

LES PHENOMENES DE TRANSPORT DE MASSE DANS LA STRATOSPHERE

EDMOND A. BRUN

Membre de l'Académie des Sciences de l'Institut de France

(Reçu le 19 Février 1975)

Résumé—Cet article décrit différentes expériences originales, réalisées pour mieux connaître les mécanismes suivant lesquels les polluants de la basse stratosphère sont transportés à plus haute altitude.

ON SE préoccupe depuis longtemps et avec juste raison, de la pollution de la stratosphère. Ce fut, d'abord, celle que provoquent les éruptions volcaniques, puis celle qu'entraînent les explosions nucléaires, enfin plus récemment, celle qui résulterait de l'émission des gaz d'échappement d'avions volant dans la stratosphère ou de l'injection de fréons, si augmentait de plus en plus l'emploi de bombes à aérosols.

Le danger des diverses formes de pollution tient surtout à la diminution de la masse d'ozone qui se trouve dans la stratosphère. On sait, en effet que, malgré sa faible masse, l'ozone arrête les radiations ultraviolettes, comprises entre 290 et 320 nm et responsables de l'érythème (coup de soleil) et des cancers de la peau. Les biologistes admettent en général qu'une diminution d'un pour cent de la masse d'ozone entraînerait, pour un même temps d'exposition au soleil, une augmentation de deux pour cent des cancers de la peau de l'homme blanc.

Or les réactions qui provoquent la destruction de l'ozone se situent dans la moyenne stratosphère, à une altitude généralement très supérieure à celle où sont introduits les agents de pollution: d'où l'importance de connaître les mécanismes suivant lesquels se transportent les polluants du lieu où ils sont émis au lieu où ils réagissent. Ces mécanismes se classent d'après leur échelle: à petite échelle, c'est la turbulence de l'atmosphère qui se manifeste; à grande échelle il faut considérer la circulation générale et les vents; à moyenne échelle interviennent des mouvements plus ou moins organisés qui permettent le passage de la grande échelle à la petite. Nous allons examiner cela de plus près dans un cas particulier.

Des comités d'études sur les conséquences des vols stratosphériques ont été constitués dans divers pays: Etats Unis, Royaume Uni, France. En France, le comité représenté par le sigle COVOS s'est préoccupé surtout de l'action des gaz d'échappement des réacteurs d'avions supersoniques (Concorde, Tupolev 144) sur l'ozone atmosphérique. Il a été ainsi amené à étudier le transfert vertical des oxydes d'azote NO et NO₂ (on dit NO_x) contenus dans les gaz d'échappement (12-18 g/kg de fuel brûlé). Ces effluents sont en effet émis à une altitude voisine de 17 km et les réactions de destruction de l'ozone par les oxydes NO_x ne peuvent devenir notables qu'au dessus de 25 km.

Au dessus de 20 km, des transports verticaux associés aux ruptures de la tropopause contribuent de façon notable au renouvellement des masses d'air stratosphériques, mais les phénomènes de turbulence en ciel clair prennent une importance croissante au fur et à mesure que l'altitude augmente, et il apparaît qu'au dessus de 20 km, la diffusion turbulente est le processus qui contribue le plus au transport vers le haut des oxydes NO_x.

La Fig. 1, tirée du Second Annual Report of DOT-CIAP Program, publié par le Lawrence Livermore Laboratory, montre la très grande variabilité des modèles actuellement utilisés pour rendre compte de la variation verticale du coefficient de transport turbulent. Pour MacElroy, ce coefficient augmente avec l'altitude à partir de 20 km, alors que pour Chang, le sens de variation est inverse.

Le COVOS a décidé de faire porter son effort plus particulièrement sur ces problèmes de transport vertical par turbulence. Je vous signalerai trois voies d'étude.

1. On sait que les couches turbulentes d'une atmosphère claire introduisent des déformations dans les ondes lumineuses émises par une étoile et, par suite, des fluctuations de phase et d'intensité dans le plan focal d'un télescope. La méthode développée par Vernin et Roddier [1] consiste à mesurer les corrélations spatioangulaires entre les signaux par deux photomultiplicateurs, à la distance r l'un de l'autre, recevant chacun la lumière de l'un des éléments d'une étoile double (Fig. 2). Les deux lignes de visée se coupent à l'altitude $h = r\theta$, où θ est l'écart angulaire de l'étoile double. Dans le cas de l'étoile Castor, où $\theta = 2$ secondes d'arc, la valeur de h en kilomètres est égale à celle de r en cm. En faisant varier r de 0-20 cm, on fait varier h de 0-20 km.

On mesure l'autocorrélation spatioangulaire de la scintillation, en fonction de la distance r , dans le cas où la droite joignant les deux récepteurs et la droite joignant les deux étoiles sont parallèles (Fig. 3), puis dans le cas où ces deux droites sont perpendiculaires (Fig. 4). La théorie montre que la différence entre ces deux corrélations en fonction de r (Fig. 5) passe par des maximums quand les deux faisceaux se coupent dans une couche turbulente. Ces maximums donnent ainsi les hauteurs h où se situent les couches turbulentes, leur valeur permettant d'atteindre l'intensité de la tur-

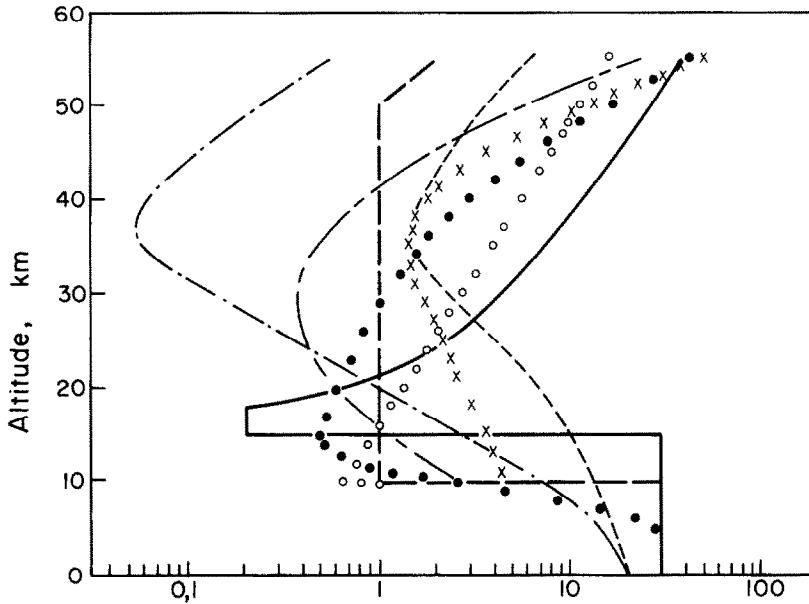


FIG. 1. Coefficient de diffusion turbulente.

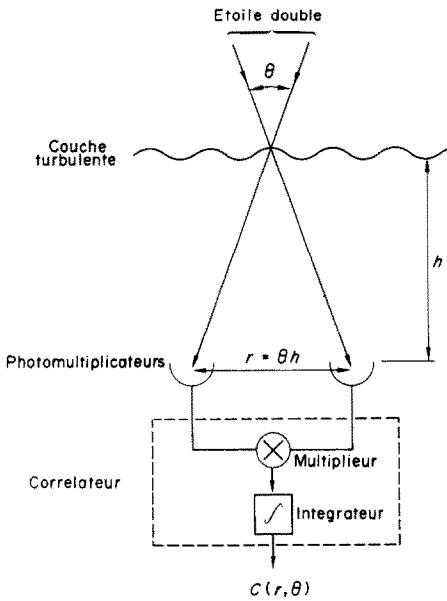


FIG. 2. Schéma des appareils optiques et électriques.

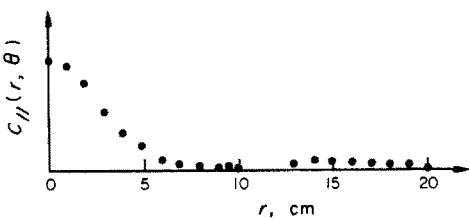


FIG. 3. Corrélation spatioangulaire parallèle à l'étoile double Castor.

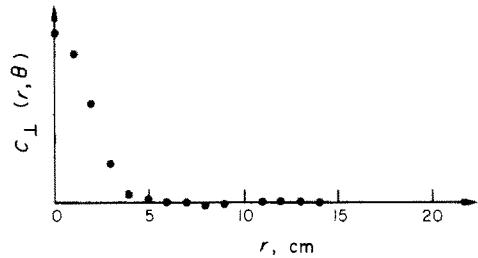


FIG. 4. Corrélation spatioangulaire perpendiculaire à l'étoile double Castor.

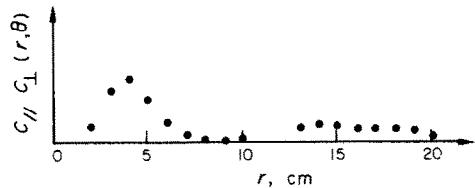


FIG. 5. Différence entre les corrélations spatioangulaires de l'étoile double Castor, montrant trois couches turbulentes à 4, 14 et 18 km.

bulence à ces diverses hauteurs. Pour l'exploration représentée sur la Fig. 5, les couches turbulentes sont à des altitudes de 4, 14, 18 km, correspondant à des valeurs de r de 4, 14 et 18 cm. La précision sur la mesure de l'altitude n'est que de l'ordre du kilomètre, à cause de la largeur de l'autocorrélation spatiale.

2. Ainsi, ces mesures devraient permettre de situer les couches turbulentes et de donner une idée de l'importance de cette turbulence. Avec la méthode de Barat [2], on mesure, à l'aide d'un ballon, les fluctuations de la vitesse du vent. Grâce à la sensibilité des anémomètres utilisés (la résolution est de 0,1 cm/s et la

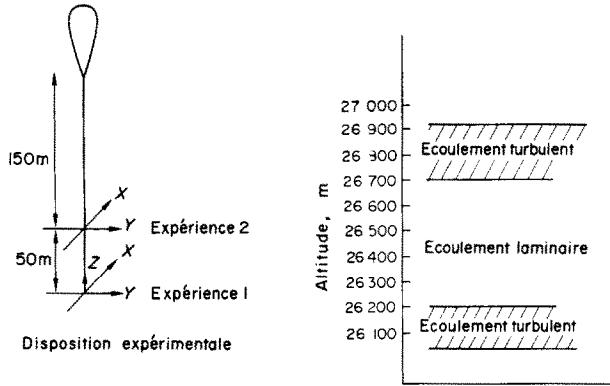


FIG. 6. Structure verticale de la turbulence en atmosphère claire à haute altitude.

constante de temps de 1 ms), on peut donc accéder directement à la microéchelle et obtenir le spectre d'énergie des différents composants dans le domaine inertiel. Par la théorie classique de Kolmogoroff, on détermine alors l'intensité de la turbulence, le taux de dissipation d'énergie, les coefficients de diffusion.

La Fig. 6 montre le dispositif utilisé: deux groupes d'anémomètres, situés à 50 m l'un de l'autre, sont fixés à un ballon situé à 150 m au dessus du groupe le plus

haut. La corrélation entre les deux groupes d'appareils est donc indépendante du mouvement du ballon, lequel est très lent. Il est facile avec ce dispositif de retrouver la structure en couches qui caractérise la moyenne stratosphère.

La Fig. 7 montre la courbe d'enregistrement des fluctuations de vitesse en fonction du temps, obtenues le 12 octobre 1974, d'une part dans une couche turbulente à une altitude de 26 800 m, d'autre part, dans

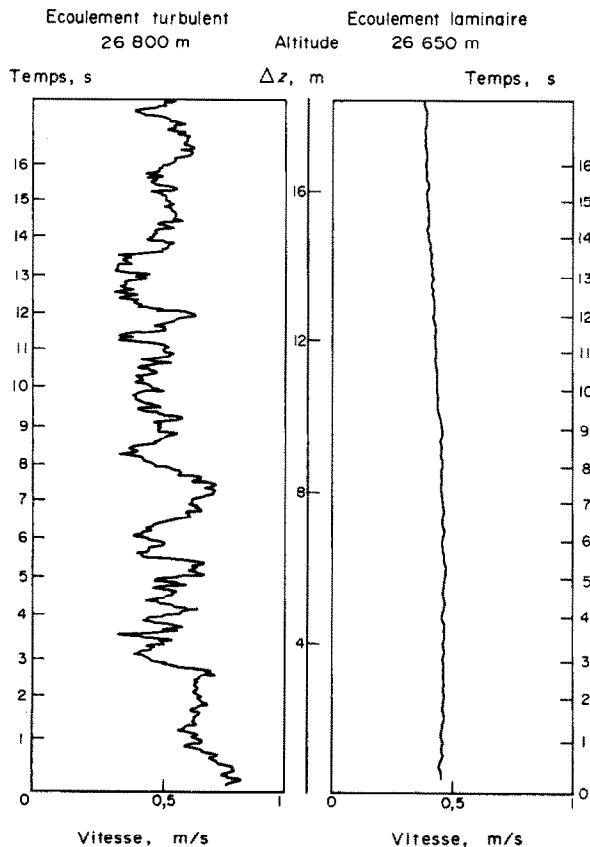


FIG. 7. Structure verticale de la turbulence en atmosphère claire à haute altitude.

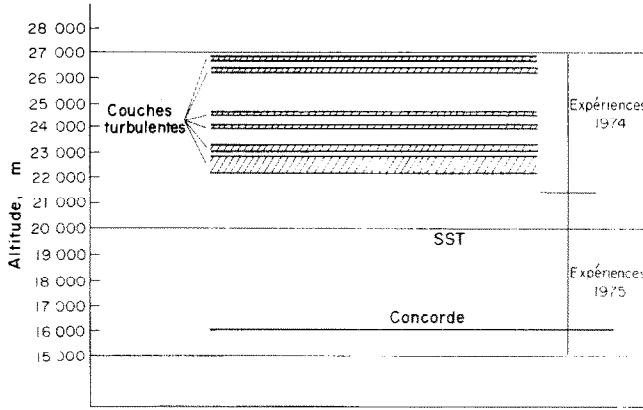


FIG. 8. Distribution verticale de la turbulence en atmosphère claire à haute altitude.

une couche calme à une altitude de 26 650 m. La Fig. 8 donne l'ensemble des résultats obtenus le même jour. Ce résultat est très caractéristique. Un profil effectué en décembre de la même année a donné sensiblement les mêmes résultats, de sorte que, peut-être, il est possible de définir un modèle à de telles altitudes.

3. Une étude à moyenne et à grande échelle est cependant utile pour mettre en évidence le passage de l'énergie des mouvements plus ou moins organisés aux mouvements de plus petites dimensions où finalement l'énergie est transformée en chaleur par les effets visqueux. Cette étude a été conduite par Veret et Bouchardy [3], en utilisant un traceur passif. Une série de nuages de tétrachlorure de titane ont été injectés à partir de ballons dans la basse stratosphère. Sur la Fig. 9, on voit l'évolution du nuage en fonction du temps à une altitude de 15 km. De ces observations ont été tirés des premiers résultats concernant la diffu-

sion horizontale (Fig. 10): pendant les premières minutes, l'extension du nuage est rapide, ce qui est compatible avec le domaine inertiel de turbulence; au contraire quand la dimension du nuage est grande par rapport à l'échelle de microturbulence, l'extension est beaucoup plus lente. Pendant cette période, à l'intérieur du nuage naît une structure fine dont l'étude, actuellement en cours, permettra d'accéder au terme de transport vertical par turbulence.

La structure stratifiée que nous venons de décrire montre qu'il est nécessaire d'introduire des gradients de vitesse variant fortement avec l'altitude, ce qui rend difficile l'étude de la diffusion.

Il est prévu d'utiliser simultanément les trois méthodes précédentes au cours de cette année. Cet effort expérimental permettra peut-être de mieux comprendre les phénomènes dynamiques dont la stratosphère est le siège.

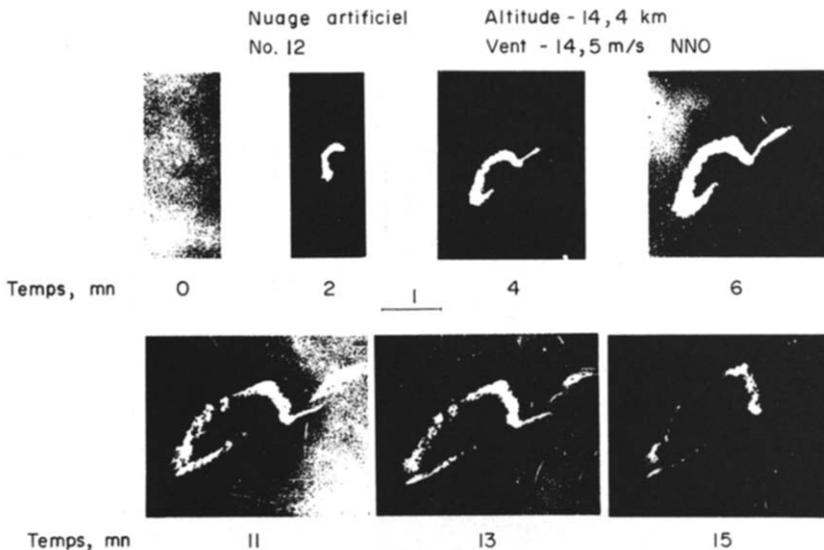


FIG. 9. Clichés successifs de l'expansion d'un nuage artificiel.

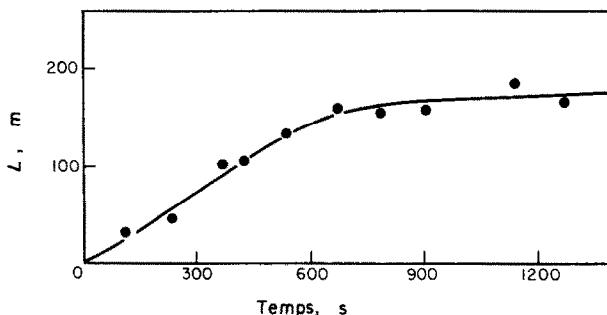


FIG. 10. Variation, en fonction du temps, de l'étendue horizontale d'un nuage artificiel.

REFERENCES

1. J. Vernin, F. Roddier, et A. Rocca, Detection of atmospheric turbulent layers by spatiotemporal and spatio-angular correlation measurements of stellar-light scintillation, Université de Nice, Département d'Astrophysique (Laboratoire Associé du C.N.R.S.) Parc Valrose 06034 Nice Cedex, France [Reprinted from: *J. Opt. Soc. Am.* **64** (7) (July 1964).]
2. J. Barat, Etude expérimentale de la structure du champ de turbulence dans la moyenne stratosphère, *C. R. Hebd. Seanc. Acad. Sci., Paris* **280B** (1975) (à paraître).
3. C. Veret, Dispersion of artificial clouds in the stratosphere. A. M. Bouchardy, Lidar measurements of stratospheric aerosols, ONERA, 29 av. de la Division Leclerc 92320, Chatillon-sous-Bagneux, France, T. P. ONERA No. 1404 (1974).

MASS TRANSPORT IN THE STRATOSPHERE

Abstract—This paper describes various new experiments fulfilled in order to reach a better understanding on the mechanisms by which the low stratosphere pollutants are transported up to a higher altitude.

DIE PHÄNOMENE DES MASSENTRANSPORTS IN DER STRATOSPÄRE

Zusammenfassung—Dieser Artikel beschreibt verschiedene neue Experimente, die durchgeführt wurden, um die Mechanismen besser kennenzulernen, durch die Verunreinigungen von der unteren Stratosphäre in größere Höhen getragen werden.

ЯВЛЕНИЯ ПЕРЕНОСА МАССЫ В СТРАТОСФЕРЕ

Аннотация — В статье описываются ряд новых экспериментов, проведенных для лучшего понимания механизмов переноса загрязняющих стратосферу веществ из нижних слоев в более высокие.