiques sont l'approche finale et la montée initiale où l'aéronef évolue près du sol.

2.2. Effets sur les hélicoptères

Le phénomène est plus complexe pour les hélicoptères. Le caractère tournant de la voilure entraîne un impact de la turbulence de sillage sur les trois mouvements de rotation de l'hélicoptère sur lui-même (roulis, tangage, lacet). Mais les hélicoptères ont pour cette même raison une plus grande capacité à « contrer » la turbulence de sillage.

À ce jour, le sujet n'a que peu été étudié.



Atterrissage d'un Airbus A319. Au premier plan, un Hughes 300 stationné.



3. Séparations entre les aéronefs

Afin de minimiser le risque de rencontre avec la turbulence de sillage, des règles d'espacement sont appliquées entre deux avions. Pour en faciliter la mise en œuvre, les avions sont regroupés par catégories et des minima de séparation sont définis pour une paire de catégories. Ces minima sont à respecter pour un aéronef qui suit ou traverse la trajectoire d'un autre aéronef, en phases d'approche et de départ, lorsque la séparation verticale est inférieure à 1 000 pieds.

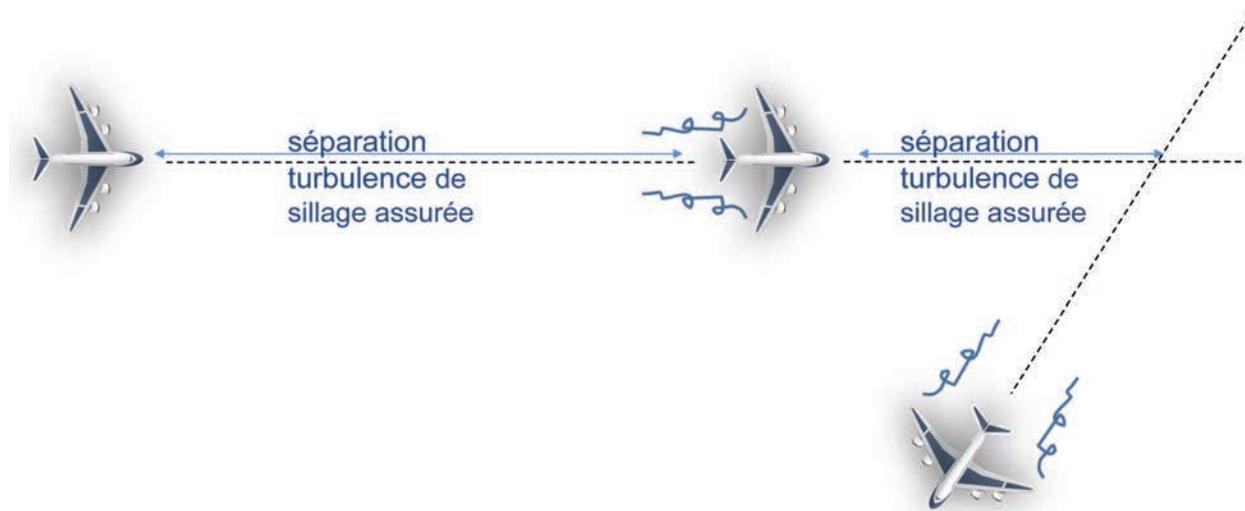


Figure 14 : Nécessité de respecter des minima de séparation entre deux avions qui se suivent ou dont la trajectoire se croise (différence d'altitude inférieure à 1 000 pieds).

↳ La **turbulence de sillage est invisible** à l'œil nu. Il est donc difficile, sans système de détection ou présence d'un indicateur visuel (brume, nuage, traînées de condensation dues aux moteurs, etc.), d'en déterminer avec précision la présence et la localisation. Par conséquent, il convient d'adopter des mesures de précaution comme des distances de séparation minimales ou des positionnements relatifs de trajectoires. Des systèmes de détection et d'évitement de la turbulence de sillage, embarqués ou non, fondés sur des modèles de prédiction de l'évolution de la turbulence de sillage en fonction des conditions atmosphériques, sont en cours d'étude.

3.1. Les dispositions françaises et OACI

3.1.1 Les catégories d'avions

L'OACI [OACI, Doc 4444] distingue **trois catégories² d'avions** relativement à la turbulence de sillage, fonction de la masse maximale au décollage certifiée de l'avion, et reconnaît l'existence de deux propositions (européenne et américaine) à 6 catégories depuis la 12^{ème} Conférence de la Navigation Aérienne de l'OACI de Novembre 2012.

² La Lettre aux États [OACI, 2008] dédiée aux minima de séparation derrière l'Airbus A380, crée ipso facto une 4ème catégorie.

L'arrêté du 23 novembre 2015 [France, RCA3/modifié] modifiant l'arrêté du 6 juillet 1992 modifié relatif aux procédures pour les organismes rendant les services de la circulation aérienne aux aéronefs de la circulation aérienne générale (RCA/3) reprend cette classification. Le cas de l'Airbus A380 est traité dans une Lettre aux États OACI [OACI, 2008].

<i>Aéronef</i>	<i>Masse maximale au décollage</i>	<i>Catégorie</i>
▶ <i>Très gros porteur (super heavy)</i>	▶ <i>Masse de l'A380 i.e. 560 000 kg</i>	<i>J</i>
▶ <i>Gros porteur (heavy)</i>	▶ <i>Supérieure à 136 000 kg</i>	<i>H</i>
▶ <i>Moyen tonnage (médium)</i>	▶ <i>Inférieure ou égale à 136 000 kg, mais supérieure à 7 000 kg</i>	<i>M</i>
▶ <i>Faible tonnage (light)</i>	▶ <i>Inférieure ou égale à 7 000 kg</i>	<i>L</i>

Tableau 1: Catégories OACI des avions relativement à la turbulence de sillage.

3.1.2. Séparations pour la circulation aérienne d'aérodrome

Pour réduire le risque qu'un aéronef ne soit mis en danger par la turbulence de sillage de l'avion qui le précède, les procédures de circulation aérienne prévoient des minima de séparation longitudinale entre aéronefs durant les phases de décollage et d'atterrissage dans les cas suivants :

- ▶ a) lorsqu'un aéronef vole, immédiatement derrière un autre, à la même altitude ou moins de 305 m (1 000 ft) plus bas ;
- ▶ b) lorsqu'un aéronef traverse le sillage d'un autre à la même altitude ou moins de 305 m (1 000 ft) plus bas ;
- ▶ c) lorsque deux aéronefs utilisent :
 - ▶ la même piste,
 - ▶ des pistes parallèles distantes de moins de 760 m,
 - ▶ des pistes sécantes si les trajectoires de vol prévues doivent se croiser,
 - ▶ des pistes parallèles distantes de 760 m ou plus, si les trajectoires de vol prévues doivent se croiser.

En ce qui concerne les vols VFR, elles ne s'appliquent qu'aux aéronefs au départ.

Elles ne s'appliquent pas :

- ▶ aux aéronefs ayant obtenu une clairance de séparation à vue,
- ▶ aux aéronefs au départ qui, sur leur demande, ont été autorisés à s'en affranchir,
- ▶ aux aéronefs en vol IFR effectuant des manœuvres à vue à l'issue de leur procédure d'approche.

Ces mesures sont décrites aux chapitres 3 à 5 et 10 du RCA/3 modifié [France, RCA/3 modifié] et consistent principalement en la mise en œuvre de minima de séparation longitudinale entre avions en phase d'atterrissage ou de décollage.

Les minima de séparation applicables sont identiques à ceux décrits dans les Documents OACI [OACI, Doc 4444] et [OACI, Doc 9426]. Les minima de séparation applicables pour l'A380 sont ceux de la Lettre aux États OACI [OACI, 2008].

3.1.2.1. Minima de séparation en distance

Si le service de contrôle d'aérodrome est rendu **avec un service radar**, des séparations minimales en distance entre avions sont appliquées. Lorsqu'aucune exigence n'est spécifiée par le tableau 2, le minimum de séparation radar (MSR) peut être appliqué.

<i>Aéronef générateur</i>	<i>Aéronef suiveur</i>			
	<i>Très gros porteur</i>	<i>Gros porteur</i>	<i>Moyen tonnage</i>	<i>Faible tonnage</i>
▶ <i>Très gros porteur</i>	-	6 NM	7 NM	8 NM
▶ <i>Gros porteur</i>	-	4 NM	5 NM	6 NM
▶ <i>Moyen tonnage</i>	-	-	-	5 NM
▶ <i>Faible tonnage</i>	-	-	-	-

Tableau 2 : Minima de séparation en distance imposés par la turbulence de sillage.

3.1.2.2. Minima de séparation en temps

Si le service de contrôle d'aérodrome est rendu **sans service radar**, des séparations minimales en temps entre avions sont appliquées. Lorsqu'aucune exigence n'est spécifiée par le tableau 3, il appartient au pilote d'assurer l'espacement suffisant.

Aéronef générateur	Aéronef suiveur			
	Très gros porteur	Gros porteur	Moyen tonnage	Faible tonnage
▶ Très gros porteur	-	▶ à l'arrivée: - ▶ au départ: 2 min	▶ à l'arrivée: 3 min ▶ au départ: 3 min/ 4 min*	▶ à l'arrivée: 4 min ▶ au départ: 3 min/ 4 min*
▶ Gros porteur	-	-	▶ à l'arrivée: 2 min ▶ au départ: 2 min/ 3 min*	▶ à l'arrivée: 3 min ▶ au départ: 2 min/ 3 min*
▶ Moyen tonnage	-	-	-	▶ à l'arrivée: 3 min ▶ au départ: 2 min/ 3 min*
▶ Faible tonnage	-	-	-	-

Tableau 3: Minima de séparation en temps imposés par la turbulence de sillage.

* Minimum de séparation à appliquer lorsque le suiveur décolle derrière le générateur soit d'une partie intermédiaire de la même piste soit d'une partie intermédiaire d'une piste parallèle distante de moins de 760 m.



Séquences d'avions en finale avant l'atterrissage, interface de contrôle.

3.2. Le projet RECAT-EU

Le contrôleur aérien assure la sécurité et l'efficacité du trafic aérien. Sur certaines plages horaires de la journée, la demande d'utilisation de la piste peut être très élevée, le service de contrôle doit pouvoir faire atterrir et décoller un grand nombre d'avions sur l'aéroport en garantissant la sécurité des mouvements.

Dans ces situations les séparations longitudinales entre aéronefs peuvent devenir un facteur limitant de la capacité. L'optimisation des minima de séparation, s'appuyant sur les avancées dans la compréhension et la modélisation du phénomène de turbulence de sillage et de son risque associé, peut permettre d'augmenter la capacité piste et les marges de manœuvre opérationnelles, tout en conservant des niveaux de sécurité acceptables.

C'est l'objectif du projet européen RECAT-EU [ECTL, 2013] développé par l'organisation européenne pour la sécurité de la navigation aérienne (EUROCONTROL) et détaillé dans les paragraphes suivants.

En théorie, si la séparation entre les avions diminue, les marges de manœuvre opérationnelle et la capacité de l'aéroport augmentent, le service de contrôle pouvant traiter davantage de mouvements sur la même période de temps.

En pratique, la capacité est limitée par la performance du système de surveillance, la configuration des pistes, le temps d'occupation de piste, la charge cognitive imposée au contrôleur, les impératifs de sécurité, etc. Le STAC a mené pour Eurocontrol une évaluation globale des bénéfices du concept RECAT-EU.

L'AESA a rendu possible, pour les aéroports européens qui le souhaitent, la mise en œuvre de minima de séparation longitudinale réduits selon la proposition du projet européen RECAT-EU [ECTL, 2013]. L'aéroport de Paris-Charles de Gaulle et ses terrains satellites appliquent les dispositions RECAT-EU depuis le 22 mars 2016 [France, 2016].

3.2.1. De nouvelles catégories d'avions

La création de nouvelles catégories permet de réduire les minima de séparation entre avions, en créant des catégories plus homogènes. Dans le projet RECAT-EU, le nombre de catégories est fixé à 6 pour limiter l'augmentation de la charge de travail du contrôleur.

Des catégories, intégrant le double rôle que peut jouer un avion, tour à tour générateur ou suiveur, ont été proposées par le STAC sur la base d'une méthode statistique de regroupement. Ces catégories ont ensuite été validées lors d'une étude de risque [ECTL, 2013] établie par Eurocontrol.

De manière simplifiée, les catégories actuelles « gros porteur » et « moyen porteur » ont été scindées en tenant compte de la masse maximale au décollage certifiée de l'avion (qui caractérise davantage son aspect « générateur ») ainsi que de son envergure (qui caractérise davantage son aspect « suiveur »).

Les **6 catégories** proposées par RECAT-EU sont notées à titre indicatif CAT A/B/C/D/E/F, la CAT A regroupant les avions les plus grands, la CAT F regroupant les avions les plus petits.

Aéronefs	Masse maximale au décollage	Envergure	Catégorie
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Super gros porteur ➤ Gros porteur classe supérieure ➤ Gros porteur classe inférieure 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Supérieure à 100 000 kg 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Supérieure à 72 m mais inférieure à 80 m 	CAT A
		<ul style="list-style-type: none"> ➤ Supérieure à 60 m mais inférieure à 72 m 	CAT B
		<ul style="list-style-type: none"> ➤ Supérieure à 52 m mais inférieure à 60 m 	CAT B ou CAT C analyse spécifique
		<ul style="list-style-type: none"> ➤ Inférieure à 52 m 	CAT C
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Moyen tonnage classe supérieure 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Inférieure ou égale à 100 000 kg, mais supérieure à 15 000 kg 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Supérieure à 32 m 	CAT D
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Moyen tonnage classe inférieure 		<ul style="list-style-type: none"> ➤ Inférieure à 32 m 	CAT E
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Faible tonnage 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Inférieure ou égale à 15 000 kg 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Sans distinction 	CAT F

Tableau 4: Catégories RECAT-EU des avions relativement à la turbulence de sillage.

À noter que des avions catégorisés CAT E, CAT C, CAT B, peuvent être « sur-catégorisés », respectivement en CAT D, CAT B, CAT A, sur la base d'une étude de sécurité optionnelle démontrant leur capacité à résister aux effets de la turbulence de sillage.

Par ailleurs, faisant suite à des notifications d'incidents et d'accidents, le projet RECAT-EU propose de protéger davantage les plus petits avions « moyen tonnage » OACI (M) en les considérant dorénavant comme faible tonnage (CAT F) – frontière établie à 15 000 kg.

Catégories OACI					
J	H	M		L	
Catégories RECAT-EU					
➤ Super gros porteur	➤ Gros porteur classe supérieure	➤ Gros porteur classe inférieure	➤ Moyen tonnage classe supérieure	➤ Moyen tonnage classe inférieure	➤ Faible tonnage
➤ CAT A	➤ CAT B	➤ CAT C	➤ CAT D	➤ CAT E	➤ CAT F
<ul style="list-style-type: none"> ➤ A380 ➤ A124* 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ famille A330 ➤ famille A340 ➤ famille B747 ➤ famille B777 ➤ A350-900 ➤ B787-800/900 ➤ IL96 ➤ AN22 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ famille A300 ➤ famille A310 ➤ famille B767 ➤ famille B757* ➤ IL76 ➤ MD11/DC10 ➤ IL76 ➤ C135 ➤ TU95/22 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ famille A320 ➤ B737-900/800 ➤ B737-700/600 ➤ IL18 ➤ famille MD80 ➤ MD90 ➤ C130/C160 ➤ AN22 ➤ TU204 ➤ BCS1 ➤ BCS3 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ ATR ➤ B737-500 ➤ B737-400/300 ➤ CRJ ➤ CL60, CL30 ➤ E195, E190 ➤ E175, E170 ➤ E145, E135 ➤ F100, F70 ➤ GLF4, GLF 2 ➤ RJ1H, RJ85 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ FA20**, FA10** ➤ D328** ➤ E120** ➤ BE45**, BE40** ➤ H25B** ➤ JS41**, JS32 ➤ LJ60**, LJ35** ➤ SF34** ➤ P180 ➤ C650**, C525 ➤ BCS3, C152**

Tableau 5: Exemples de catégories RECAT-EU pour différents types/familles avion (avion*: « sur-catégorisé » par rapport à l'OACI, avion**: « sous-catégorisé » par rapport à l'OACI).

3.2.2. Principes de sécurité

Le projet RECAT-EU est fondé sur le postulat suivant: le niveau de sécurité associé aux minima de séparation OACI actuellement mis en œuvre est acceptable. Trois grands principes de sécurité en découlent :

P1/ Au sein d'une catégorie d'avions, les avions les plus petits de cette catégorie génèrent une turbulence de sillage moins importante. En scindant en deux une catégorie, il est donc possible de réduire la distance de séparation derrière ces avions tout en conservant un niveau de sécurité acceptable.

P2/ Les avions les plus gros résistent davantage à la turbulence de sillage rencontrée. En scindant en deux une catégorie d'avions, il est donc possible de réduire la distance de séparation devant ces avions tout en conservant un niveau de sécurité acceptable.

P3/ en scindant en deux une catégorie, la séparation des avions les plus petits derrière les avions les plus grands de cette même catégorie doit rester la même pour maintenir un niveau de sécurité acceptable.

Le risque de rencontre avec de la turbulence de sillage peut augmenter pour certaines paires d'avions concernées par une réduction de séparation. Les rencontres peuvent en effet être plus nombreuses et plus sévères. Néanmoins, la sévérité ne dépasse jamais la sévérité maximale expérimentée par la paire d'avions la plus défavorable, paire pour laquelle la séparation OACI, dont le niveau de sécurité est jugé acceptable, est conservée.

3.2.3. Modification des minima de séparation

Lorsque le service de contrôle d'aérodrome est rendu avec un service radar, des nouvelles séparations minimales entre avions à l'atterrissage peuvent être appliquées d'après le projet RECAT-EU. Lorsqu'aucune exigence n'est spécifiée, le plus petit « minimum » de séparation radar (MSR) OACI, fixé à 2.5NM, est considéré.

		<i>Avion suiveur</i>					
		<i>► CAT A</i>	<i>► CAT B</i>	<i>► CAT C</i>	<i>► CAT D</i>	<i>► CAT E</i>	<i>► CAT F</i>
<i>Avion générateur</i>	<i>► CAT A</i>	<i>3 NM</i>	<i>4 NM</i>	<i>5 NM</i>	<i>5 NM</i>	<i>6 NM</i>	<i>8 NM</i>
	<i>► CAT B</i>	-	<i>3 NM</i>	<i>4 NM</i>	<i>4 NM</i>	<i>5 NM</i>	<i>7 NM</i>
	<i>► CAT C</i>	-	-	<i>3 NM</i>	<i>3 NM</i>	<i>4 NM</i>	<i>6 NM</i>
	<i>► CAT D</i>	-	-	-	-	-	<i>5 NM</i>
	<i>► CAT E</i>	-	-	-	-	-	<i>4 NM</i>
	<i>► CAT F</i>	-	-	-	-	-	<i>3 NM</i>

Tableau 6: Minima de séparation RECAT-EU en distance en phase d'atterrissage (en gris, les séparations minimales réduites comparées aux dispositions OACI, en orange, la séparation minimale a été augmentée).

À noter qu'une protection supplémentaire est proposée pour les plus petits avions (CAT F) derrière les plus gros des gros-porteurs (CAT B) grâce à une augmentation de la séparation associée.

Pour la phase de décollage, les minima de séparation sont définis en intervalle de temps minimum à respecter entre deux aéronefs en fonction de leur catégorie dans la classification RECAT-EU. Ces minima sont définis dans l'information aéronautique AIC A03/16 [France, 2016] relative à la mise en œuvre des dispositions RECAT-EU sur les aéroports de Paris-Charles de Gaulle, Paris-Le Bourget et Pontoise-Cormeilles-en-Vexin.

		<i>Avion suiveur</i>					
		<i>CAT A</i>	<i>CAT B</i>	<i>CAT C</i>	<i>CAT D</i>	<i>CAT E</i>	<i>CAT F</i>
<i>Avion générateur</i>	<i>CAT A</i>	-	100 s	120 s	140 s	160 s	180 s
	<i>CAT B</i>	-	-	-	100 s	120 s	140 s
	<i>CAT C</i>	-	-	-	80 s	100 s	120 s
	<i>CAT D</i>	-	-	-	-	-	120 s
	<i>CAT E</i>	-	-	-	-	-	100 s
	<i>CAT F</i>	-	-	-	-	-	80 s

Tableau 7: Minima de séparation RECAT-EU en temps en phase de décollage.

Le projet RECAT-EU tel que décrit supra n'est que la première phase d'un programme européen d'optimisation des minima de séparation liés à la turbulence de sillage. La deuxième phase, RECAT-EU-PWS (*Pair Wise Separation*), en cours de développement, proposera toujours des minima de séparation statique mais entre paires d'avions à la place de paires de catégories. La troisième phase, RECAT-WDS (*Weather Dependent Separation*) devrait proposer une séparation minimale dynamique par paire d'avions, dans laquelle les minima de séparation tiendront également compte des conditions réelles, telles que la masse de l'avion et les éléments atmosphériques/ météorologiques. Les deux dernières phases de ce programme devront nécessairement être accompagnées d'outils de contrôle plus conséquents que pour le déploiement de RECAT-EU.

Un système de gestion dynamique des séparations est actuellement déployé sur l'aéroport de Londres-Heathrow. En présence de vent de face supérieur à 5 nœuds, des procédures spéciales basées sur des séparations à l'arrivée en temps (TBS – *Time Based Separation*) sont mises en place pour ajuster la séparation radar entre deux avions. En effet, pour une séparation radar donnée, le temps de vol pour cette séparation est plus important en cas de vent de face que sans vent, générant ainsi une perte de capacité à la piste. Afin de limiter cette perte de capacité, il est nécessaire de réduire les séparations radar appliquées, de manière à conserver un temps de parcours équivalent à une situation par vent faible.

- Le projet RECAT-EU traite des minima de séparation due à la turbulence de sillage. Néanmoins d'autres contraintes sont à prendre en compte pour la définition des minima de séparation applicables opérationnels sur l'aéroport. Par exemple, sur un aéroport dont les systèmes de surveillance permettant un minimum de séparation radar de 5NM et n'accueillant que du trafic moyen et faible tonnages, la contrainte de séparation liée à la turbulence de sillage ne sera jamais limitante, le minimum de séparation radar requis étant supérieur ou égal.



Différentes catégories d'avions relatives à la turbulence de sillage selon leurs masses et envergures (au-dessus, un B737-800 (M, CAT D), en dessous, quatre Pilatus PC-7 (L, CAT F).

- Avant toute mise en œuvre opérationnelle des minima RECAT-EU, les prestataires de service de la navigation aérienne doivent réaliser localement une étude de sécurité, en vertu du règlement européen (UE) N°. 1035/2011.
- De nombreux projets de développement de procédures de la navigation aérienne intégrant le risque de rencontre avec la turbulence de sillage sont réalisés dans le cadre du programme SESAR (*Single European Sky ATM Research*). Ils visent à fournir à l'Europe des systèmes performants de gestion du trafic aérien afin de moderniser les systèmes actuels. Citons les projets déjà mentionnés supra de TBS et RECAT, ainsi que ceux réalisés en partenariat avec la DSNA : les opérations sur pistes parallèles rapprochées (CSPRs - *Closely Spaced Parallel Runways*) avec le projet WIDAO (*Wake-Independent Departure & Arrival Operations*) ou le projet de séparation diagonale à 1.5NM [FAA, 2008], les départs avec vent de travers avec le projet CREDOS (*Crosswind Reduced Separations for Departure Operations*). Des informations sur ces projets sont disponibles sur le site d'EUROCONTROL : <http://www.eurocontrol.int/>.



3.3. Séparations avec un hélicoptère

3.3.1. Un aéronef particulier

Comme tout aéronef, l'hélicoptère génère de la turbulence de sillage et le RCA/3 s'applique. Néanmoins, il peut être utile de mentionner les dispositions de l'OACI [OACI, Doc 9426] concernant les hélicoptères ainsi qu'un rapport du Bureau d'Enquêtes et Analyses pour la sécurité de l'aviation civile (BEA) [BEA, 1998] sur un accident d'ULM dû à une perte de contrôle en finale lors de la rencontre avec la turbulence de sillage d'un hélicoptère lourd.



Selon les deux sources, en raison de la géométrie particulière de la surface portante et de la faible vitesse de l'hélicoptère, certains indices laissent à penser qu'à masse égale, l'hélicoptère génère une turbulence de sillage plus intense qu'un avion.

Le BEA précise que la turbulence de sillage générée par un hélicoptère serait huit à dix fois supérieure à celle d'un avion de même masse.

Aucune étude spécifique à la turbulence de sillage hélicoptère n'ayant jamais remis en cause cette hypothèse, elle invite à la prudence lors d'opérations mixtes avion/hélicoptère, en particulier d'après l'OACI, lorsqu'un hélicoptère circule en translation dans l'effet de sol à proximité d'un aéronef de faible tonnage.



Hélicoptère sanitaire sur le départ, lors de l'atterrissage d'un Cessna Caravan.

3.3.2. Séparation vis-à-vis d'un hélicoptère en stationnaire

Il n'existe pas en France de réglementation en matière de séparation entre un aéronef et un hélicoptère en stationnaire. La réglementation anglaise [CAA, 2014] préconise une zone de sécurité autour d'un hélicoptère en stationnaire, fondée sur l'expérience opérationnelle, d'un diamètre de trois fois le diamètre du rotor de l'hélicoptère générateur.

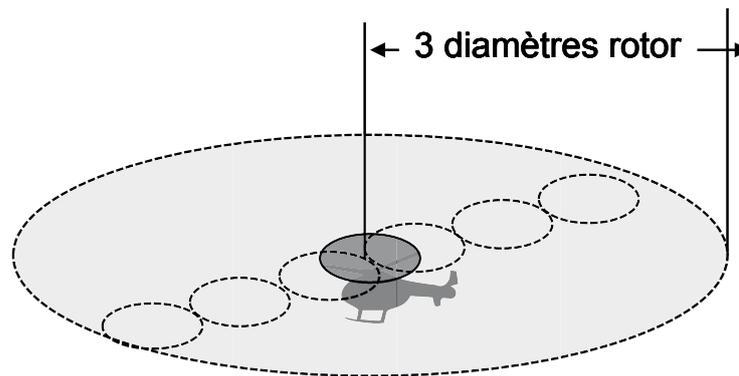


Figure 15: Zone de sécurité autour d'un hélicoptère en stationnaire.

Cet ordre de grandeur est cohérent avec les résultats d'études précédemment menées par le STAC et devrait être publié prochainement à l'OACI lors de la révision du Doc 4444 [OACI, Doc 4444].

- ↪ Les autorités anglaises, en partenariat avec des universités et le STAC, travaillent à quantifier l'effet de la turbulence de sillage générée par les voilures tournantes (hélicoptère et éoliennes) sur les avions, notamment les petits aéronefs.
- ↪ Pour limiter les interactions entre avions et hélicoptères, ces derniers peuvent être amenés à évoluer sur des infrastructures qui leur sont réservées.



ATR 72 au roulage, hélicoptère à l'atterrissage sur des infrastructures réservées sur l'aéroport de Nice-Côte d'Azur.

4. Notification d'incidents

L'expérience a montré que l'accident grave est la partie « visible » d'une suite d'incidents ou d'événements significatifs pour la sécurité des vols. En réduisant le nombre de ces événements, on peut espérer diminuer la probabilité d'accident grave. Cette réduction passe par une bonne compréhension des causes de chaque événement, rendue possible par la transparence et le partage d'informations.

4.1. L'obligation de notification pour l'aviation civile

Le **règlement européen (UE) N° 376/2014** [UE, 376/2014], abrogeant la directive 2003/42 relative aux compte-rendus d'événements dans l'aviation civile, instaure une obligation de notification pour certains types d'événements détaillés dans le **règlement d'exécution (UE) 2015/1018** [UE, 2015/1018] dont la turbulence de sillage.

En France, cette obligation de notification s'adresse aux pilotes ayant subi une turbulence de sillage sur le territoire ainsi qu'aux prestataires de service de la navigation aérienne et constructeurs aéronautiques français ayant été informés d'événements dus à la turbulence de sillage.

↳ **La notification d'événements « turbulence de sillage » dans l'aviation privée et l'aviation de loisir est, au même titre que l'aviation commerciale, couverte par le règlement européen (UE) n° 376/2014 [UE, 376/2014] et son règlement d'exécution (UE) 2015/1018 [UE, 2015/1018]. Ainsi tout pilote d'avion, de planeur, d'hélicoptère ou même d'aérostat est soumis à l'obligation de notifier les événements « Turbulence de sillage ». Les pilotes d'ULM, d'avion de construction amateur ou d'avion de collection³, sont vivement encouragés à le faire.**

Un compte-rendu d'évènement est à transmettre à l'autorité de surveillance, c'est-à-dire à la Direction de la Sécurité de l'Aviation Civile (DSAC), dans un délai de 72 heures. Il convient également de transmettre un exemplaire de ce compte-rendu aux autres entités éventuellement concernées (ex: services de la navigation aérienne, etc.) au titre d'autres règlements. Par ailleurs, une analyse de l'évènement rapporté et un classement du risque associé à cet évènement doivent également être transmis (premiers éléments sous 1 mois, analyse finale sous 3 mois).

Le compte-rendu doit être transmis (art.7) dans un format compatible avec le logiciel européen ECCAIRS (*European Co-ordination Centre for Aviation Incident Reporting System*) et la taxonomie oacienne ADREP (*Accident/Incident Data Reporting*). Cette exigence est destinée à faciliter les échanges de données ainsi que l'analyse des évènements.

Le règlement rend obligatoire certains champs du compte-rendu (date de l'évènement, lieu, type d'aéronef concerné, etc.). Les faits relatés doivent être précis et compréhensibles.

↳ **Un compte-rendu d'évènement est anonyme. Le nom de la personne qui notifie n'est pas demandé. En effet, l'aviation civile prône la « culture juste » en lieu et place de la « culture punitive ». Il s'agit de différencier la faute, de l'erreur pour instaurer un climat de confiance qui facilite le partage de l'information.**

↳ Les deux brochures de la Direction de la Sécurité de l'Aviation Civile (DSAC) présentent le règlement (UE) n° 376/2014 pour l'aviation commerciale d'une part (http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/livret_info_reglement-376-2014.pdf), et pour l'aviation de loisir et privée d'autre part (http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/flyer_aviation_de_loisir-2.pdf).

³ Tous les aéronefs dits « Annexe II » du règlement (CE) n° 216/2008 [UE, 216/2008].

4.2. Le type de notifications

Il existe des formulaires type, valables pour tout évènement, quelle que soit l'organisation. Néanmoins, certaines organisations possèdent un formulaire spécifique, adapté à leurs missions et au genre d'information qu'ils sont à même de renseigner.

Les pilotes remplissent un rapport d'incidents nommé ASR (**Air Safety Report**) qui est stocké dans une base de données propre à chaque exploitant d'aéronef et transmis à la DSAC suivant la procédure de compte-rendu d'évènements dans ECCAIRS.

Les contrôleurs de la navigation aérienne remplissent une **Fiche de Notification d'Evènement** (FNE) qui est stockée dans une base de données propre au service de la navigation aérienne et transmis à la DSAC suivant la procédure de compte-rendu d'évènements ECCAIRS.

La différence de formulaires influence la notification de données dans la mesure où le formulaire conditionne les informations recueillies. En effet, il n'est pas rare que les informations relatives à la turbulence de sillage soient dans un paragraphe dédié à la turbulence, comprendre ici le terme dans son aspect générique. Dès lors, aucune information spécifique à la turbulence de sillage comme l'angle de roulis induit, le facteur de charge induit ou la sévérité de la turbulence n'est demandée. Ainsi, la plupart du temps, ces informations ne sont pas collectées.

Pour permettre une notification d'évènement turbulence de sillage efficace, l'OACI met à disposition des formulaires de compte-rendu turbulence de sillage [OACI, 2007] à destination des pilotes, des compagnies aériennes et des contrôleurs de la navigation aérienne : <http://cfapp.icao.int/fsix/wakevortex.cfm>. Ces formulaires en plus d'être envoyés à la DSAC peuvent également faire l'objet d'un envoi à l'OACI par courrier électronique à l'adresse : wakevortex@icao.int.

Par ailleurs, pour une même information demandée, la réponse peut être différente selon le rapporteur (pilote en fonction, pilote non en fonction, contrôleur). L'appréciation est indissociable du compte-rendu d'évènement.

4.3. L'utilité de la notification

L'ensemble des informations transmises à la DSAC (compte-rendus, analyses, mesures mises en œuvre, classement au regard du risque) sont enregistrées dans la base de données nationale ECCAIRS des évènements de sécurité.

Les évènements de turbulence de sillage font l'objet d'un suivi afin de mieux appréhender ce phénomène. En 2013, le STAC a réalisé une analyse sur environ 200 évènements « turbulence de sillage », notifiés comme tels, dans la base de données ECCAIRS, de 2006 à 2012 afin d'obtenir une vision globale du phénomène tel que rapporté et de développer une méthodologie de classification des évènements (cf. section 4.4).

Les évènements les plus sévères, ainsi que les évènements récurrents font l'objet d'analyses plus détaillées afin de faire évoluer la réglementation si nécessaire.

 **Un compte-rendu est d'autant plus utile qu'il est bien renseigné.**

4.4. Classement du risque associé

Une rencontre avec une turbulence de sillage se traduit principalement par un phénomène de roulis, comme mentionné section 2. Ainsi, en première approche, une classification des événements en fonction du roulis induit peut être envisagée. C'est ce que propose l'OACI [OACI, Doc 9426] avec la **classification** à trois classes suivante :

- Fort - angle de roulis signalé dépassant 30° avec aileron braqué à fond du côté opposé;
- Modérée - angle de roulis signalé de 10 à 30°;
- Légère - angle de roulis signalé inférieur à 10°.

Sur la base de son analyse de plus de 200 événements, le STAC a proposé une classification, à quatre classes, fondées sur deux paramètres en intégrant la hauteur de la rencontre avec la turbulence de sillage en plus de l'angle de roulis induit. Plus l'avion est près du sol, plus ses marges de recouvrement sont faibles, donc plus le risque d'accident est élevé.

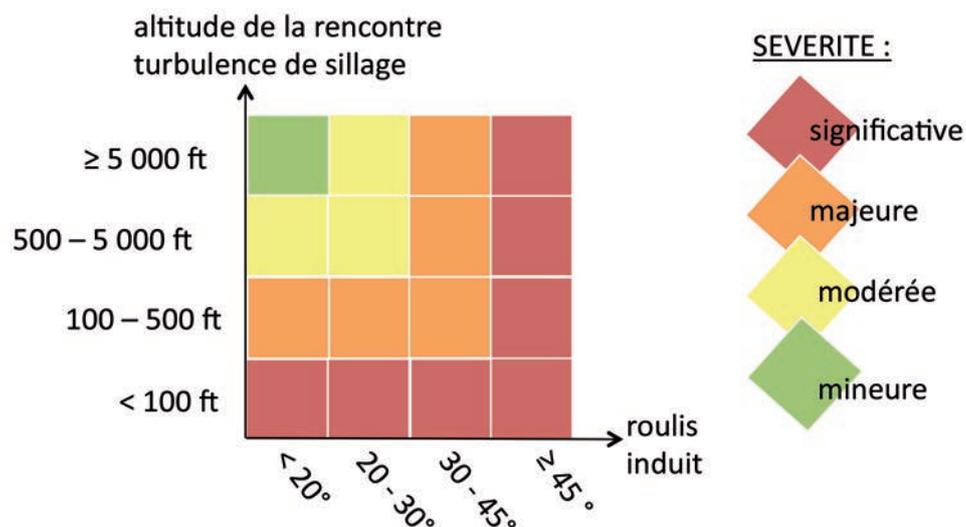


Figure 16 : Classification STAC des événements reportés "turbulence de sillage".

Néanmoins, dans la mesure où cette classification est fondée sur l'analyse d'événements notifiés pour la plupart incomplets, le STAC poursuit ses efforts pour définir une classification plus représentative.

À ce titre, il a rejoint les groupes internationaux et européens relatifs à la notification des événements.

L'objectif de ces groupes est de parvenir à un système de notification d'événements « turbulence de sillage » harmonisé, avec une classification des événements commune, permettant des analyses pertinentes sur des données internationales.

4.5. Quelques tendances

Compte tenu du nombre limité de notifications d'évènements exploitables et du caractère probabiliste du phénomène étudié, les conclusions suivantes sont majoritairement qualitatives.

En France :

- ▶ Le nombre de notifications diffère selon l'organisation qui notifie. Les prestataires de la navigation aérienne notifient davantage que les compagnies, suggérant que les pilotes notifient davantage d'évènements, oralement à la fréquence, que par un compte-rendu écrit.
- ▶ Le nombre de notifications diffère entre aéroports. Plus l'aéroport est important en termes de trafic, plus le nombre de notifications augmente. Ce résultat est cohérent avec l'application plus fréquente des minima de séparation dus à la turbulence de sillage sur les aéroports les plus contraints, ainsi qu'avec la mixité du trafic sur ces aéroports qui accueillent des gros-porteurs et des moyens tonnages.
- ▶ Les avions les plus concernés par un compte-rendu au sujet de la turbulence de sillage sont de la catégorie de turbulence Médium. Ce résultat peut s'expliquer par la nature du trafic sur les aéroports concernés sur lesquels ces catégories prédominent. Par ailleurs, il semble que les rencontres avec de la turbulence de sillage ne fassent l'objet de notifications que lorsque l'effet est important, ce qui est d'autant plus vrai que l'avion suiveur est petit.
- ▶ Le roulis induit est l'une des principales conséquences notifiées d'une rencontre avec la turbulence de sillage, très loin devant le facteur de charge induit ou la variation d'altitude induite. Le peu de compte-rendus de niveau de roulis faible laisse à penser que plus le roulis est important, plus le pilote aura tendance à notifier. Ce résultat peut également traduire une difficulté pour un pilote à identifier une rencontre avec de la turbulence de sillage lorsque l'effet sur l'avion est faible (similaire à l'effet d'une turbulence atmosphérique).
- ▶ La plupart des évènements sont notifiés en phase d'approche, avec un nombre de compte-rendus significatifs au niveau des altitudes d'interception d'ILS.
- ▶ Peu de compte-rendus font état d'une rencontre avec une turbulence de sillage en dessous des 500 ft ou en dessous des 100 ft.
- ▶ Suite à une rencontre avec une turbulence de sillage à l'approche, au moins un avion sur trois procède à une approche interrompue sur décision des pilotes en raison d'une approche non-stabilisée.
- ▶ La configuration la plus courante notifiée est un suiveur sur la même trajectoire que le générateur.
- ▶ Dans plusieurs occurrences, un désengagement du pilote automatique (majoritairement volontaire) est notifié.

4.6. Notifications des évènements « Turbulence de sillage » générée par un hélicoptère

La plupart des accidents impliquant la turbulence de sillage générée par un hélicoptère ont lieu sur des aérodromes accueillant un trafic mixte hélicoptère/avion.

Ils impliquent un avion de faible tonnage qui subit une perte de contrôle menant à une collision avec le terrain suite à la rencontre avec le souffle rotor d'un hélicoptère lourd.

En France, aucun incident ou accident de ce type n'a été notifié.

Cette absence de notification s'explique vraisemblablement davantage par une faible utilisation du système de notification d'évènements dans l'aviation de loisir, majoritairement concernée par la turbulence de sillage hélicoptère, que par une absence du phénomène en lui-même.



Helicoptère EC-145 en approche finale. Au premier plan, deux Piper PA18.

Bibliographie

Description du phénomène

Règlementation

- › FAA, October 2014, Advisory Circular AC 90/23-G Aircraft wake turbulence
- › OACI, Doc. 9426-AN/924,1984, Manuel de planification des services de la circulation aérienne – première édition

Recherche et développement

- › Burnham DC, Hallock, July 1982, Chicago monostatic acoustic vortex sensor system, Report No. DOT-TSC-FAA-79-103.IV, 206p
- › Étude numérique d'écoulements tourbillonnaires de sillage d'avion, thèse de Laurent Nybelen, Université de Toulouse, 2008.
- › CD. Donaldson, A. Bilanin, 1975, Vortex Wakes of Conventional Aircraft, AGARDograph No. 204
- › T. Gerz et al., 2002, Commercial aircraft wake vortices, Progress in Aerospace Sciences 38, 181-208
- › Météo France, 2007, Fiche Turbulence: La Turbulence, 4p
- › M. Satoh, 2013, Atmospheric Circulation Dynamics and General Circulation Models, 729p
- › T. Sarpkaya, R. E. Robins, and D. P. Delisi., 2001, Wake-Vortex Eddy-Dissipation Model Predictions Compared with Observations, Journal of Aircraft, Vol. 38, No. 4, pp. 687-692
- › WakeNet, 2012, Aircraft Wake Vortex State-of-the-Art & Research Needs, WakeNet3-Europe, 198p.

Effets sur les aéronefs

Règlementation

- › CAA, 2014, Aeronautical Information Circular AIC P 3/2014Wake Turbulence, Civil Aviation Administration
- › FAA, October 2014, Advisory Circular AC 90/23-G Aircraft wake turbulence, Federal Aviation Administration

Recherche et développement

- › I De Visscher et al., 2015 (1), A Simple Wake Vortex Encounter Severity Metric Rolling Moment Coefficient due to Encounter of an Aircraft with a Wake Vortex, Eleventh USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar
- › I De Visscher et al., 2015 (2), Characterization of Aircraft Wake Vortex Circulation Decay in Reasonable Worst Case Conditions, published by the American Institute of Aeronautics and Astronautics, Copyright © 2015 by EUROCONTROL
- › J. N. Hallock et al, 2015, Use of Simple Models to Determine Wake Vortex Categories for New Aircraft, 7 th AIAA Atmospheric and Space Environments Conference

Rapports

- › ECTL, 2015, European proposal for revised wake turbulence categorisation and separation minima on approach and departure – RECAT-EU – Safety case report, V1.3, par EUROCONTROL

Séparations entre les aéronefs

Règlementation et Lettres aux États

- › FAA, mai 2008, JO 7 110,308, 1.5-Nautical Mile Dependent Approaches to Parallel Runways Spaced Less Than 2,500 Feet Apart, Federal Aviation Administration
- › FRANCE, RCA/3 modifié, 2015, Arrêté du 23 novembre 2015 modifiant l'arrêté du 6 juillet 1992 modifié relatif aux procédures pour les organismes rendant les services de la circulation aérienne aux aéronefs de la circulation aérienne générale
- › FRANCE, AIC 03/16, 2016, AIC France A 03/16 du 11 février relative à la mise en œuvre des minimums de séparation liés à la turbulence de sillage associés au système de classification européen des aéronefs RECAT-EU sur les aéroports de Paris-Charles de Gaulle, Paris-Le Bourget et Pontoise-Cormeilles-en-Vexin à compter du 22 mars 2016.
- › OACI, Doc 4444-ATM/501, 2001, Gestion du trafic aérien, procédures pour les services de navigation aérienne (PANS) - quatorzième édition
- › OACI, Doc. 9426-AN/924,1984, Manuel de planification des services de la circulation aérienne – première édition
- › OACI, 2008, Guidance on A380-800 Wake Vortex Aspects, State Letter TEC/OPS/SEP-08-2094.SLG, 30 June 2008

Rapports

- › BEA, 1998, Rapport relatif à l'accident survenu le 8 janvier 1998 sur l'aérodrome de Valence (26) à l'ULM Air Création Racer 503 SL identifié 83-IA.
- › ECTL, 2015, European proposal for revised wake turbulence categorisation and separation minima on approach and departure – RECAT-EU – Safety case report, V1.3, par EUROCONTROL

Notification d'incidents

Règlementation et Lettres aux États

- › Règlement (UE) n° 376/2014 du Parlement européen et du Conseil du 3 avril 2014 concernant les comptes rendus, l'analyse et le suivi d'événements dans l'aviation civile, modifiant le règlement (UE) n° 996/2010 du Parlement européen et du Conseil et abrogeant la directive 2003/42/CE du Parlement européen et du Conseil et les règlements de la Commission (CE) n° 1321/2007 et (CE) n° 1330/2007
- › Règlement d'exécution (UE) 2015/1018 de la Commission du 29 juin 2015 établissant une liste classant les événements dans l'aviation civile devant être obligatoirement notifiés conformément au règlement (UE) n° 376/2014 du Parlement européen et du Conseil (Texte présentant de l'intérêt pour l'EEE)
- › Règlement (CE) n° 216/2008 du Parlement européen et du Conseil du 20 février 2008 concernant des règles communes dans le domaine de l'aviation civile et instituant une Agence européenne de la sécurité aérienne, et abrogeant la directive 91/670/CEE du Conseil, le règlement (CE) n° 1592/2002 et la directive 2004/36/CE (JO L 79 du 19.3.2008, p. 1).
- › OACI, 2007, Collecte de renseignements sur les rencontres de turbulence de sillage, Lettre aux États AN 13/4-07/67 du 26 octobre 2007

Glossaire

ADREP: Accident/Incident Data REPorting

AESA: Agence Européenne de la Sécurité de l'Aviation Civile

ASR: Air Safety Report

BEA: Bureau d'Enquêtes et d'Analyses pour la sécurité de l'aviation civile

CAA: Civil Aviation Authority

CAT: CATégorie

CREDOS: Crosswind Reduced Separations for Departure Operations

CSPR: Closely Spaced Parallel Runways

DSAC: Direction de la Sécurité de l'Aviation Civile

DSNA: Direction des Services de la Navigation Aérienne

ECCAIRS: European Coordination Centre for Aviation Incident Reporting System

ECTL: Eurocontrol

EDR: Eddy Dissipation Rate

FAA: Federal Aviation Authority

FAL: Free Art Licence

FNE: Fiche de Noticifation d'Evènement

H: Heavy

IFR: Instrument Flight Rules

ILS: Instrument Landing System

J: super Heavy

L: Light

LIDAR: Light Detection And Ranging

M: Médium

MSR: Minimum de Séparation Radar

N: Constante Brunt-Väisälä

OACI: Organisation Internationale de l'Aviation Civile

PWS: Pair Wised Separation

RCA: Règlementation de la Circulation Aérienne

RECAT: re-catégorisation des avions et réductions des minima de séparation dus à la turbulence de sillage associée

RMC: Rolling Moment Coefficient

SESAR: Single European Sky Atm Research

STAC: Service Technique de l'Aviation Civile

TBS: Time Based Separation

UE: Union Européenne

ULM: Ultra-Léger Motorisé
VFR: Visual Flight Rules
WDS: Weather Dependent Separation
WIDAO: Wake Independent Departure & Arrival Operations

B: envergure de l'avion générateur
 b_0 : distance d'espacement initial des tourbillons
 b_f : envergure de l'avion suiveur
ft: pieds
g: accélération de la pesanteur
 Γ : circulation du tourbillon
 Γ_0 : circulation initiale du tourbillon
 Γ_{tot} : circulation totale du tourbillon
m: mètre
M: masse
M: Moment de roulis induit
NM: mille nautique
 ρ : masse volumique de l'air
rad: radian
s: secondes, paramètre fixe représentatif de la forme d'une aile
 S_f : surface alaire du suiveur
 t_0 : durée caractéristique du tourbillon
V: vitesse de l'aéronef générateur
 V_f : vitesse de l'avion suiveur
 V_0 : vitesse de descente des tourbillons

Conception: STAC/SINA groupe Documentation et diffusion des connaissances (DDC)

Couverture © Steve MORRIS

Photos intérieures: © Jahons BRAD/Wikimedia Commons page 17
© Vincent COLIN/DGAC - STAC page 25
© Sylvain CAMBON/DGAC - STAC page 15
© DLR, CC-BY 3.0 page 20
© Marie-Ange FROISSART/DGAC - STAC pages 22, 34
© Stefan KRAUSE/Wikimedia Commons page 9
© Richard METZGER/DGAC - STAC pages 9, 23, 32, 33
© Pixabay pages 19, 22, 31
© Véronique PAUL/DGAC - STAC page 26
© Isabelle ROSSI/DGAC - STAC pages 21, 33
© Nicolas TURCOT/DGAC - STAC page 39
© Martin VISSER/Wikimedia Commons page 8

Illustration/Dessin: © STAC

Avril 2016



service technique de l'Aviation civile
CS 30012
31, avenue du Maréchal Leclerc
94385 BONNEUIL-SUR-MARNE CEDEX
Tél. 33 (0) 1 49 56 80 00
Fax 33 (0) 1 49 56 82 19

Site de Toulouse
9, avenue du Docteur Maurice Grynfolgel - BP 53735
31 037 TOULOUSE CEDEX
Tél. 33 (0) 1 49 56 83 00
Fax 33 (0) 1 49 56 83 02

Centre de test de détection d'explosifs
Centre d'essais de lancement de missiles - BP 38
40 602 BISCARROSSE CEDEX
Tél. 33 (0) 5 58 83 01 73
Fax 33 (0) 5 58 78 02 02