

sphériques. Plus récemment, l'IRD en a mis un nouveau (Pixy) au point pour l'observation de la surface.

En restant dans les systèmes mobiles, on peut encore citer les dirigeables, heureusement maintenant remplis à l'hélium. Ce sont des vecteurs lents, très soumis aux perturbations atmosphériques ; et difficilement contrôlables si le vent dépasse les 15 m/s. Un ballon dirigeable de ce type (le BLIMP) a été mis au point aux États-Unis comme plate-forme d'observation scientifique. Ces engins ont été utilisés avec des instruments de télédétection au-dessus

de la mer. Toutefois, il est nécessaire de disposer de prévisions très fiables sur la vitesse du vent à la fois pour le déroulement et pour le retour de l'expérience.

Les textes qui suivent ont trait à une utilisation assez classique des avions de recherche atmosphérique (mesures de paramètres moyens et de la turbulence *in situ*). Viendront ultérieurement trois textes abordant des utilisations moins classiques : analyse de la rugosité et de l'humidité de la surface et classification des parcelles par radar.

Mesure aéroportée des flux turbulents

PIERRE DURAND

Pourquoi faire des mesures de flux ?

Les sciences de l'environnement sont toujours confrontées au problème d'établir le bilan d'une quantité, qu'il s'agisse de mouvement, d'énergie ou d'espèces minoritaires de l'atmosphère. Sans rentrer dans le développement d'équations bien connues des physiciens de l'air et de l'eau, on conçoit que les flux de ces quantités y jouent un rôle prépondérant. On peut ainsi mentionner trois grands domaines d'applicabilité directe des mesures de flux.

Le bilan d'énergie de la planète

L'énergie disponible à la surface R_n , dont la source est le rayonnement du soleil, est convertie en flux de conduction de chaleur dans le sol G , en flux de chaleur vers l'atmosphère H , et en évaporation de l'eau de surface LE (flux de chaleur latente). La mesure directe et précise des deux derniers termes, qui sont des flux turbulents, est nécessaire car l'impact cumulé d'une incertitude, même faible, a des conséquences importantes à la fois pour les prévisions météorologiques à moyenne échéance (bilan des systèmes précipitants par exemple), et sur les scénarios climatiques.

D'autre part, l'action mécanique de la surface sur l'écoulement atmosphérique (flux de quantité de mouvement) participe de façon notable à la météorologie locale (impact des changements paysagers tels que l'urbanisation) ou à plus grande échelle (effet des montagnes par exemple). Là aussi, des mesures sont indispensables pour asseoir des outils numériques performants.

L'impact climatique des émissions de gaz à effet de serre

Les échanges à travers la surface (qu'elle soit continentale ou océanique) des gaz à effet de serre tels que gaz carbonique ou le méthane conditionnent le futur

climat de la planète. Des valeurs réalistes doivent donc être fournies aux modèles pour anticiper les conditions à venir et étudier les conséquences de divers scénarios de réduction des émissions de ces gaz.

Les problèmes de pollution locale et régionale

Sans parler des transformations chimiques dont le rôle est indéniable dans l'apparition des épisodes de pollution (cas de la pollution photochimique par exemple), ceux-ci sont dépendants des émissions à la surface de polluants primaires, du transport horizontal et vertical et de la diffusion turbulente, tous termes dont la validation passe par des mesures de flux.

Flux et flux turbulent

L'encadré 1 explicite le calcul du flux moyen à partir d'un formalisme simple de décomposition d'un signal entre sa valeur moyenne (moyenne sur un intervalle de temps ou sur un intervalle d'espace) et sa fluctuation : le surlignage des variables veut simplement dire que l'on a effectué une telle moyenne.

La mesure aéroportée des flux turbulents

Historiquement, les mesures de flux ont commencé à être réalisées sur des plate-formes installées à la surface, et ce dès que des instruments rapides utilisables dans l'atmosphère ont été disponibles (années 1960). Très vite, ces techniques ont été transposées sur des avions, car la mesure aéroportée offre, par rapport à la mesure de surface, un certain nombre d'avantages :

- l'avion permet de réaliser des mesures en altitude, et donc d'obtenir des profils ;
- l'avion permet de réaliser une intégration spatiale, c'est-à-dire d'étendre la représentativité d'une mesure locale ;

PIERRE DURAND

Maître de conférences

CNRM-Météo-France

URA CNRS 1357

42, avenue Coriolis

31157 Toulouse cedex, France

Pierre.Durand@meteo.fr

- l'avion autorise des mesures en zone d'accès difficile : milieu marin, forêts, zones désertiques, montagneuses, etc. ;
- l'avion respecte, pour les mesures de turbulence, l'hypothèse de Taylor, qui stipule que la vitesse d'échantillonnage des tourbillons doit être grande devant leur temps d'évolution ;
- le temps requis pour estimer un flux turbulent avec un avion (typiquement 5 minutes) respecte mieux l'hypothèse de stationnarité que celui nécessaire aux mesures de surface (de l'ordre de 20 minutes) ;
- l'avion peut échantillonner dans différentes directions, et ainsi détecter des anisotropies du champ atmosphérique.

À cela viennent s'opposer des inconvénients dont voici quelques exemples :

- la détermination de paramètres de surface (fondamentale dans beaucoup de domaines, comme on l'a vu ci-dessus), ne peut se faire que de façon indirecte, par extrapolation de mesures d'altitude ;
- la mesure aéroportée est délicate :
 - il faut compenser les mouvements et l'attitude de l'avion pour accéder au vecteur vitesse de l'écoulement atmosphérique ;
 - la vitesse de l'avion induit des perturbations aérodynamiques sur les mesures (température d'impact, variations de densité, difficulté de prélèvements isocinétiques, etc.) ;
 - l'environnement est hostile pour des acquisitions de mesure (rayonnement, bruit, etc.) ;
 - l'intégration physique des instruments est souvent difficile (encombrement, poids, certification aéronautique, etc.).

Encadré 1

Le flux moyen d'une quantité X , quantité transportée dans la direction i par la vitesse U , s'écrit :

$$\overline{U_i X} = \overline{U_i} \overline{X} + \overline{U_i X'}$$

ce qui revient à séparer le transport total en transport par le mouvement moyen et transport turbulent. Suivant que l'on regarde ce qui se passe dans les directions horizontale ou verticale, la prépondérance de ces deux termes change : ainsi, très près de la surface, le terme dominant est le transport vertical turbulent (les vitesses moyennes horizontale et verticale étant très faibles). Plus haut, dans la couche limite atmosphérique (disons dans le premier kilomètre d'atmosphère), le transport turbulent est prépondérant dans la direction verticale, alors qu'il est minoritaire dans les directions horizontales. On s'intéressera donc dans ce qui suit au seul flux vertical turbulent.

Les techniques de mesure de flux

Les difficultés que nous avons mentionnées font que la plupart des techniques de mesure de flux utilisées en avion sont des adaptations à l'aéroporté de choses largement éprouvées par ailleurs sur des plate-formes de surface. Nous allons citer les principales, certaines validées depuis longtemps, d'autres encore en cours de développement.

La méthode des corrélations turbulentes

C'est en fait la seule méthode directe, puisque le flux WX' est calculé à partir de la mesure des deux paramètres W' et X' (W' représente la fluctuation turbulente de la vitesse verticale de l'air). La difficulté est qu'il faut mesurer ces deux quantités dans toute la gamme d'échelles de mouvement (tourbillons) qui participent au flux turbulent. Dans la couche limite atmosphérique, cela va de quelques mètres à quelques kilomètres, c'est-à-dire, compte tenu de la vitesse d'échantillonnage de l'avion (autour de 100 m/s), qu'il faut faire de bonnes mesures à des fréquences allant de 10 Hz à 0,01 Hz. Depuis maintenant une trentaine d'années, ces techniques sont assez bien maîtrisées pour la mesure du vent, de la température et de l'humidité. Elles nécessitent une instrumentation assez sophistiquée (centrale à inertie pour correction rapide des mouvements de l'avion, mesures pneumatiques rapides pour la mesure du vecteur écoulement avec corrections de distorsion, capteurs de température et humidité à la fois rapides et de référence). Cette méthode a été appliquée avec succès également à l'ozone et au gaz carbonique, mais on ne peut pas encore parler de mesures « de routine », car elles restent l'apanage d'une ou de quelques équipes à travers le monde.

Les avantages de cette méthode sont qu'elle est « basique » et ne nécessite donc pas de paramétrisation pour accéder aux flux, et qu'on peut lui appliquer des critères statistiques pour estimer la précision des estimations fournies. Son inconvénient est le petit nombre de paramètres auxquels elle peut s'appliquer actuellement.

La méthode d'accumulation turbulente

Nous l'appellerons de son sigle anglo-saxon REA pour *Relaxed eddy-accumulation*. Le principe est le suivant : on calcule à haute cadence (disons 10 Hz) la vitesse verticale de l'air turbulent W' et, en fonction du signe de ce paramètre, on prélève l'air et on l'accumule dans deux réservoirs (baptisés « haut » pour celui qui reçoit l'air montant et « bas » pour celui qui reçoit l'air descendant). À l'issue d'un temps correspondant à la durée qu'aurait nécessité le calcul du flux par la méthode des corrélations (5 minutes en avion, 20 minutes à la surface), on mesure dans chaque réservoir la concentration moyenne du composé dont on cherche à estimer le flux. Celui-ci est alors estimé simplement à partir de la différence de concentration entre « haut » et « bas », et de l'énergie turbulente de l'air pendant l'accumulation.

L'intérêt principal de cette technique est qu'elle ne nécessite pas de capteur rapide. Son inconvénient est qu'elle est limitée à des composés en trace dont le

temps de réaction est grand par rapport à la période d'accumulation (on peut dans certains cas s'affranchir de cette contrainte en prélevant dans les réservoirs des échantillons que l'on piège sur cartouches inertes, et que l'on analyse a posteriori ; le système en devient alors plus lourd à mettre en œuvre). Sur plate-forme fixe à la surface, cette technique est assez largement utilisée. Son adaptation sur un porteur mobile pose comme principal problème le calcul en temps réel de la vitesse verticale de l'air, corrigée des mouvements du porteur (cette information est indispensable pour la commande du système de prélèvement). Un prototype aéroporté a été développé avec succès par des équipes françaises dans les années 1990 (Delon, 1999) ; un autre fonctionne sur navire (Brut et al., 2001), et sa transposition sur avion ne pose pas de difficulté de principe.

La méthode d'échantillonnage disjoint

On la nomme DEC pour *Disjunct eddy-correlation*. Elle consiste à appliquer la méthode des corrélations à un nombre réduit de points choisis sur un échantillon (typiquement, quelques dizaines sur une série temporelle de quelques milliers). Le principe est de réaliser un prélèvement rapide (de l'ordre de 1/10 seconde), et de prendre ensuite le temps qu'il faut (quelques secondes, en fonction de performances de l'analyseur) pour l'analyser. À la fin de l'analyse, on refait un prélèvement, et ainsi de suite. Il ne reste plus qu'à corréler les échantillons analysés avec la vitesse verticale calculée au moment du prélèvement. Il a été montré que cette technique fonctionnait au sol avec un nombre réduit de points, c'est-à-dire que le temps total requis pour faire une estimation de flux avec une précision raisonnable n'était pas augmenté de façon importante par rapport à une méthode de corrélation « complète » (Rinne, 2001). Des simulations numériques sur des séries temporelles de mesures aéroportées indiquent la viabilité de cette technique à bord d'avions de recherche. Les avantages sont la possibilité d'estimer des flux avec des capteurs peu rapides (temps de réponse de l'ordre de quelques secondes), l'applicabilité à des espèces peu réactives à l'échelle du temps d'analyse, et le fait que le calcul en temps réel de la vitesse verticale n'est pas indispensable. Il faut noter que l'instrument et sa mise en œuvre sont moins lourds que pour la REA.

Les autres techniques

Elles sont soit plus marginales, soit n'offrent pas les perspectives d'élargissement à des espèces nouvelles comme les deux précédentes. On mentionnera la méthode dissipative-inertielle qui permet d'accéder aux flux en ne mesurant que les caractéristiques haute-fréquence des signaux, via une paramétrisation liant les sources de l'énergie turbulente à sa dissipation. Un de ses avantages est qu'elle est affranchie d'un bon passage entre la mesure de vitesse et la mesure de scalaire. En pratique, son utilisation est confinée aux très basses altitudes (moins de 100 m), et à des paramètres pour lesquels on sait également appliquer la méthode des corrélations. On citera également la méthode *bulk*, qui

relie les flux aux quantités moyennes, et permet donc de se passer de mesures rapides, mais qui s'appuie sur des relations qui ne sont bien connues qu'au-dessus de la mer et valides à très basse altitude seulement.

La méthode dite de bilan (voir encadré 2) explicite à partir d'un formalisme physique classique tout ce qui rentre et sort d'un parallélépipède atmosphérique (boîte découpée dans l'espace) et dans un intervalle de temps. Les flux interviennent dans cette variation en tant que quantités (de mouvement, de chaleur, de contaminant...) traversant les différentes faces de cette boîte par unité de temps.

Encadré 2

Un mot enfin sur la méthode du bilan, basée sur l'estimation d'un terme d'une équation à partir de la mesure ou de la connaissance de tous les autres termes. Cette équation, pour une quantité X , peut s'écrire de la façon simplifiée suivante :

$$\frac{\partial \bar{X}}{\partial t} = - \bar{U} \frac{\partial \bar{X}}{\partial x} + (\overline{W'X'_0} - \overline{W'X'_h})/h + S - P$$

pour une boîte d'atmosphère s'étendant entre la surface (indice 0) et la hauteur h , avec d'éventuels sources (S) et puits (P), dus à des transformations chimiques par exemple. On voit que le(s) flux, s'il(s) ne peut(peuvent) être mesuré(s) directement, peut(peuvent) être estimé(s) si l'on a connaissance des autres termes de l'équation.

BIBLIOGRAPHIE

- Brut, A., Legain, D., Durand, P., Laville, P., Fotiadi, A., Serça, D., 2002. Use of the R.E.A technique to measure scalar fluxes on ground-based and mobile platforms. 15th Symposium on Boundary Layers and Turbulence, 15-19 July 2002, Wageningen, The Netherlands.
- Delon, C., 1999. Étude des échanges biosphère-atmosphère en milieu équatorial. Mesure aéroportée des flux de matière et d'énergie pendant la campagne EXPRESSO, Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse, France, 146 p.
- Druilhet, A., Durand, P., 1997. Experimental investigation of atmospheric boundary layer turbulence. *Atmos. Res.*, 43, 345-388.
- Durand, P., de Sa, L., Druilhet, A., Saïd, F., 1991. Use of the inertial-dissipation method for calculating turbulent fluxes from low level airborne measurements. *J. Atmos. Ocean. Tech.*, 8, 78-84.
- Durand, P., Bourcy, T., 2001. Turbulence structure of the Sc topped, marine atmospheric boundary-layer for two situations of the ACE-2 experiment. *Bound. Layer Meteorol.*, 99, 105-125.
- Durand, P., Dupuis, H., Lambert, D., Bénech, B., Druilhet, A., Katsaros, K., Taylor, P., Weill, A., 1998. Comparison of sea surface flux measured by instrumented aircraft and ship during SOFIA and SEMAPHORE experiments. *J. Geophys. Res.*, 103, 25125-25136.
- Lambert, D., Durand, P., 1998. Aircraft-to-aircraft intercomparison during SEMAPHORE. *J. Geophys. Res.*, 103, 25109-25123.
- Lenschow, D.H., 1986. Aircraft measurements in the boundary layer. In: D. H. Lenschow (Ed.), *Probing the Atmospheric Boundary Layer*, Amer. Meteorol. Soc., Boston, MA., 39-56.
- Mann, J., Lenschow, D.H., 1994. Errors in airborne flux measurements. *J. Geophys. Res.*, 99, 14, 519-14, 526.
- Rinne, H. J.I., Gunther, A.B., Warneke, C., De Gouw, J.A., Luxembourg, S.L., 2001. Disjunct eddy covariance technique for trace gas flux measurements. *Geophys. Res. Lett.*, 28, 16, 3139 - 3142.