

Direction
générale de
l'Aviation civile

Service
technique de
l'Aviation civile

Décembre 2013

Séparations des voies de circulation pour aéronefs de code C

Note d'information technique




Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE


Ministère
de l'Écologie,
du Développement
durable
et de l'Énergie


dgac

Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie

www.stac.aviation-civile.gouv.fr

STAC

Contexte : une contribution aux travaux de l'OACI

L'étude menée par le STAC s'inscrit dans le cadre de la révision par le Panel Aéroports de l'OACI des séparations des voies de circulation (taxiways) définies dans l'annexe 14 à la convention de Chicago. Cette révision propose une simplification du calcul des distances de séparation, aboutissant à la réduction de ces distances pour tous les codes hormis le code C.

Le projet de révision

Actuellement, les distances de séparation des voies de circulation sont calculées pour tout code par la formule $V = X + Y + Z$ où :

- ▲ X l'écart latéral maximal à l'axe de la voie de circulation, équivalent à la distance minimale de dégagement entre la roue extérieure du train principal et le bord de la voie (valeur de conception),
- ▲ Y l'envergure ou la demi-envergure de l'appareil critique du code considéré,
- ▲ Z une marge de sécurité dont la valeur varie selon les codes et le type de séparation

Le projet de révision consiste à remplacer les valeurs X et Z par une marge unique M, valant 8 mètres pour les codes A à C et 11 mètres pour les codes D à F.

Code de référence aéroport	Écart latéral X	Intervalle Z	Marge totale (X + Z)	Futures marges M
Code A	1,5	7,25	8,75	8
Code B	2,25	7,25	9,5	8
Code C	3	5	8	8
Code D	4,5	10	14,5	11
Code E	4,5	10,5	15	11
Code F	4,5	13	17,5	11

Tableau 1 : Marges de séparation voie de circulation-objet.

Les voies de circulation de code C constituent un enjeu particulier pour cette révision, car elles présentent les marges de sécurité les plus réduites dans la réglementation actuelle (voir tableau ci-dessus); de plus, la plupart des études sur les déviations d'aéronefs ont porté essentiellement sur les codes D à F.

Pour compléter le corpus technique, le STAC a mené une étude d'évaluation du risque associé aux séparations actuelles de code C en effectuant l'analyse statistique de données de déviation d'appareils au roulage sur des voies de circulation de l'aéroport Charles-de-Gaulle (LFPG).

Moyens : l'exploitation de données d'études passées

Des campagnes de mesures de déviation sur voies de circulation ont été réalisées entre 2002 et 2005 sur les voies de code E Bravo et Québec. Ces mesures de déviation, réalisées à l'aide d'une grille de capteurs piézocéramiques disposés en « Z » détectant le passage des trains d'atterrissage, constituent une base de données de 70 271 mouvements d'appareils, dont 48 581 de code C.

Une étude de THALES pour les Aéroports de Paris a exploité ces données en 2004 pour l'analyse des déviations des aéronefs de code E au roulage. Les données postérieures à l'étude THALES ont permis à Aéroports de Paris de confirmer que ses conclusions étaient toujours valides après inversion des sens de circulation.



Figure 1: Position des sites de mesure.

Le diagramme des quartiles ci-dessous représente les valeurs de déviation latérale des appareils par code aéronef. On constate que les valeurs extrêmes de déviation pour les codes B et C dépassent l'écart latéral maximal sur voie de circulation de code correspondant (lignes en pointillé sur le diagramme), quand les déviations pour les appareils de code D et E sont moins dispersées. Les déviations au roulage apparaissent plus importantes sur les voies de circulation "surdimensionnées": l'analyse des données de code C est donc conservatrice, les voies de circulation étudiées étant de code E.

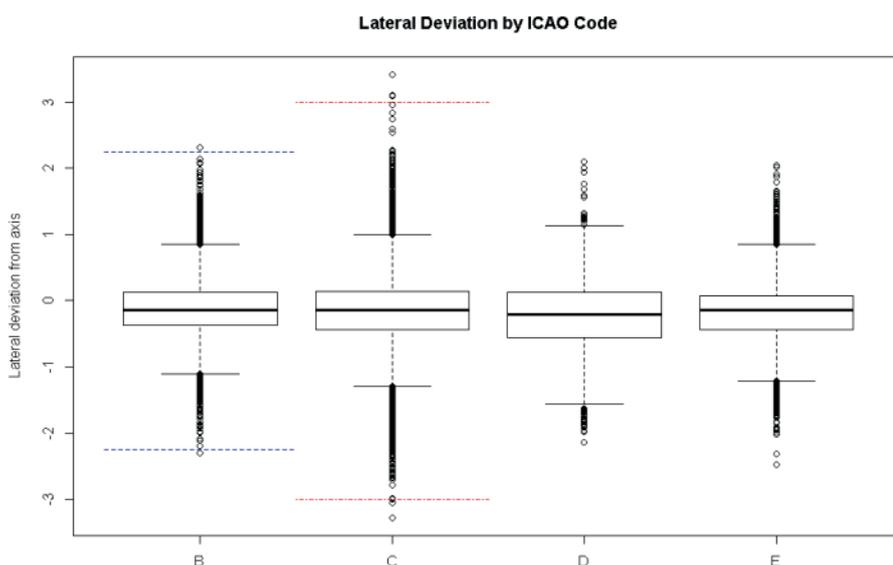


Figure 2: Déviation latérale par code aéronef.

Méthodologie : analyse statistique aux valeurs extrêmes

Les données étudiées ont été collectées en deux phases distinctes (2002-2003 pour l'étude initiale, et 2003-2005 pour le seul site QUÉBEC). Le plan de circulation de la plateforme ayant changé dans l'intervalle l'agrégation des données apparaît peu probante, d'autant que la répartition des déviations latérales est asymétrique pour chaque site, le sens préférentiel dépendant des manœuvres des appareils. Pour éviter les biais potentiels introduits par les méthodes d'agrégation et pour pouvoir contrôler la convergence de la méthode, l'analyse statistique a été réalisée sur six sous-populations classées par période, site de mesure et sens de circulation. La valeur absolue des déviations latérales a été étudiée.

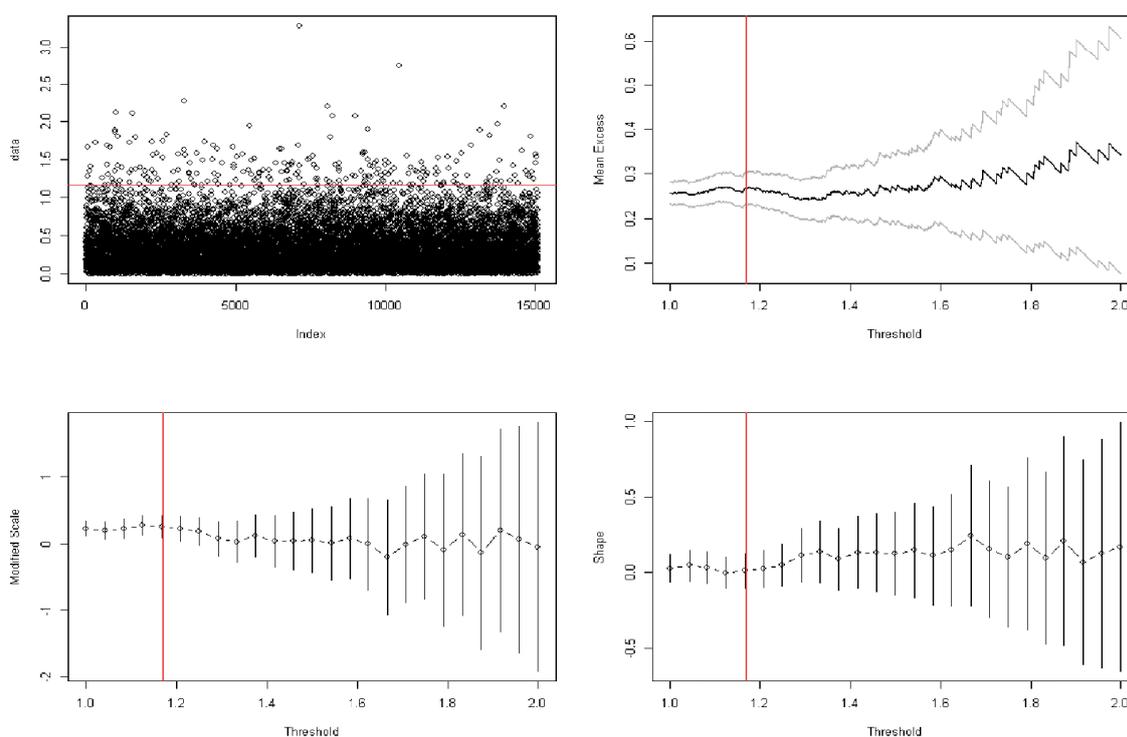


Figure 3: Graphiques de recherche de seuil (sous-groupe Q.SN2, seuil= 1,17m).

L'analyse statistique a fait appel à la théorie des valeurs extrêmes, appliquant la méthode « *peak over threshold* » (POT) pour isoler les valeurs représentatives de la queue de distribution. Les probabilités de déviations extrêmes ont été modélisées par un modèle de Pareto généralisé (GPD).

Pour chaque sous-groupe, un seuil u a été déterminé visuellement d'après la fonction empirique d'excès moyen (2^{ème} graphique de la figure 3, en haut à droite), en choisissant une valeur autour de laquelle la fonction est linéaire. Les valeurs de déviation retenues pour modéliser le comportement de la queue de distribution sont les valeurs dépassant ce seuil (cf. 1^{er} graphique), d'où le nom de la méthode POT. À partir de cette population, on peut définir une approximation numérique des paramètres d'échelle σ (3^{ème} graphique) et de forme ξ (4^{ème} graphique) de la fonction de Pareto modélisant les déviations extrêmes.

Le signe du paramètre de forme ξ définit le comportement de la queue de distribution, donc les probabilités de déviations extrêmes. Pour $\xi < 0$ notamment (domaine d'attraction de la loi de Weibull inversée) la fonction de répartition présente une borne supérieure, interdisant le calcul d'une probabilité de déviation au-delà de ce seuil (pour $\xi >= 0$, la fonction de répartition du modèle est non bornée). Ce type de résultat ne permettant pas de quantifier le risque associé aux séparations, des tests d'incertitude ont été réalisés sur la valeur estimée du paramètre de forme ξ pour tenter d'écartier une valeur négative. Pour chaque sous-groupe, l'intervalle de confiance sur la valeur estimée de ξ (représenté par les barres du 3^{ème} graphique, Figure 3) a donc été calculé. Des tests de fiabilité ont été réalisés pour discriminer les hypothèses de signe sur cet intervalle (ANOVA, critère AIC). Pour chaque sous-groupe, le modèle de déviation retenu obéit à la loi de Gumbel ($\xi=0$) et présente donc le même type de fonction de répartition, avec des seuils u et paramètres d'échelle σ variables.

Résultats de l'étude et confrontation au corpus technique

La Figure 4 présente les principaux résultats de l'étude, ainsi que des éléments de comparaison. Chaque courbe représente la probabilité par opération de déviation latérale à l'axe de la voie de circulation (en valeur absolue); les lignes pointillées représentent les seuils accidentogènes, avec en orange l'écart latéral maximal X (sortie de piste) et en rouge la distance de séparation minimale taxiway-objet actuelle.

Les six modèles de Pareto correspondant aux sous-groupes étudiés sont représentés en vert et bleu, avec les valeurs maximales de chaque échantillon et leur fréquence présentées par des symboles. On constate que le modèle le plus pessimiste correspond à l'échantillon Q.NS2 (taxiway QUÉBEC, sens nord-sud, 2003-2005), avec une probabilité estimée de franchissement de la séparation de l'ordre de $8 \cdot 10^{-11}$. Comme indiqué plus haut, ces modèles s'appuyant sur des données collectées sur voie de circulation de code E ils sont supposés conservatifs. **Considérant un niveau de risque acceptable de 10^{-7} pour les opérations au sol, la marge de séparation actuelle répond très largement aux exigences de sécurité.**

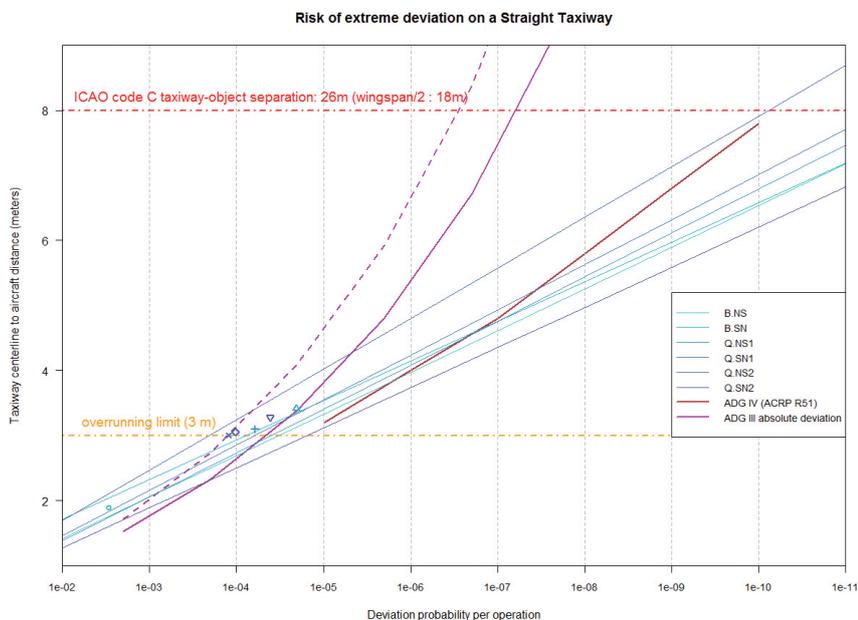


Figure 4 : Résultats des analyses statistiques des études ACRP R51, FAA/Boeing 2013, STAC 2013.

Une comparaison avec différents travaux relatifs au risque associé aux distances de séparation a été menée pour conforter la validité de l'étude et de ses conclusions.

L'ACRP Report 51

L'ACRP Report 51 « Risk Assessment Method to Support Modification of Airfield Separation Standards », étude réalisée en 2011 pour la FAA et qui a alimenté les travaux du Panel aérodrome, inclut une évaluation du risque d'accident sur voie de circulation basée sur l'analyse statistique de déviations d'aéronefs de catégorie ADG V (équivalent code E). **Le modèle, basé sur une méthode différente de celle retenue pour l'étude (Generalized Extreme Values, dite GEV), aboutit à des résultats similaires à ceux de l'étude STAC, avec un risque estimé de l'ordre de 10^{-10} .** Ces résultats sont représentés sur la Figure 4 par la courbe rouge. Le risque associé aux séparations de code C est approché ici par extrapolation du comportement d'aéronefs plus lourds, limitant la portée de la comparaison avec l'étude du STAC.

L'analyse statistique FAA/Boeing

Une étude de 2013, menée conjointement par la FAA et Boeing dans le cadre du *Cooperative Research and Development Agreement* (CRDA), a réalisé l'analyse statistique de données de déviation d'aéronefs de code C (ADG III pour la nomenclature FAA) sur des voies de circulation de code C de quatre aéroports: West Palm Beach International (PBI2), Salisbury-Ocean City Wicomico Regional Airport (SBY), Westchester County Airport (HPN) et Key West International Airport (EYW).

Les données ont été collectées de 2010 à 2012, à l'aide d'un alignement de quatre lasers mesurant la distance au bord extérieur du train principal. Un total de 8650 déviations d'appareils de code C a été recueilli, avec des proportions disparates (de 232 à 4018 mouvements selon les sites). Des méthodes d'ajustement de biais et de centrage ont été utilisées pour agréger les données; l'analyse statistique a été menée en traitant séparément les déviations de part et d'autre de l'axe de voie et en retenant le modèle le plus conservatif.

L'analyse statistique aux valeurs extrêmes utilise quatre méthodes de recherche de seuil (*Extreme Value Index*, "t" based criteria, *Median Excess Over Threshold*, *bootstrap quantile estimates*) et trois approches distinctes pour structurer les données: séparation aléatoire (Booker, 1995), somme de l'ensemble des valeurs uniques appariées (Scholtz, 2005), et "Random Pass Splitting" (introduit par l'étude).

Les résultats obtenus sont représentés par les courbes mauves sur la Figure 4, la courbe en pointillés représentant l'intervalle de confiance à 95 %. On constate que **le modèle issu de cette étude est plus pessimiste que les résultats obtenus par le STAC, avec une probabilité de franchissement de la séparation estimée à 6.10^{-8} par mouvement** (3.10^{-7} pour l'intervalle de confiance à 95 %). L'étude conclut cependant également à un niveau de sécurité satisfaisant pour les séparations de code C, la probabilité d'accident étant en deçà du niveau de risque admissible (10^{-7}).

La différence de résultats entre les deux études interpelle, d'autant que la base de données d'ADP, comportant plusieurs déviations au-delà de l'écart latéral maximal sur voie de circulation de code C, apparaît a priori plus pénalisante que celle de l'étude américaine sur voies plus étroites. La méthodologie américaine, en particulier l'utilisation d'une méthode d'agrégation par centrage et redressement des échantillons, s'est avérée substantiellement plus conservatrice que celle développée par le STAC.

Le graphique montre que, dans l'intervalle de 1 à 3 mètres, la probabilité de déviation est plus faible sur les voies de circulation de code C (étude FAA/Boeing) que sur les voies de code E (étude STAC). Cet élément vient appuyer le constat fait en étudiant la distribution par code des déviations latérales (Figure 1), à savoir que **les déviations à l'axe de voie observées pour un code aéronef tendent à augmenter sur les voies de circulation « surdimensionnées »**.

Note: la méthode aux valeurs extrêmes vise avant tout à modéliser le comportement de la queue de distribution: l'étendue de celle-ci dans les données utilisées pour bâtir les modèles et les paramètres de seuil choisis rendent la comparaison entre études pertinente autour de l'intervalle 1-3 mètres; au-delà, la méthode apparaît très sensible aux choix de paramètres des modèles.

L'accidentologie

Airbus a réalisé en juin 2013 un recueil des sorties de voies de circulation référencées de 1980 à 2011; ce renvoi à l'accidentologie met en évidence les limites de l'emploi de la théorie des valeurs extrêmes comme méthode d'évaluation du risque.

Du 1^{er} janvier 1980 au 31 décembre 2011, 106 événements de sortie de voie de circulation en section droite ont été référencés, tous code de voies et d'aéronefs confondus. D'après les statistiques de l'OACI sur le nombre de vols sur cette période, soit $5,89.10^8$ départs dans le monde, la probabilité observée de sortie de voie est de l'ordre de $1,8.10^{-7}$ par vol. 61 % de ces sorties impliquent des appareils mono-couloirs, parmi lesquels les aéronefs de code C. Ces événements n'ont entraîné aucun dommage aux appareils dans 76 % des cas, et seules deux occurrences (toutes deux concernant des aéronefs de code C) impliquent des blessés. Sur cette même période, aucune collision avec un objet ou un aéronef circulant sur une voie de circulation parallèle n'a été observée.

D'après ces statistiques, les modèles aux valeurs extrêmes appliqués aux données de déviation latérale d'aéronefs au roulage donnent une estimation très pessimiste de la probabilité de sortie de voie de circulation entraînant une collision avec un obstacle. De même, la probabilité de sortie de voie de circulation, respectivement estimée à 5.10^{-5} (ADGIII) et 2.10^{-4} (Q.NS2), apparaît surestimée, bien que l'accidentologie ne référence pas les événements mineurs.

Conclusions

L'étude du STAC ainsi que l'étude préliminaire FAA/Boeing, en appliquant la méthode aux valeurs extrêmes à des données de déviation d'aéronefs au roulage, aboutissent à la conclusion que les distances de séparation actuelles entre une voie de circulation de code C et un objet satisfont aux exigences de sécurité, considérant un niveau de risque acceptable de 10^{-7} pour les opérations au sol.

Les résultats numériques des deux études diffèrent, en raison des différences entre les bases de données exploitées et des méthodes de modélisation de queue de distribution employées.

Dans les deux cas présentés, l'évaluation du risque en utilisant la méthode aux valeurs extrêmes produit des résultats pessimistes par comparaison à l'accidentologie. La comparaison des deux études permet par ailleurs de conforter la logique de révision des distances de séparation en validant pour les aéronefs de code C l'hypothèse d'une augmentation des déviations latérales sur les voies de circulation « surdimensionnées ».

Références

Doc 9157 – manuel de conception des aérodromes – partie 2: voies de circulation, v4, 2009.

ACRP Report 51 – *Risk Assessment Method to Support Modification of Airfield Separation Standards*, FAA/ARA, 2011.

ADWG/12-DP/10¹ – *Comprehensive View of Annex 14 Taxiway and Taxilane Separation Standards*, ICCAIA and ACI-World, 2012.

ADWG/13-DP/2 – *Accident/incident lateral taxiway excursions analysis*/ICCAIA.

Analyse statistique et graphiques réalisés sous R (analyse: *packages* POT, mgcv, ismev, evd; graphiques: lattice).

¹ L'ADWG (Aerodrome Design Working Group) est le groupe de travail du Panel Aérodromes chargé de la révision des spécifications de conception des aérodromes.



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 Grynfogel - BP 53 735
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