



Contributions à la compréhension de la formation et de l'atténuation possible
des traînées de condensation de l'aviation
*Contributions to the understanding of the formation and possible mitigation of
aviation contrails*

Soutenance de thèse – Pierre SAULGEOT

Mercredi 20 décembre 2023 à 14 H 00

En présentiel : Salle AY-02-63 – Onera Meudon

En distanciel Jitsi (à utiliser avec le navigateur Chrome) :

https://rdv.onera.fr/these_pierre_saulgeot_soutenance

Devant le jury composé de :

- **Directeur de Thèse :**
 - * Laurent JACQUIN (Directeur de la branche Mécanique des Fluides Énergétique), ONERA, France (Professeur), Ecole Polytechnique, Saclay, France
- **Rapporteurs :**
 - * Roberto PAOLI (Professeur associé), Polytechnique Montréal, Canada
 - * Pierre BRANCHER (Professeur des universités), Université Toulouse 3, directeur adjoint IMFT
- **Examineurs :**
 - * Thomas GERZ (Chercheur), Institut de la physique atmosphérique, DLR Oberpfaffenhofen-Wessling
 - * Riwal PLONGONVEN (Professeur), École Polytechnique, chercheur au LMD, Saclay, France
 - * Arnaud ANTKOWIAK (Professeur), Sorbonne Université, Paris, France
 - * Claire SARRAT (Ingénieur de recherche), ONERA DTIS/RIME, Toulouse, France
- **Encadrant :**
 - * Vincent BRION (Responsable d'unité, ingénieur de recherche), ONERA DAAA/AMES, Meudon, France
- **Invités :**
 - * Nicolas BONNE (co-encadrant, ingénieur de recherche, ONERA DMPE/CMEI),
 - * Emmanuel DORMY (co-directeur de thèse, professeur, directeur de recherche, ENS)

---0---

Résumé / Abstract

Les traînées de condensation sont des nuages de glace qui se forment dans le sillage des avions. L'évaluation de leur impact environnemental est au cœur des enjeux actuels de l'aéronautique civile.

Ce problème est rendu difficile par la multiplicité des échelles spatiales et temporelles et des phénomènes physiques mis en jeu. Ces traînées, qui prennent naissance à la sortie des moteurs d'avion, évoluent très rapidement alors qu'elles sont encore proches de l'avion (sur des distances de l'ordre de quelques envergures), mais ne se transforment potentiellement que beaucoup plus loin en des cirrus induits, dont l'extension peut aller jusqu'à plusieurs centaines de kilomètres carrés agit négativement sur le bilan radiatif terrestre.

Dans ce contexte, cette thèse s'intéresse aux effets du champ proche de l'aéronef sur les propriétés de ces traînées de condensation. Plus spécifiquement, il s'agit de préciser la manière dont les tourbillons de sillage, aussi appelés tourbillons marginaux, modifient la répartition des panaches issu des moteurs et la

condensation de la vapeur d'eau en glace, depuis leur enroulement jusqu'à leur déstabilisation loin derrière l'aéronef. La stratification thermique (ou en densité) de l'atmosphère joue un rôle majeur dans cette phase de l'évolution du sillage et constitue un des paramètres clés de l'étude. En particulier, le mouvement naturel des tourbillons est de descendre, mais un sillage secondaire peut se créer dans leur voisinage puis remonter jusqu'à l'altitude de vol dans les environnements stratifiés de manière non adiabatique. Le sillage est alors séparé en deux composantes distinctes et les panaches issus des moteurs peuvent se retrouver pris dans l'un ou l'autre, notamment en fonction de leur position initiale. En zone sursaturée (par rapport à la saturation en glace de l'atmosphère), cela influence fortement la condensation, et donc l'impact radiatif de la traînée produite. Un second paramètre de l'étude est la position relative des jets moteurs. L'objectif sur ce point est de mieux comprendre comment de futures architectures d'aéronef pourraient éventuellement bénéficier d'un positionnement des moteurs moins favorables au développement des traînées de condensation. Les travaux se sont attachés à évaluer de manière exhaustive l'influence de l'ensemble des paramètres jouant sur le champ proche, et qui caractérisent les propriétés aérodynamiques principales de l'aéronef et celles de l'influence de l'atmosphère sur le mouvement de « downwash » naturel du sillage portant.

Un des résultats principaux et originaux de l'étude est de montrer que le phénomène d'emport des traînées par les tourbillons marginaux induit des variations importantes de l'étalement vertical de ces dernières et donc de leur impact radiatif et que des configurations de positionnement des jets propulsifs le long de la voilure sont plus favorables que d'autres.

---0---

Condensation trails are ice clouds that form in the wake of aircraft. Assessing their environmental impact is at the heart of the current challenges facing commercial aeronautics. The problem is made all the more difficult by the multiplicity of spatial and temporal scales and the presence of numerous physical phenomena. These trails, which originate at the exit of aircraft engines, evolve very rapidly while they are still close to the aircraft (over distances of the order of a few wingspans), but only potentially transform much further away into induced cirrus clouds whose extension over several hundred square kilometers has a negative impact on the earth's radiation balance. In this context, this thesis focuses on the effects of the aircraft's near field on contrails, i.e. the influence of the aircraft's aerodynamic wake on their properties. More specifically, the aim is to clarify how wake vortices, also known as tip vortices, modify the distribution of engine plumes and the condensation of water vapour into ice, from their rolling up to their destabilization far behind the aircraft. The thermal (or density) stratification of the atmosphere plays a major role in this phase of wake evolution, and is an important parameter in the study. In particular, the natural movement of vortices is downward, but a secondary wake can form in their vicinity and then rise to flight altitude. The wake is then separated into two distinct components, and engine plumes may find themselves caught in one or the other, depending on their initial position. In a supersaturated zone (relative to the ice saturation of the atmosphere), this has a strong influence on condensation, and therefore on the radiative impact of the drag produced. A second parameter of the study is the relative position of the engine jets. The aim is to gain a better understanding of how future aircraft designs might benefit from engine positioning that is less conducive to the development of contrails. In this respect, the study shows that the phenomenon of contrails being carried along by tip vortices induces significant variations in the vertical spread of the latter and therefore, here too, in their radiative impact.

---0---

Mots clés / Key words

TOURBILLONS, TRAINEES DE CONDENSATION, SILLAGES D'AVION, INSTABILITES, IMPACT ENVIRONNEMENTAL

VORTICES, CONTRAILS, AIRCRAFT WAKE, INSTABILITIES, ENVIRONMENTAL IMPACT