

Soutenance de thèse

Timothé KRAUTH soutiendra sa thèse de doctorat, préparée au sein de l'équipe d'accueil doctoral ISAE-ONERA MOIS et intitulée «*Modèle génératif profond pour l'estimation de probabilité de collision en vol*»

Le 5 avril 2024 à 14h00, salle des thèses, ISAE-SUPAERO

devant le jury composé de

M. Jérôme MORIO	ONERA	Directeur de thèse
M. Bertrand MICHEL	Ecole Centrale Nantes	Rapporteur
M. R. John HANSMAN	Massachusetts Institute of Technology	Rapporteur
Mme Nathalie BARTOLI	ONERA	
M. Junzi SUN	TU Delft	
M. Xavier OLIVE	ONERA	Co-directeur de thèse

Résumé : Il est essentiel de calculer la probabilité de collisions aériennes pour optimiser le trafic aérien tout en maintenant de hauts standards de sécurité. Cette nécessité s'est accentuée dans les années 1960 avec l'augmentation du trafic aérien commercial transatlantique. Initialement, les modèles analytiques tels que ceux de Reich et Anderson-Hsu étaient les références pour évaluer les risques de collision en vol, mais s'avèrent peu adaptés aux espaces aériens complexes autour des aéroports. Les méthodes basées sur les données, et en particulier les simulations de Monte-Carlo, sont devenues une alternative prometteuse pour l'évaluation du risque de collision. Elles offrent une grande flexibilité grâce à des hypothèses simplifiées, les rendant adaptables à divers contextes. Toutefois, les simulations de Monte-Carlo classiques se révèlent peu efficaces pour estimer les probabilités d'événements rares, nécessitant un grand nombre de trajectoires d'avions et des ressources computationnelles importantes. Cette thèse propose un modèle de risque de collision basé sur les simulations de Monte-Carlo, utilisant un modèle de génération de trajectoires pour pallier ces limitations dues aux événements rares. Ces méthodes génératives reproduisent fidèlement les distributions de trajectoires observées tout en intégrant les incertitudes dues à des facteurs externes. Trois axes de recherche principaux sont définis : (i) le développement d'une méthode de génération de trajectoires, (ii) la construction d'un modèle de risque de collision basé sur les méthodes de Monte-Carlo utilisant des trajectoires synthétiques, et (iii) l'amélioration de l'interprétabilité des estimations du risque de collision. La génération d'échantillons synthétiques nécessite l'estimation de la distribution des données observées pour garantir une distribution identique des nouveaux échantillons. C'est particulièrement important pour les trajectoires aériennes, où le modèle doit refléter les incertitudes causant des écarts par rapport aux trajectoires nominales. Nous avons d'abord utilisé des méthodes d'apprentissage statistique traditionnelles pour estimer des trajectoires aériennes complexes en deux dimensions. Malgré la réduction de la dimensionnalité du problème, les méthodes conventionnelles peinent à estimer les distributions en grande dimension. Nous avons alors exploré l'utilisation des autoencodeurs variationnels pour une estimation plus fine de la densité de probabilité. Convenablement adaptés aux applications de séries temporelles multivariées, les autoencodeurs variationnels se révèlent efficaces pour estimer la distribution de trajectoires aériennes complexes. En utilisant la méthode de génération développée, nous estimons alors le risque de perte de séparation induit par les procédures de décollage et d'atterrissage de l'aéroport de Paris-Orly à l'aide de simulations de Monte-Carlo. L'emploi d'une méthode de génération de trajectoires se révèle prometteur, permettant de créer l'équivalent de 20 ans de trajectoires aériennes à partir de seulement deux mois d'observations. Toutefois, les contraintes inhérentes aux méthodes classiques de Monte-

Carlo ne sont pas réellement surmontées mais simplement différées par la production d'un ensemble de trajectoires de taille arbitrairement grande. Le travail final de cette thèse unifie les cadres de l'autoencodeur variationnel et de la quantification de l'incertitude. Il démontre comment les autoencodeurs variationnels peuvent construire des distributions d'entrée adaptées pour les algorithmes de quantification de l'incertitude, améliorant la fiabilité des simulations de Monte-Carlo grâce au subset simulation et l'explicabilité de l'estimation de la probabilité de collision en vol par l'analyse de sensibilité. Plus généralement, nous avons montré que l'autoencodeur variationnel représente un outil prometteur à associer aux problèmes de quantification d'incertitudes.

Mots clés : Probabilité d'événements rares, Méthodes de Monte-Carlo, Modèles génératifs profonds, Quantification de l'incertitude, Autoencodeurs variationnels, Gestion du trafic aérien

Summary: In the field of aviation safety, assessing the probability of collisions is of paramount importance. Despite the high level of safety in civil aviation, making collisions rare, the analysis of such risks remains critical. The challenge lies in balancing safety and efficiency by closely managing the probability of in-flight collisions associated with airport movements. Traditional models, like those by Reich and Anderson-Hsu, have been influential but insufficient to capture the complexity of terminal manoeuvring areas. Against this backdrop, data-driven approaches are emerging, with Monte Carlo simulations offering a more flexible methodology for collision risk estimation. However, standard Monte Carlo simulations are not suited for assessing extremely low probabilities, making them poorly applicable to estimating the risk of mid-air collisions. Therefore, this thesis focuses on developing techniques that merge advanced uncertainty quantification methods with variational autoencoders, aiming to establish a more appropriate framework for the estimation of rare event probabilities.

Keywords: Rare event probability, Monte Carlo methods, Deep generative models, Uncertainty quantification, Variational autoencoders, Air traffic management