



**HAL**  
open science

## Les différentes facettes du cirrus homogenitus

Etienne Terrenoire

► **To cite this version:**

Etienne Terrenoire. Les différentes facettes du cirrus homogenitus. La Lettre AAAF, 2021, 46, pp.37-44. hal-03608869

**HAL Id: hal-03608869**

**<https://hal.science/hal-03608869>**

Submitted on 24 Mar 2022

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Les différentes facettes du *cirrus homogenitus*

par Étienne Terrenoire, ONERA

## INTRODUCTION

En fonction des caractéristiques moteurs des avions, de la nature de leurs émissions et des conditions météorologiques ambiantes aux altitudes de vol, une traînée de condensation (condensation trails ou *contrails* en anglais) est susceptible de se former dans le sillage d'un avion. Les conditions météorologiques pilotent la durée de vie de ces traînées qui, dans certaines situations (par exemple sursaturation de l'air par rapport à la glace), persistent jusqu'à plusieurs heures après le passage d'un avion. En cas de fort vent aux altitudes de vol, en plus de s'étendre verticalement (de l'ordre de la centaine de mètres), les contrails peuvent s'étendre de manière horizontale (de l'ordre de plusieurs dizaines de kilomètres) et prennent alors éventuellement l'aspect d'un voile nuageux. La photo de la Figure 1 permet de distinguer des contrails jeunes, quelques minutes après le passage de l'avion, de type linéaire et débutant par certains un étalement horizontal. Ces nuages de cristaux de glace d'origine anthropique sont officiellement dénommés *Cirrus homogenitus* par l'Organisation météorologique mondiale lorsque leur durée de vie est supérieure à 10 minutes.



Figure 1 : *Cirrus homogenitus* jeunes en phase de dispersion et de diffusion (Photo E. Terrenoire).

Dans le contexte général de la volonté de réduction de l'impact climatique de l'aviation, les contrails font l'objet d'une attention particulière. En cas de persistance prolongée, les contrails produisent un déséquilibre du transfert radiatif<sup>1</sup> atmosphérique terrestre significatif, engendrant un forçage radiatif effectif estimé en 2018 entre 17 et 98 mW/m<sup>2</sup> avec une valeur médiane estimée

à 57,4 mW/m<sup>2</sup> (Lee et al, 2020) représentant ainsi 2,5% du forçage radiatif anthropique total. Ils induisent un déséquilibre du transfert radiatif atmosphérique terrestre en renvoyant vers l'espace le rayonnement solaire de courte longueur d'onde mais également en absorbant le rayonnement infrarouge terrestre (Haywood et al., 2009). Ces valeurs, bien que modestes en comparaison du forçage anthropique global estimé en 2011 à 2,3 (1,1-3,3) W/m<sup>2</sup> (Lee et al., 2020 ; IPCC, 2013) sont, pour le domaine en haut de fourchette, potentiellement supérieures à l'ensemble des autres composantes du forçage lié aux émissions de l'aviation et notamment le CO<sub>2</sub>. En 2011, les émissions de l'aviation représentaient 4% du forçage radiatif anthropique global (voir Figure 2). La majorité du forçage radiatif de l'aviation serait due aux nuages induits (Aircraft Induced Cloud ou AIC en anglais) (Kärcher, 2018 ; Lee et al., 2020).

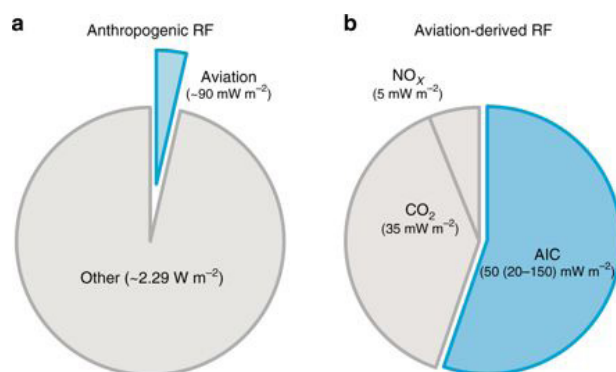


Figure 2 : Répartition du forçage radiatif anthropique global dû à l'aviation pour l'année 2011.

On peut noter la grande amplitude entre les valeurs minimale et maximale de la fourchette estimée. Pourquoi un tel écart ? Tout simplement car l'estimation, via la mesure ou la modélisation, de l'impact radiatif et a fortiori climatique d'un contrail n'est pas une mince affaire.

## L'INTERACTION JET – TOURBILLON - ATMOSPHÈRE

Dans le cas des avions commerciaux classiques, un contrail est le résultat de l'interaction entre les

1. Grandeur physique permettant de quantifier (W/m<sup>2</sup>) l'ampleur de déséquilibre radiatif terrestre engendré par un agent perturbateur tel qu'un contrail. Une valeur positive indique un réchauffement alors qu'une valeur négative correspond à un refroidissement.



Figure 3: Localisation du début d'interaction entre le tourbillon de bout d'aile et le moteur externe ( $x_{j1}$ ) et entre le tourbillon de bout d'aile et le moteur interne ( $x_{j2}$ ). Selon la formule de Jacquin et Garnier (1996) pour un avion de ligne de type quadriréacteur et d'envergure  $B$ . L'interaction entre le tourbillon marginal et le moteur externe débute à une envergure ( $B$ ) derrière l'avion et l'interaction entre le tourbillon marginal et le moteur interne débute à cinq envergures derrière l'avion ( $5B$ ). Photographie provenant de Wikipédia, copyright Firooo2/Flagstaffotos.

tourbillons marginaux d'un avion, les jets moteur et l'air ambiant où se situe la trajectoire de l'avion correspondant ici à la haute troposphère. La distance (noté  $x$  sur la figure 3) à partir de laquelle l'interaction entre le jet moteur et les tourbillons marginaux débute est dépendante de la distance entre la position du moteur par rapport au bout d'aile et donc du type d'avion (biréacteurs, quadriréacteurs). Cette interaction met en jeu non seulement des phénomènes aérodynamiques complexes mais également un grand nombre de processus thermodynamiques et physico-chimiques macro et microscopiques. La prise en compte de l'ensemble des processus impliqués est un véritable défi pour les modélisateurs qui, de surplus, disposent d'un nombre de données limitées pour se comparer à l'observation étant donné le défi posé par la caractérisation expérimentale de ces cirrus anthropiques, même si l'exploitation d'observations satellitaires des contrails est une alternative intéressante.

Schmidt (1941) et Appleman (1953) furent les pionniers dans l'élaboration d'un critère simple dit Critère de Schmidt-Appleman (CSA) permettant de statuer sur le déclenchement ou non de la formation d'un contrail. Le CSA révisé depuis par Schumann (1996) est basé sur des caractéristiques moteurs telles que l'efficacité de

propulsion et l'indice d'émission en eau associées aux variables de température et d'humidité caractérisant les conditions météorologiques atmosphériques ambiantes aux altitudes de vol.

Au cours des 30 dernières années, la communauté scientifique s'est attelée à modéliser précisément l'interaction gaz/particules ayant lieu au sein du panache dans le sillage de l'avion et correspondant à l'ensemble des processus microphysiques impliqués dans la formation des contrails tels que la nucléation, la coagulation, la condensation, l'évaporation. Les travaux actuels sont orientés vers l'étude de l'impact de l'utilisation des carburants alternatifs et plus particulièrement les changements qu'ils sont susceptibles d'engendrer sur les caractéristiques intrinsèques des contrails découlant de leur usage. En effet, la composition chimique des émissions joue un rôle majeur pour la formation des contrails. Pour comprendre pourquoi il est nécessaire de détailler les principales étapes de formation d'un contrail, plaçons-nous dans un cas atmosphérique favorable à la formation et à la persistance d'un contrail. L'essentiel des mécanismes microphysiques conduisant à la formation de cristaux de glace ont lieu dans les premiers instants après la sortie du moteur (voir Figure 4).

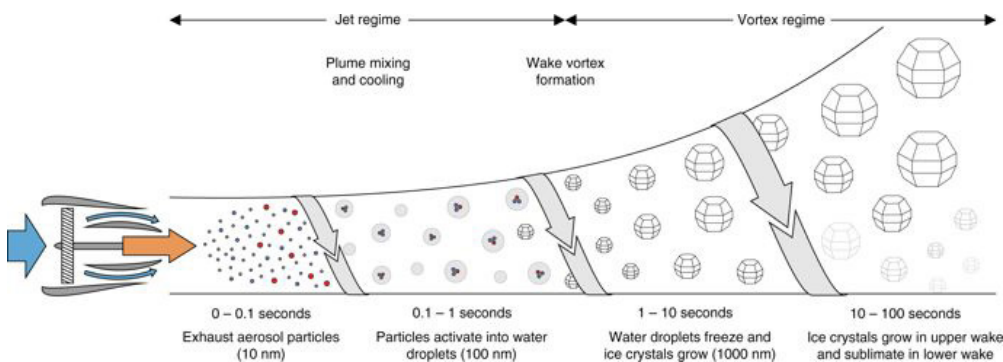


Figure 4 : Evolution physicochimique du panache d'un moteur d'avion (à gauche) depuis l'éjection jusqu'à 100 s après l'éjection (extrait de Kärcher, 2018).

Tout d'abord, pendant les premiers dixièmes de seconde après l'émission, le jet chaud (600 K) composé d'agents chimiques en phases gazeuse et aqueuse ainsi que de particules ultrafines de type suies (de taille inférieure à 100 nm) subit une violente détente en se mélangeant avec l'air glacé environnant (225 K). Le taux de dilution entraînant un refroidissement soudain du panache est essentiellement fonction de la vitesse d'éjection, de la température des gaz émis et de la température ambiante. Le panache est alors en sursaturation par rapport à l'eau liquide et les gouttelettes d'acide sulfurique hydraté (issu du soufre contenu dans le carburant actuel Jet A-1 d'origine fossile) renforcent l'hydratation des particules de suies qui grossissent rapidement grâce à la vapeur d'eau présente dans le panache condensant sur celles-ci. Si la concentration en nombre de cristaux formés dans le panache est assez importante (par exemple supérieure à 10 000 particules par cm<sup>3</sup> pour une taille proche du micromètre), la traînée de condensation devient alors visible. Au-delà d'une seconde après l'éjection du moteur, le tourbillon de bout d'aile provoque un enroulement du jet moteur (phase vortex) et un mécanisme de subsidence<sup>2</sup> s'appliquant au contrail fraîchement formé. Son intensité est alors contrôlée essentiellement par la masse de l'avion ainsi que par les conditions de stabilité atmosphérique et d'humidité ambiante. Les cristaux de glace pris dans la subsidence subissent un réchauffement par compression adiabatique provoquant pour une partie leur sublimation mais l'entraînement d'air frais humide pendant la descente permet également de maintenir la saturation par rapport à la glace et donc la présence des cristaux, à condition bien sûr que la masse d'air ambiante soit suffisamment hydratée (zone de sursaturation). Au sein de la phase tourbillon, l'équilibre entre sublimation et sursaturation pilote le nombre de cristaux persistant dans le panache.

Dans le même temps, un tourbillon secondaire provoque l'arrachement d'une partie de la couche supérieure du contrail provoquant la remontée des cristaux concernés qui continuent à grossir tant que la sursaturation par rapport à la glace perdure, ce qui dépend une nouvelle fois principalement des conditions d'humidité et de température ambiante à cette altitude (8-13 km) (à droite sur la Figure 4). Par la suite, l'influence du tourbillon de bout d'aile diminue (phase de dissipation) et les conditions météorologiques ambiantes (ex : cisaillement, turbulence, stabilité thermique) pilotent la dispersion du contrail jusqu'à son évaporation parfois

plusieurs heures après sa naissance marquant ainsi sa fin de vie. Cette description du cycle de vie d'un contrail permet de comprendre que les émissions moteurs (gaz et particules) et l'ensemble des mécanismes thermodynamiques et physico-chimiques conduisant à la naissance d'un contrail sont fortement interdépendants.

### INFLUENCE DES CONDITIONS AMBIANTES ATMOSPHÉRIQUES

Au cours des 10 dernières années, les variables clés influençant la durée de vie d'un contrail ont été étudiées, notamment grâce aux outils de modélisation de la mécanique des fluides. Par exemple, Lewellen (2014), grâce à une approche de type Large Eddy Simulation (LES) pour la modélisation de la turbulence montre que plus la température de l'air ambiant est basse, plus la durée de vie d'un contrail est élevée (plus de 30 heures pour une température de 205 K) comparée à une dizaine d'heures uniquement pour une température de 225 K. De plus, toujours d'après le même jeu de simulations, une valeur plus élevée de la sursaturation de l'air ambiant par rapport à la glace renforcera inévitablement la durée de vie du contrail de quelques heures (voir Figure 5). Les calculs démontrent également que le nombre de particules de glace commence à diminuer environ 100 s après l'émission (décroissance en loi de puissance) (voir graphiques a et b de la Figure 5). La décroissance comme expliqué précédemment est due à la sublimation préférentielle des petits cristaux de glace encapsulés dans le tourbillon subissant la descente. Cette diminution du nombre de petit cristaux s'accompagne d'une croissance de la masse totale de glace présente dans les premières heures de vie du contrail (supérieure à 5 heures) avant que celui-ci subisse une décroissance prononcée à son tour et disparaisse, excepté pour une température particulièrement froide (205 K), ce qui est cependant peu probable aux altitudes de croisière des avions de ligne (pression correspondante de 250 hPa par exemple).

2. En météorologie : mouvement de l'air vers le sol.



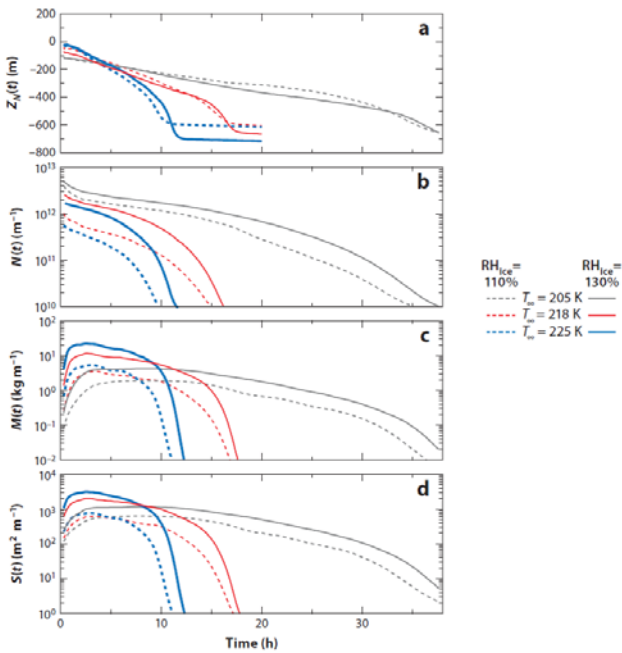


Figure 5 : Résultats des simulations de Lewellen (2014) : (a) altitude moyenne de la localisation des cristaux par rapport à l'altitude de vol,  $Z_N(t)$ ; (b) nombre de cristaux par unité de longueur,  $N(t)$ ; (c) masse de glace,  $M(t)$ ; (d) surface de glace disponible,  $S(t)$ . Les lignes correspondent à la température ambiante  $T = 205\text{ K}$  (noir),  $218\text{ K}$  (rouge), et  $225\text{ K}$  (vert) et à la sursaturation de l'air par rapport à la glace  $RH_{\text{glace}} = 110\%$  (tirets) et  $130\%$  (continue). © American Meteorological Society.

**INFLUENCE DE L'AVION**

D'autres travaux utilisant la LES ont mis en évidence que l'intensité des tourbillons marginaux ainsi que la quantité de cristaux formés dépendent fortement du type d'avion (Unterstrasser et Görsch, 2014). Les résultats indiquent qu'après une durée de vie de 4 min, ce qui correspond à la fin de la phase tourbillon, l'épaisseur du contrail varie entre 220 m pour le Bombardier Canadair Regional Jet (CRJ) et 500 m pour un Airbus A380 car la descente des tourbillons est plus prononcée pour les avions les plus grands et les plus lourds (voir Figure 6). Pour ce type d'avion, la descente plus marquée du contrail engendre une sublimation plus importante et un contrail moins chargé en cristaux dans sa partie inférieure. L'épaisseur du contrail est aussi contrôlée par la stabilité thermique de la couche atmosphérique aux altitudes de vol et elle est plus élevée si la stabilité thermique est plus faible.

Aircraft Type	A320		A300		A350	
	CRJ	B737	B767	B777	B747	A380
Wing span $b/m$	21.2	34.4	47.6	60.9	64.4	79.8
Circulation $\Gamma_0/(m^2 s^{-1})$	130	240	390	520	590	720
Descent speed $w_0/(ms^{-1})$	1.24	1.41	1.66	1.73	1.85	1.83
Vortex time scale $t_0/s$	13.4	19.1	22.5	27.6	27.3	34.3
core radius $r_c/m$	3.0	3.0	3.0	4.0	4.5	4.5
Ice crystal number $\mathcal{N}'_0/(10^{11} m^{-1})$	4.08	8.51	16.70	34.0	31.78	46.07
Water vapor emission $Z_0/(g m^{-1})$	1.77	3.70	7.26	15.0	13.82	20.03
Plume radius $R_{\text{init0}}/m$	8	12	15	20	20	25
Plume radius $R_{\text{init1}}/m$	10	15	20	25	25	32
Mesh sizes $(dx, dy/2, dz)/m$	0.35	0.57	0.79	1.00	1.06	1.32

Figure 6 : Liste des paramètres clés caractérisant le jet moteur en fonction du type d'avion (Unterstrasser et Görsch, 2014).

La Figure 7 montre le profil vertical du nombre de cristaux de glace présents dans le contrail, quatre minutes après l'émission moteur et donc après la déstructuration des tourbillons marginaux pour deux type de sursaturation par rapport à la glace. Pour une sursaturation par rapport à la glace de 140%, peu de cristaux subliment et l'extension verticale du contrail varie entre 220 m pour un CRJ et 500 m pour un A380. Pour les avions les plus grands, l'épaisseur du contrail est identique dans les deux cas (120% et 140%) et le pic de concentration est plus prononcé au niveau de l'altitude de vol alors que pour les avions régionaux les profils sont similaires mais le tourbillon primaire (noté P sur la Figure7) contient un nombre plus élevé de cristaux que le secondaire (noté S sur la Figure 7).

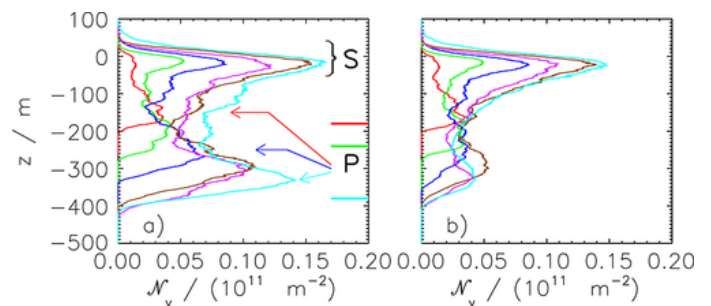


Figure 7 : Profils verticaux du nombre de cristaux de glace intégré le long du contrail 4 minutes après l'émission pour deux saturations par rapport à glace (140% à gauche et 120% à droite). La position des tourbillons primaire et secondaire est notée P et S respectivement, sur le graphique de gauche. La fréquence de Brunt-Vaisala est de  $1,15 \cdot 10^{-2} s^{-1}$ . L'altitude de croisière est  $z = 0$ . (Unterstrasser et Görsch, 2014).

Un abaissement du tourbillon primaire de 300 m environ équivaut à une augmentation de la température de 3 K environ, ce qui laisse à penser que la sursaturation n'est plus atteinte entraînant la sublimation des cristaux. Pourtant, les travaux de Lewellen (2014) prouvent le

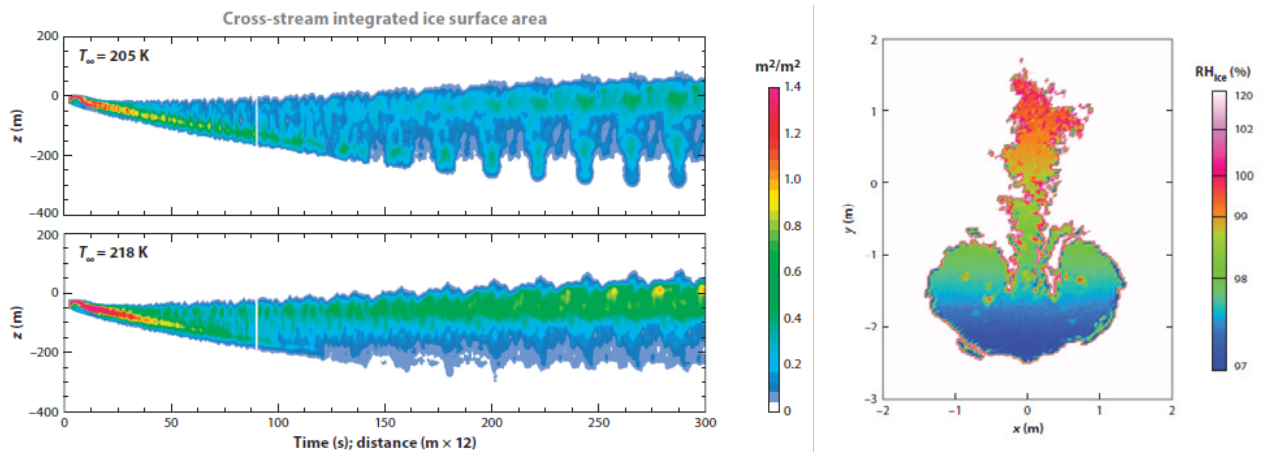


Figure 8 : A gauche : surface de glace intégrée le long d'un contrail ( $m^2/m^2$ ) simulé entre 0 et 300 s pour une température de 205 K (en haut) et 218 K (en bas). Extrait de Lewellen et al. © American Meteorological Society. À droite : coupe transversale (vue de côté) – sursaturation par rapport à la glace régnant au sein d'un contrail. L'axe des y correspond à la déplacement verticale (0 étant la position moteur) et l'axe des x à la déplacement latérale (adapté de Naiman et al. (2011) par Paoli et Shariff, 2016).

contraire. La Figure 8 démontre que l'abaissement du tourbillon primaire permet également un entraînement d'air humide ambiant assurant des conditions en permanence proches de la sursaturation et donc un maintien des cristaux à condition bien sûr que l'air ambiant soit sursaturé par rapport à la glace.

### INFLUENCE DES ÉMISSIONS MOTEUR

L'utilisation des carburants alternatifs conduit à une modification de la nature physico-chimique des émissions. Les mesures effectuées en vol lors de la campagne ACCESS réalisée en 2013-2014 par le consortium NASA/DLR/NRC (Moore et al., 2018) montrent que l'utilisation d'un mélange 50-50 Jet-A1/biofuel (HEFA) par rapport à un Jet A1 pur, réduit de 50 % et 70 %, respectivement, le nombre et la masse de particules émises par les moteurs. Ce résultat crucial laisse donc à penser que l'utilisation des carburants alternatifs est susceptible de modifier la composition des contrails. Grâce aux nombreux travaux de modélisation résumés dans son papier, Karcher (2018) schématise à travers la Figure 9, la relation existant entre le nombre de cristaux présents dans un contrail et les émissions de suies pour deux températures atmosphériques ambiantes, l'une proche et l'autre inférieure de 12 K au seuil de formation déterminé par le CSA. La zone grisée correspond au nombre de particules de suies émises par kg de carburant (de 1014 à 1015) pour un carburant aéronautique classique actuel tel que le Jet-A1. Pour ce type de carburant, il apparaît que le nombre de cristaux de glace produits, et donc présents dans le contrail, augmente linéairement avec le

nombre de particules de suies émises par les moteurs, et ce, pour les deux températures sélectionnées. Ce type de comportement a été confirmé par Terrenoire et al. (2018) dont les simulations utilisant un modèle de microphysique détaillé illustrent, 10 s après l'émission moteur, la diminution du nombre de cristaux formés lorsque le nombre de particules de suies émises est abaissé d'un facteur 2 (voir Figure 10).

En revanche, Karcher (2018) indique un comportement différent pour des émissions de suies inférieures de plusieurs ordres de grandeur par rapport au facteur d'émission classique (Jet-A1). Dans ce cas de figure, deux types de comportement doivent être distingués. D'une part, pour des températures bien inférieures au seuil de déclenchement des contrails (218 K pour des latitudes extratropicales et 228 K aux tropiques), le comportement précédemment décrit s'inverse et ainsi, plus le nombre de cristaux augmente, plus le nombre de particules de suies diminue. Dans ce cas, ce sont des particules aqueuses fines qui, en fonction de leur composition chimique (encore mal caractérisée à l'heure actuelle) se formeraient potentiellement en plus grande quantité pour ensuite geler et éventuellement grossir. Dans ce cas, un seuil minimum de production de cristaux de glace est donc observé pour des valeurs d'émissions de suies se situant aux alentours de 1014. D'autre part, pour des températures proches du seuil de déclenchement des contrails, la production de cristaux de glace continuerait à diminuer pour des émissions de suies comprises entre 1013-1014 pour atteindre un plateau pour des valeurs d'émission de suies inférieures à 1013. Dans ce cas, c'est la concentration

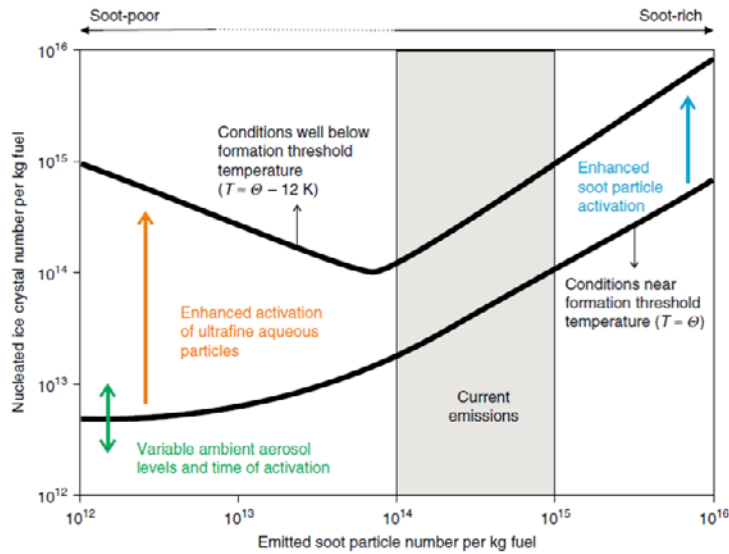


Figure 9 : Nombre de cristaux de glace formés par kg de carburant en fonction du nombre de particules de suies émises par kg de carburant pour deux températures ambiantes. (Extrait de Kärcher, 2018).

de fond en particules atmosphériques qui détermine la valeur minimale de production de cristaux. En se basant sur l'utilisation d'un modèle microphysique simulant de manière détaillée le régime jet du contrail, Rojo et al. (2015) établissent que lors de l'utilisation d'un biocarburant pur, les particules de fond atmosphérique (500/cm<sup>3</sup>) entraînées dans le panache dominant, en concentration relative (%), à partir de 4 s après l'émission moteur contre 10 s pour un mélange 50-50 Jet-A1/biocarburant. L'étude souligne également le rôle des particules de fond atmosphérique en démontrant leur influence cruciale sur la distribution des cristaux de glace composant le contrail

et par conséquent le rôle grandissant de la nucléation dite homogène lors de l'utilisation de carburants alternatifs (voir Figure 11).

### INCERTITUDE CONCERNANT LES CRISTAUX DE GLACE ET L'IMPACT CLIMATIQUE ASSOCIÉ

Burkhardt et al. (2018) ont récemment démontré à l'aide de simulations climatiques globales qu'une réduction d'un facteur 2 de la concentration des cristaux de glace dans les contrails engendre une réduction du forçage

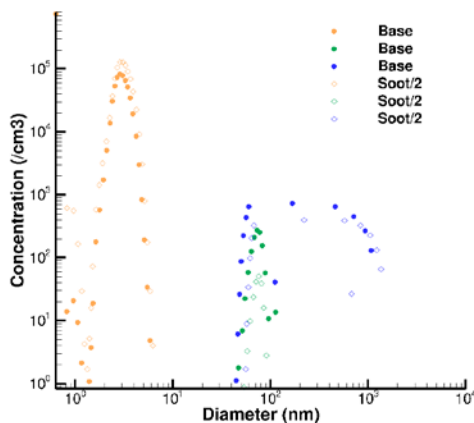


Figure 10 : Distribution en taille des aérosols 10 s après l'émission moteur utilisant un carburant de type Jet A-1 (Base) et un carburant de type alternatif (Soot/2) dont les émissions de particules de suies ont été réduites d'un facteur 2 (Terrenoire et al., 2019). En vert : particules volatiles, en bleu : cristaux de glace.

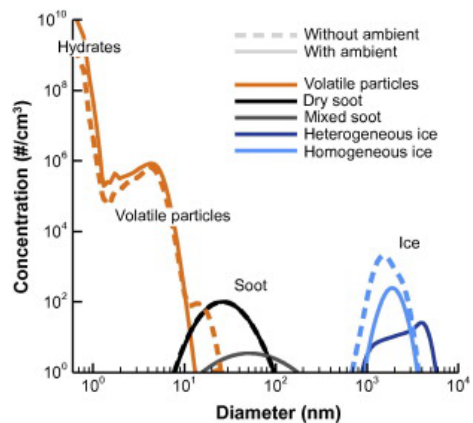


Figure 11 : Distribution en taille des aérosols 1 s après l'émission moteur utilisant un carburant alternatif avec prise en compte (lignes continues) ou non (pointillés) des aérosols de fond atmosphérique (Rojo et al., 2015).

radiatif de l'ordre de 20 %, démontrant ainsi une relation non-proportionnelle entre les deux variables. Les cristaux de glaces composant la traînée sont en général assimilés dans les modèles à des sphères, mais à l'heure actuelle, aucune observation in situ n'a pu véritablement confirmer ou infirmer cette hypothèse, ce qui est une limitation majeure du fait de la relation intime existant entre la géométrie d'un cristal et son interaction avec le rayonnement de courte longueur d'onde d'origine solaire ou situé dans l'infrarouge terrestre. Certains travaux de modélisation montrent cependant la complexité de la structure 3D d'un contrail, 5 min après l'émission et illustrent la compétition thermodynamique qui existe au sein d'un contrail (voir Figure 12). Les diamètres les plus grands (en rouge) sont clairement situés au niveau du tourbillon primaire alors que le vortex secondaire forme un rideau de cristaux de plus petite taille car il existe une compétition plus importante pour la vapeur d'eau dans la partie inférieure du contrail du fait du plus grand nombre de cristaux formés.

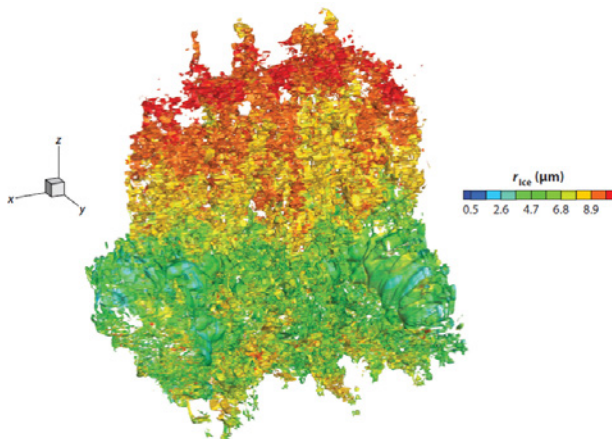


Figure 12 : Structure 3D du rayon des cristaux de glace modélisée au sein d'un contrail, 5 min après l'émission (Paugam et al., 2010).

La maîtrise de la distribution spatiale et temporelle des cristaux de glace au sein d'un contrail est un défi majeur de la modélisation de leur impact radiatif et donc climatique. Les travaux à ce sujet montrent une forte dépendance du forçage radiatif à la géométrie des cristaux. Ainsi, Schumann et al. (2012) indiquent que les cristaux sphériques généralement privilégiés dans les modèles de contrail engendrent un forçage radiatif net positif (réchauffement) et maximal pour des épaisseurs optiques de l'ordre de 1,5 à 550 nm (voir Figure 13). D'une manière générale, ce forçage tend à diminuer pour les épaisseurs optiques plus élevées. En revanche, pour des cristaux de type droxtal ou pour toute autre géométrie

non-sphérique, le forçage radiatif est positif (réchauffement) pour des épaisseurs optiques faibles mais devient négatif (refroidissement) pour des épaisseurs optiques plus élevées, le changement de signe (positif à négatif) étant fortement dépendant de la géométrie des cristaux.

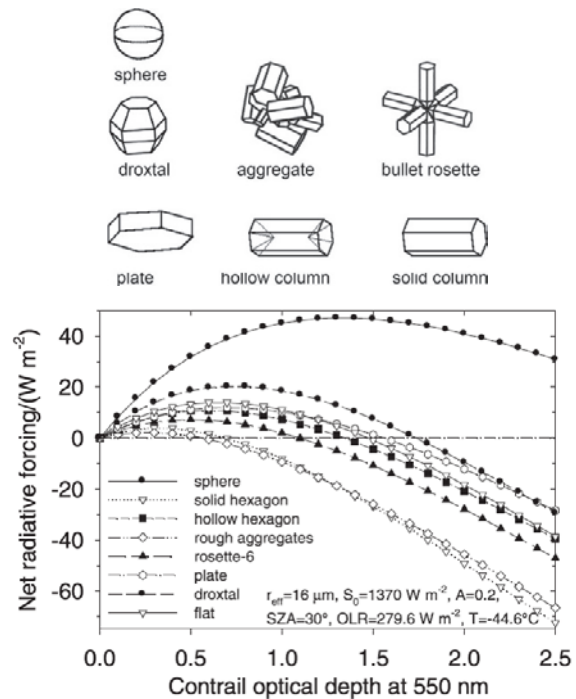


Figure 13 : Forçage radiatif ( $W/m^2$ ) en fonction de l'épaisseur optique du contrail à 550 nm pour différentes géométries de cristaux de glace (extrait de Schumann et al. (2012)).

Plus récemment, les travaux de Sanz-Morère et al. (2020) ont montré à travers la modification du coefficient d'asymétrie d'une sphère que plus de la moitié de l'incertitude qui règne autour de la valeur du forçage radiatif d'un contrail est liée à l'hypothèse de base assimilant les cristaux de glace composant le contrail à une géométrie de type sphérique. Les travaux confirment ainsi l'impact majeur du choix de la géométrie des cristaux composant les contrails dans l'évaluation de leur impact climatique.

## CONCLUSION

Les récentes études citées démontrent la complexité du système étudié qui, en résumé, correspond à l'interaction physico-chimique d'un jet moteur « pris au piège » dans un tourbillon avec son environnement atmosphérique immédiat. Les travaux indiquent également une relation directe entre la nature des émissions moteur, la distribution en taille et nombre ainsi que la géométrie des cristaux de glace composant un contrail et donc son



impact climatique. En 2020, suite au plan national de relance aéronautique, deux projets de recherche soutenus par la DGAC viseront à la quantification (mesure in situ et modélisation) de l'impact de l'utilisation des carburants 100% alternatifs tels que les carburants de synthèse durables (VOLCAN) ou encore l'hydrogène (CIRRUS-H2) sur la formation des contrails tout en permettant une étroite collaboration entre l'ONERA, l'industrie aéronautique (Airbus, Dassault Aviation, Safran) et le CNRS. Ces études, en s'appuyant notamment sur les outils de modélisation des contrails développés à l'ONERA, tels que MoMiE (Vancassel et al., 2014 ; Khou et al., 2017 ; Montreuil et al., 2018) et le code CEDRE, fourniront des données précieuses, aidant à la compréhension de l'influence des carburants alternatifs sur les caractéristiques intrinsèques des contrails déterminant leur impact climatique potentiel.

## RÉFÉRENCES

- Appleman, H., "The formation of exhaust condensation trails by jet aircraft," *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, Vol. (34), 1953, pp.14-20.
- Burkhardt, U., Bock, L., & Bier, A. (2018). Mitigating the contrail cirrus climate impact by reducing aircraft soot number emissions. *Climate and Atmospheric Science*, 37,1-7.
- Haywood, J. M., R. P. Allan, J. Bornemann, M. Forster, P. N. Francis, S. Milton, G. Radel, A. Rap, K. P. Shine, and R. Thorpe (2009), A case study of the radiative forcing of persistent contrails evolving into contrail-induced cirrus, *J. Geophys. Res.*, 114, D24201, doi:10.1029/2009JD012650
- IPCC, 2013: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.
- Jacquin L, Garnier F. 1996. On the dynamics of engine jets behind a transport aircraft. Rep. AGARD CP-584, NATO, Brussels.
- Kärcher, B. Formation and radiative forcing of contrail cirrus, *Nature Communication*, 9, 2018, p. 1824.
- Khou, J.C., Ghedhaïfi, W., Vancassel, X., Montreuil, E., and Garnier, F., "CFD simulation of contrail formation in the near field of a commercial aircraft: Effect of fuel sulfur content," *Meteorologische Zeitschrift*, 2017, doi:10.1127/metz/2016/0761.
- Lee, D.S, D.W. Fahey, A. Skowron, M.R. Allen, U. Burkhardt, Q. Chen, S.J. Doherty, S. Freeman, P.M. Forster, J. Fuglestedt, A. Gettelman, R.R. De León, L.L. Lim, M.T. Lund, R.J. Millar, B. Owen, J.E. Penner, G. Pitari, M.J. Prather, R. Sausen, L.J. Wilcox, *The contribution of global aviation to anthropogenic climate forcing for 2000 to 2018*, *Atmospheric Environment*, 2020.
- Lewellen DC. 2014. Persistent contrails and contrail cirrus. Part II: Full lifetime behavior. *J. Atmos. Sci.* 71:4420-38.
- Moore, R. H. et al. Biofuel blending reduces particle emissions from aircraft engines at cruise conditions. *Nature* 543, 411-415 (2017).
- Montreuil, E., Ghedhaïfi, W, Chmielarski, V., Vuillot, F., and Gand, F., "Numerical simulation of contrail formation on the common research model Wing/Body/Engine configuration," 10th Space and Atmospheric Environment, AIAA Conference, 2018. DOI:10.2514/6.2018-3189.
- Naiman AD, Lele SK, Jacobson MZ. 2011. Large eddy simulations of contrail development: sensitivity to initial and ambient conditions over first twenty minutes. *J. Geophys. Res.* 116:D21208.
- Paoli, R. et Karim Shariff, *Contrail Modeling and Simulation*, *Annual Review of Fluid Mechanics* 2016 48:1, 393-427.
- Paugam R, Paoli R, Cariolle D. 2010. Influence of vortex dynamics and atmospheric turbulence on the early evolution of a contrail. *Atmos. Chem. Phys.* 10:3933-52
- Rojo, C., Vancassel, X., Mirabel, P., Ponche, J. L., Garnier, F., 2015: Impact of alternative jet fuels on aircraft-induced aerosols, *Fuel*, 144, 335.
- Sanz-Morère, I., Sebastian D. Eastham, Raymond L. Speth, and Steven R. H. Barrett *Environmental Science & Technology Letters* 20207 (6), 371-375 DOI: 10.1021/acs.estlett.0c00150
- Schumann, U.; Mayer, B.; Graf, K.; Mannstein, H. A Parametric Radiative Forcing Model for Contrail Cirrus. *J. Appl. Meteorol. Climatol.* 2012, 51, 1391-1406.
- Schumann U. 1996. On conditions for contrail formation from aircraft exhausts. *Meteorol. Z.* 5:4-23.
- Schmidt E. 1941. Die Entstehung von Eisnebel aus den Auspuffgasen von Flugmotoren. In *Schriften der Deutschen Akademie der Luftfahrtforschung*, Vol. 44, pp. 1-15. Berlin: Verlag R. Oldenbourg
- Terrenoire, E., X. Vancassel, W. Ghedhaïfi, E. Montreuil. Chemical composition in near-field aircraft plumes at cruise level. *The 23rd ATRS World Conference*, July 2019, AMSTERDAM, Netherlands.
- Unterstrasser, S.; Görsch, N. Aircraft-type dependency of contrail evolution. *J. Geophys. Res.* 2014, 119, 14,015-14,027, 2014JD022642.
- Vancassel, X., Mirabel, P., Garnier, F. Numerical simulation of aerosols in an aircraft wake using a 3D LES solver and a detailed microphysical model, 2014, *Int. J. Sustainable Aviation*, Vol. 1, No. 2. ■