

Comprendre pour bien mesurer, bien mesurer pour bien comprendre !

Les traînées de condensation : l'essentiel serait-il invisible pour les yeux ?¹

Préambule :

Devant la cacophonie et les querelles qui règnent dans le domaine des effets climatiques hors-CO2 de l'aviation, le Comité Aéronautique et Spatial des IESF n'est pas dans sa zone de confort. Les effets radiatifs des traînées de condensation des avions (« contrails ²») ne font pas partie des sujets traditionnels du secteur. Il se trouve que le président de ce Comité IESF préside depuis deux ans la Commission Énergie et Environnement de l'AAE³ et qu'à ce titre, il a été conduit à travailler intensément sur le sujet. Au contact de personnalités européennes de premier plan dans la Commission AAE, il a développé quelques idées originales et des interrogations qui se placent à côté de la « doxa » actuelle sur le sujet. Il souhaite les partager avec le lectorat IESF. Les lignes qui suivent bénéficient donc d'un accord tacite du Comité pour publication mais sans garantie sur le fond.

Les débuts d'un doute...

Il y a 50 ans, travaillant à l'ISL⁴ sur l'anémométrie laser alors naissante⁵, je connaissais les travaux de Lord Rayleigh et de Gustav Mie étudiés à SupAéro en spécialisation Radar, et j'ai même embarqué sur un avion un laser conçu expressément pour des mesures en vol utilisant les aérosols naturels. J'ai quitté cet environnement mais je n'ai pas tout oublié : en cherchant à comprendre ce qui se passe avec les « contrails » (traînées de condensation en anglais abrégé), l'ex-développeur de mesures optiques s'est réveillé !

Et je suis tombé sur trois questions qui me tracassent au risque de me faire traiter de Béotien :

- 1) À « nos » latitudes, à des niveaux de vol (ex. : FL350, 10700m) élevés mais accessibles aux Airbus, Boeing etc. et aux business-jets, l'air même saturé d'humidité est dans l'absolu très sec, 10 à 50 mg H2O/m³. Alors comment trouve-t-on là-haut assez d'eau pour créer des cirrus « gênants » i.e. les traînées de condensation persistantes qui se transforment ou non en cirrus (« les contrails ») ?
- 2) Est-il correct d'affirmer que (toujours?), je cite : « *L'eau liquide (ou glace) est un très fort absorbant dans l'infrarouge à toutes les longueurs d'ondes, et un nuage même peu épais absorbera donc rapidement la quasi-totalité du rayonnement incident* » ??
- 3) Pourquoi le nom de Rayleigh n'apparaît-il quasiment jamais ?

¹ Inspiré de Saint-Exupéry, Le Petit Prince...

² Contrails : abrégé de Condensation trails

³ AAE, Académie de l'Air et de l'Espace

⁴ ISL : Institut de Recherche Franco-Allemand de Saint-Louis

⁵ Publications et conférences sur l'anémométrie laser, et même en vol, Z. Flugwiss. Weltraumforsch 2 p.3, 1978.

La première question a une réponse simple, niveau CM2 : à -56°C et altitude 10 000m par exemple, il y a très peu d'eau dans une atmosphère claire même sursaturée d'humidité. Si cette eau condense et forme à teneur en glace fixée (IWC⁶) des glaçons de 10, 20, 50 microns, ceux-ci ne « couvrent pas assez d'espace » pour rendre sous une épaisseur « raisonnable » un nuage visible. Donc, si on voit cette condensation, c'est qu'elle est faite de très petites particules, de l'ordre du micron, dont la surface totale (toujours à IWC constant) est bien plus grande !⁷ On n'oublie pas la vapeur d'eau ajoutée par l'avion : pas négligeable, elle se dilue vite.

La deuxième question est mal posée : une chose est l'indice du milieu, et là, oui la glace est un bon absorbant de l'infrarouge, l'autre chose est la forme de l'objet qui doit absorber le rayonnement ! Quand cet objet est petit, très petit, de dimensions comparables et même très inférieures aux longueurs d'onde infrarouges, on est bien loin de l'optique géométrique ! Une onde à 10 microns et plus va « snober » la particule de 1 micron.

La troisième question est la raison qui me fait écrire ces lignes : le rayonnement terrestre infrarouge (IR) sortant dans la haute atmosphère par la « fenêtre atmosphérique » (8 à 12 microns) et l'infrarouge « lointain » sont pour les petits glaçons d'un micron dans la zone de recouvrement entre diffusion de Mie et diffusion de Rayleigh où diffusion, absorption etc. « plongent » selon « Mie » avec la puissance 4 des dimensions ! Ces rayonnements censément stoppés là-haut et créateurs d'effet de serre fileraient donc assez largement vers l'espace ? Et maintenant, essayons de quantifier ces intuitions et d'en tirer les conséquences.

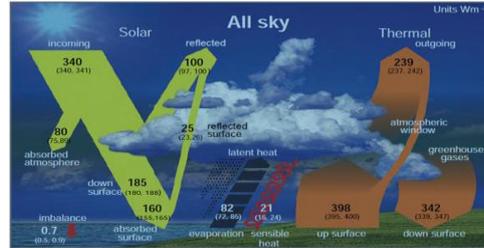
N.B. : suite à des entretiens avec quelques scientifiques en activité sur ces questions, étonnés par mes conjectures sur les dimensions des particules des « contrails », j'ai pu vérifier dans la littérature que la plupart des mesures récentes in situ en haute altitude donnent en effet des dimensions entre le demi-micron et quelques microns pendant « un certain temps ». Ce n'était pas le cas il y a 25 ans... D'où beaucoup d'efforts sur des granulométries de particules sans grand intérêt semble-t-il pour les « contrails ». Il faut dire que ces particules qui seraient classées en « P1 » au sol **ne se détectent et ne se mesurent que par des procédés optiques relativement récents, et qui plus est en vol...** Un « certain temps » signifie mille et quelques secondes, et un prélèvement là où la traînée est encore identifiable. Que se passe-t-il lorsque celle-ci, étalée, se mêle à la nébulosité ambiante ? C'est une autre affaire !

Rappel de quelques notions climatiques :

La planche ci-dessous bien connue dans la documentation du GIEC nous dit comment l'atmosphère peut renvoyer vers le ciel la lumière solaire et rabattre vers la Terre le rayonnement infrarouge « remontant » (ici en l'occurrence pratiquement au « sommet » de l'atmosphère, là où sont les cirrus). Les traînées peuvent donc renvoyer vers le haut une partie des 340 Wm^{-2} du soleil et vers le bas une partie des 398 Wm^{-2} « terrestres ».

⁶ IWC : Ice Water Content

⁷ A volume constant la surface croît en effet comme l'inverse de la taille des particules.



Deux questions sur les ordres de grandeur des phénomènes radiatifs nous interpellent donc...

- Quelle épaisseur de nuage et quel type de particule de glace faut-il pour rendre un cirrus suffisamment visible dans une atmosphère très froide, très pauvre en vapeur d'eau, comme on en trouve en haute altitude (> FL350, > 10 000m) pour renvoyer comme le fait la neige ou une surface claire, une bonne partie du rayonnement solaire ? (notion d'albédo)
- Si, comme on va le voir, il faut que là-haut ces particules soient très petites, de l'ordre du micron, comment interagissent-elles avec les émissions infrarouges (IR) terrestres ?

Dans un article récent (13 mars 2025) affiché en « Libre Propos » sur le site de l'Académie de l'Air et de l'Espace <https://academieairespace.com/documents-et-medias/balades-tropospheriques-lessentiel-est-il-invisible-pour-les-yeux/>, j'ai développé un peu le calcul suivant :

- Avec de l'air sursaturé d'eau (20 mg/m³ à -56°C) vers 10 000 m faisons apparaître un nuage **visible** de 50 à 100m d'épaisseur porteur de particules de 1 micron . *On resterait encore « transparent » avec la même masse d'eau si ce nuage est formé de particules de 10 microns*. Le nuage à « 1 micron » sera diffusant et réfléchissant.
- Ses particules de 1 micron laissent passer assez largement l'**infrarouge terrestre** dont la plus grande partie à cette altitude rayonne vers 8-12 microns (« fenêtre atmosphérique ») et bien au-delà...

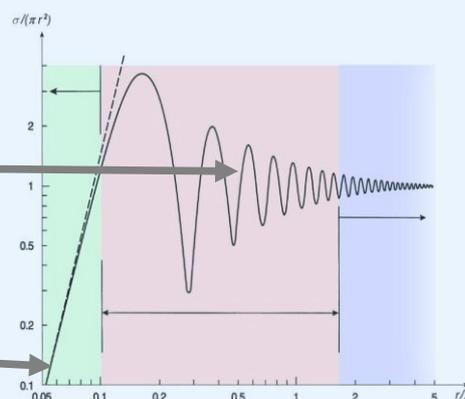
Donc on renvoie du visible et on laisse passer de l'infra-rouge ! Avec des glaçons de 10 microns, le visible et l'infra-rouge feraient « jeu égal » mais avec 1 micron, l'infra-rouge « passe son chemin ». Pourquoi ? Parce que la diffusion de Mie est au bord de ses limites lorsque l'obstacle quel qu'il soit est bien plus petit que la longueur d'onde et son effet décroît alors comme la puissance 4 des dimensions dudit obstacle... !

Diffusion de Mie pour les unes, à la limite de la diffusion de Rayleigh pour les autres !

Visible ou IR, pour des diamètres autour de 1µm, le grand écart entre les efficacités de diffusion !
En abscisse, longueur d'onde rapportée aux dimensions de la particule, en ordonnée, efficacité de diffusion

Diffusion de Rayleigh (vert)
Diffusion de Mie (rose)
Optique géométrique (gris-bleu)

Position d'une particule de diamètre 1µm vis à vis du visible ($\lambda \sim 0,5\mu\text{m}$)
Et sa position vis à vis de l'IR de la fenêtre atmosphérique ($\lambda \sim 10\mu\text{m}$)



Échelles approximatives, figure « empruntée »

Ceci semble simple, mais quand pendant vingt ans on a vu une majorité de mesures sur des « grosses » particules vers 10 microns et plus, la différence forte qui n'apparaît, il faut le dire, que pour les particules « microniques » ni plus petites ni plus grandes ne saute pas aux yeux dans les articles.

Et vu que dans les minutes qui suivent la formation du « contrail », on ne voit pas une croissance rapide de sa granulométrie par capture de molécules de la vapeur d'eau environnante (mais en reste-t-il suffisamment?), on se trouve devant des nuages qui diffusent le visible et laissent passer l'infra-rouge (au total un effet « parasol »). La compilation de mesures de Schumann en annexe de cet article semble indiquer que, pendant une vingtaine de minutes, les cristaux restent de petite taille (1 micron - ou +) donc refroidissants et qu'ensuite, tout semble possible ! Et que deviennent les glaçons de ces nuages initiaux lorsque les traînées se disloquent et se perdent dans l'atmosphère ambiante ? **Comment s'y prendre alors pour des mesures pertinentes ?**

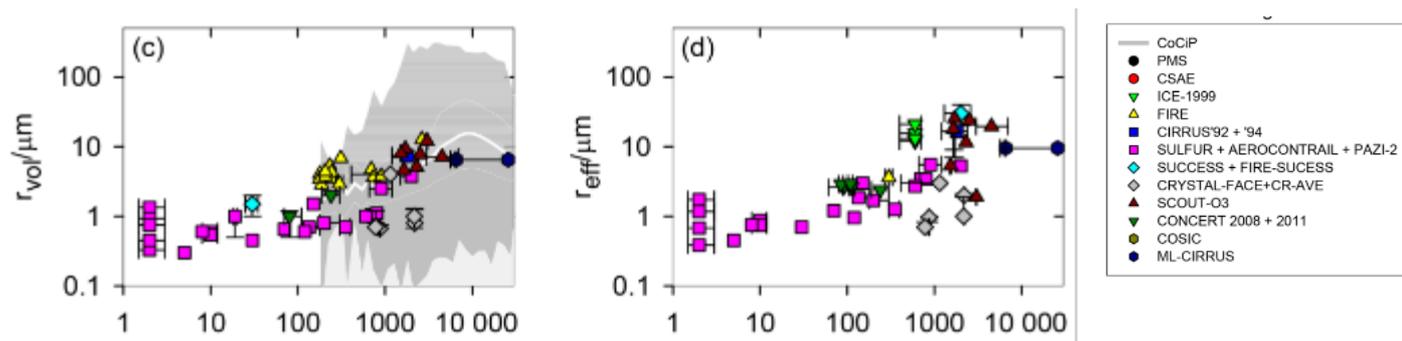
Question : À condition de voler aux altitudes où se trouvent (à nos latitudes : 10 500-12 000m) des concentrations de vapeur d'eau entre quelques mg/m³ et une vingtaine de mg/m³, les moyens et longs courriers auraient-ils donc un fort effet refroidissant (de jour) et un très faible effet réchauffant la nuit ?

Un rêve ?

Annexe :

Exemples de mesures de particules dans des traînées de condensation encore jeunes

Extraits d'une compilation de données en 2017 où l'on voit le rayon équivalent des particules rester à environ 1 micron pendant 20 minutes puis une grande dispersion des résultats.



En abscisse : des secondes

Atmos. Chem. Phys., 17, 403–438, 2017 Properties of individual contrails: a **compilation of observations** and some comparisons **Ulrich Schumann**,

« Most of the ice particles had sizes between 0.35 and 1.5 μm , with 10 μm maximum size »