

Mesures atmosphériques par avion

Aspects techniques

BERNARD GUILLEMET

BERNARD GUILLEMET
Physicien
LaMP/OPGC

Université Blaise Pascal
Campus universitaire des Cézeaux
24, avenue des Landais
63177 Aubière, France
B.Guillemet@opgc.univ-bpclermont.fr

Les mesures nécessaires à la description et à l'analyse de l'atmosphère ou des facteurs qui la conditionnent font de plus en plus appel aux méthodes par télé-détection : radars, lidars, sodars, radiomètres sur satellites, etc. L'avion de recherche atmosphérique peut être une plate-forme pour de tels moyens de mesures mais c'est également un moyen de mesures in situ. Il permet en effet :

- une certaine souplesse d'utilisation et de positionnement ;
- l'exploration d'une grande variété d'échelles (de quelques mètres ou moins à quelques dizaines de kilomètres) ;
- la réunion sur un même support d'instruments de mesure variés.

Les mesures par avion concernent traditionnellement des domaines comme la dynamique, la thermodynamique et la physico-chimie atmosphérique, la microphysique des nuages, le rayonnement, etc. Pour effectuer des mesures, l'utilisation d'avions nécessite la connaissance de quelques aspects spécifiques qui sont dus :

- à l'absence de contact rigide avec le sol, (problème de positionnement absolu) ;
- au déplacement du support avec ses conséquences sur :
 - le suivi du positionnement,
 - les effets directionnels (mesures du vent, du rayonnement...),
 - les effets dynamiques directs à travers la surpression exercée à l'amont du mobile.

À travers ce dernier effet, apparaît un couplage important entre les mesures dynamiques (la surpression qui dépend de la vitesse du support mais aussi de la masse volumique de l'air) et les mesures thermodynamiques, en premier lieu la température.

Un autre effet du déplacement doit être présent à l'esprit : plus la vitesse de l'avion est grande, plus il faut augmenter la cadence d'échantillonnage si l'on veut pouvoir explorer les petites échelles (pour un avion volant à 100 mètres par seconde, il faut une cadence d'échantillonnage de 10 Hz pour une résolution de 1 mètre – ou plus exactement de 2 mètres —). Les caractéristiques des capteurs (temps de réponse, bande passante) et des chaînes d'acquisition doivent être adaptées à cette contrainte.

Cet exposé ne vise pas une présentation exhaustive des mesures réalisables ou des problèmes connexes, mais plutôt à mettre en évidence les aspects essentiels à considérer dans l'utilisation des mesures de base en thermodynamique et dynamique atmosphérique. On évoque également les aspects de positionnement et les mesures radiatives.

Problèmes généraux des mesures sur avions : mesures thermodynamiques

Mesure de la température

Effet dynamique ; coefficient de récupération

Les thermomètres les plus couramment utilisés sont constitués d'un fil de platine bobiné dont la résistance varie avec la température. Comme dans une soufflerie, le thermomètre, placé dans le flux d'air, subit une surpression qui modifie la valeur de la température mesurée. Si T_s est la température de l'air vraie, la température mesurée (ou d'impact) T_i est obtenue à une pression « totale » supérieure à la pression environnante.

Il convient ainsi d'effectuer des corrections sur les températures mesurées explicitées dans l'encadré 1. Ces corrections sont réalisées à partir des différentes mesures de l'avion de recherche atmosphérique au bénéfice d'utilisateurs « non-spécialistes », mais impliqueraient d'être analysées pour tout autre aéronef.

Autres effets : rayonnement, temps de réponse, mesures en nuages

La température mesurée peut être influencée par d'autres facteurs :

- rayonnement. L'élément sensible peut être placé sous un capot (dont le rôle est d'ailleurs multiple : cf. ci-dessous) pour éviter le rayonnement solaire direct ;
- diffusion thermique du support et temps de réponse. Une schématisation de la réponse du capteur (analogue à celle d'un système de deuxième ordre) nécessite la connaissance pour chaque sonde de trois paramètres (Mac Carthy, 1973). L'effet du temps de réponse peut être important pour les mesures des fluctuations à fréquences élevées (>1 Hz) avec des conséquences sur les mesures de corrélations entre paramètres à ces échelles (Wyngaard et al., 1978) ;
- mesures en nuages. En nuages, l'évaporation des hydrométéores (gouttelettes, cristaux) au contact de l'élément sensible entraîne une diminution de la température mesurée. Pour éviter cet effet, on essaie en général de séparer mécaniquement les gouttelettes de l'air mesuré en utilisant l'inertie des particules (cas des sondes Rosemount, et surtout des sondes à « flux de retour » ; Rodi et Spysers-

Encadré 1

La différence entre T_s et T_i est importante. A une altitude correspondant à la pression $p_s = 500$ hPa, la température $T_i = 250$ K mesurée par un avion dont la vitesse entraîne une pression dynamique $P_d = 50$ hPa, correspond à une température vraie $T_s \approx 243,3$ K (la vitesse de l'avion par rapport à l'air est alors voisine de 115 m/s).

En réalité le champ dynamique et thermique autour de la sonde dépend de nombreux facteurs (forme, conductivité thermique, etc.). Il faut déterminer expérimentalement un « coefficient de récupération » de la sonde qui caractérise l'écart entre la valeur théorique de la température d'impact T_{iv} et la température mesurée T_{im} .

Dans le cas des sondes Rosemount, couramment utilisées, le coefficient de récupération est voisin de 1 ($\approx 0,97$) et pratiquement constant quelle que soit la vitesse en régime subsonique.

Pression « totale » : $p_t = p_s + p_d$

p_s : pression atmosphérique au niveau du vol,
 p_d : pression « dynamique »

En première approximation, en supposant une compression adiabatique, on peut calculer :

$$T_s = T_i(p_t \div p_s)^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} \approx T_i(p_t \div p_s)^{0,286}$$

$\gamma = 1,4$ est le rapport des chaleurs spécifiques à pression et volume constants.

« Coefficient de récupération » (sonde de température)

$$r = \frac{T_{im} - T_s}{T_{iv} - T_s}$$

La différence des températures au dénominateur peut s'écrire en fonction de la vitesse de l'écoulement non perturbé ou encore du nombre de Mach. On tire :

$$T_s = \frac{T_{im}}{1+r[(p_t \div p_s)^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} - 1]}$$

Certaines sondes ont des coefficients de récupération beaucoup plus faibles qui doivent être connus (cas des sondes de type « à flux de retour » pour lesquelles le coefficient de récupération est de l'ordre de 0,6 à 0,7).

Duran, 1972 ; Daw, 1977). Il est cependant difficile d'être certain que l'élément reste sec et les corrections éventuelles sont délicates et limitées (Lenschow et Pennell, 1974 ; Lawson et Cooper, 1990 ; Lawson et Rodi, 1987).

Il faut encore noter le problème posé par le givrage possible des sondes et de leurs supports dans les nuages « froids ». Pour pallier cet inconvénient, certaines sondes sont dégivrées (sonde Rosemount « dégivrée ») ; mais les caractéristiques de réponse sont parfois différentes des sondes (identiques) non dégivrées.

Autres méthodes

D'autres types de sondes de température ont été ou sont également testés pour améliorer les temps de réponse (étude de turbulence) et la fiabilité de la mesure en nuage.

Sur le Merlin IV de Météo-France, un thermo-anémomètre sonique dont le principe repose sur la détermination de la vitesse du son et la séparation des effets de température sur cette vitesse est quasiment opérationnel bien que des tests soient encore poursuivis (Cruette et al., 2000).

Des sondes radiométriques ont été ou sont également développées (absorption du CO_2 par exemple).

Mesure de l'humidité

L'humidité de l'air peut être décrite de différentes façons : teneur en eau vapeur ou humidité absolue, humidité relative, température de rosée, etc. Chaque capteur a ses propres limitations et demande des calibrages spécifiques.

Mesure du point de rosée

La température du point de rosée T_d est atteinte lorsque la condensation apparaît par refroidissement. Sa connaissance, dans les conditions environnantes de pression et de température, permet de déduire les autres grandeurs décrivant l'humidité (comme l'humidité relative ; encadré 2) :

- plus la température du point de rosée est basse, plus il est difficile et long de refroidir suffisamment le support. Pratiquement, les plus basses valeurs du point de rosée accessibles sont autour de $-50^\circ C$, un peu moins avec les « hygromètres cryogéniques » (Busen et Buck, 1995) ;
- dans le cas de températures du point de rosée négatives, le point de rosée devient un point de glaciation et la tension de vapeur saturante est à prendre par rapport à la glace ;
- il peut être nécessaire de prendre en compte la pression au voisinage de l'élément sensible.

Mesure directe de l'humidité relative

L'humidité relative est mesurable directement par des capteurs du type hygristor (résistance) ou du type capacitif. Les courbes d'étalonnage sont assez complexes avec influence de la température.

Un des avantages de ces sondes réside dans leur temps de réponse relativement court : quelques dixièmes ou centièmes de seconde (voir une comparaison des réponses dans Busen et Buck, 1995).

Leurs limitations viennent de leur imprécision aux faibles (inférieures à 30 %) humidités relatives et des effets d'hystérésis après saturation (particulièrement dans le cas des hygristors). Ils nécessitent un réétalonnage fréquent.

Encadré 2

Dans la pratique la mesure de T_d est obtenue à partir du refroidissement d'un support (effet Peltier, refroidissement cryogénique). Un asservissement permet de stabiliser la mesure avec un temps de réponse de quelques secondes.

Limitations : Connaissant la température de rosée T_d , on connaît la tension de vapeur saturante :

$$e_s(T_d) = e(T)$$

et l'humidité relative (en %) :

$$H = 100 \cdot \frac{e(T)}{e_s(T)} = 100 \cdot \frac{e_s(T_d)}{e_s(T)}$$

Mesure de l'humidité absolue : absorption Lyman- α

Ce type d'hygromètre utilise l'absorption d'un rayonnement lumineux par la vapeur d'eau (raie « Lyman- α » de l'hydrogène à 121,56 nm). Il fournit une mesure directe de la teneur en vapeur d'eau (ou densité de vapeur) ρ_e fonction du coefficient d'absorption et de la longueur du trajet optique (typiquement de 0,5 à 2 cm).

Le temps de réponse est très court (de l'ordre du millième de seconde) et, dans la basse troposphère, c'est un hygromètre très sensible. En altitude, ρ_e et ses variations sont faibles (à -40°C la densité de vapeur saturante est de l'ordre de $0,2 \text{ g/m}^3$) et la sensibilité de l'appareil décroît. D'autres constituants gazeux interviennent également sur l'absorption de la raie Lyman- α comme l'oxygène et surtout l'ozone.

Les principaux problèmes proviennent des modifications de la transmission dues au vieillissement du tube émetteur ou à la dégradation des fenêtres. Un calibrage est donc nécessaire avec une mesure de référence (point de rosée), mais sur des fréquences compatibles avec les deux appareils (ex. : Friehe et al., 1986).

Autres méthodes de mesure de l'humidité

D'autres propriétés physiques peuvent être utilisées pour les mesures de l'humidité. On peut noter par exemple le développement récent d'un réfractomètre mesurant l'indice de réfraction de l'air en micro-ondes (9,45 GHz) applicable en particulier en basse troposphère (Delahaye et al., 2001).

Il existe également dans la communauté internationale un analyseur infrarouge (Desjardins et MacPherson, 1991), un senseur à fluorescence de la vapeur d'eau...

Mesure de l'eau totale

Des systèmes permettent de mesurer simultanément la vapeur d'eau présente dans l'air et la teneur en eau liquide et solide après évaporation des hydrométéores (systèmes à fil chaud : sondes de King, de Johnson-Williams...). La précision est liée à la présence ou non de petites et de grosses particules, mal prises en compte. Les spectro-granulomètres peuvent également donner une information partielle (voir par exemple : Étienne, 1997).

Conclusion

Compte-tenu des caractéristiques variées des différentes méthodes indiquées et concernant :

- les temps de réponse,
- les limitations des domaines de mesure,
- les possibilités de mesure absolue ou la nécessité d'un étalonnage,

on utilise généralement deux ou trois moyens de mesure simultanément: une mesure de point de rosée comme référence, un hygromètre à absorption de Lyman- α pour les mesures de fluctuations rapides (zones de transition, turbulence), éventuellement un hygromètre de type « hygristor » ou « humicap » pour palier le défaut toujours possible du Lyman- α . Le point de rosée sert à recalibrer en permanence ou a posteriori les autres mesures.

Mesure des pressions

Les mesures de pressions sont extrêmement importantes puisqu'elles conditionnent tous les paramètres mesurés ou calculés sur l'avion: vitesses et paramètres thermodynamiques.

Les pressions à mesurer sur un avion sont :

- la pression « statique » p_s , (pression atmosphérique vraie au niveau du vol) ;
- la pression « dynamique » p_d (surpression due à l'effet de la vitesse de l'air par rapport à l'avion) ;
- éventuellement des pressions « différentielles » (utilisées parfois pour calculer les angles aérodynamiques définissant la direction de l'écoulement par rapport à l'avion ; cf. *infra*).

Les pressions sont obtenues par des orifices sur la « peau » de l'avion et transmises par des tubes aux capteurs réalisés par exemple par des capsules anéroïdes ou des capteurs piézo-électriques.

L'orifice pour la mesure de la pression statique est orienté parallèlement au flux d'air de telle sorte que la prise d'air soit en « fluide mort » et ne subisse pas d'effet dynamique. Cette prise d'air est soit placée sur l'avion lui-même (cas des avions à « radôme » Merlin IV Météo-France), soit sur la partie latérale de l'antenne où est également mesurée la pression dynamique.

La déformation des lignes de courant autour de l'avion modifie les pressions : on définit un « défaut de statique » (différence entre pression statique mesurée et pression statique vraie) qui dépend, pour une position donnée des capteurs, de la vitesse, des angles aérodynamiques et de l'altitude (Kayton et Fried, 1969). Il faut procéder à des vols particuliers (« passage à la tour ») pour déterminer la correction à apporter aux valeurs des pressions mesurées par rapport à des mesures extérieures rendue comparables. Une difficulté importante provient de la caractéristique de pression en fonction de la position sur l'avion (Nacass, 1992).

Mesures dynamiques et positionnement de l'avion

Le principe de la mesure du vent à partir d'un avion est simple : pour pouvoir restituer le vecteur vent dans un repère lié au sol (typiquement le repère géogra-

phique), il suffit de faire la différence entre la vitesse de l'avion par rapport à ce repère et la vitesse de l'air par rapport à l'avion. On se rendra compte de la difficulté de l'opération quand on aura compris que le module du vecteur vent est généralement au moins un ordre de grandeur plus petit que les deux vecteurs dont on effectue la différence.

Grossièrement et pour fixer les idées, prenons l'exemple d'un avion volant face au vent à 90 m/s par rapport au sol. Si la vitesse de l'air par rapport à l'avion est mesurée à 100 m/s, on en déduit une vitesse du vent (par rapport au sol) de 10 m/s. Une erreur relative de 1 % seulement sur les vitesses mesurées entraîne une erreur de 2 m/s sur la vitesse du vent, soit une erreur relative de 20 %.

Il est donc nécessaire de faire des mesures primaires aussi précises que possible, mais la difficulté est d'autant plus grande que le nombre de paramètres qui interviennent est grand. Il faut en effet mesurer des pressions, une température, les angles aérodynamiques (direction du vent par rapport à l'avion), les angles d'attitude de l'avion, sa vitesse par rapport au sol, soit au moins une douzaine de paramètres. En plus, il peut être nécessaire de disposer de mesures redondantes ou complémentaires pour couvrir un domaine de variations étendu. Enfin, il faut que le système soit correctement calibré dans son ensemble puisque les interactions entre les divers paramètres sont multiples.

Calcul de base : le triangle de navigation

Comme on l'indique ci-dessus, la vitesse de l'avion par rapport au sol est la résultante de sa vitesse par rapport à l'air et de la vitesse de l'air où il évolue par rapport au sol.

Il convient donc d'effectuer des changements de repères liés au vent qui est comme expliqué un vecteur (direction du vent et intensité du vent) repéré à partir d'axes géographiques fixes ; il faut alors prendre en compte que l'avion se déplace avec une certaine vitesse et selon une certaine direction. Ces corrections sont effectuées au bénéfice de l'utilisateur et explicitées dans l'encadré 3.

Pour calculer le vent moyen (au moins les composantes horizontales) il faut donc connaître :

- le module de la vitesse propre de l'avion V_p ;
- le cap ψ ;
- la vitesse de l'avion par rapport au sol qui peut elle-même être obtenue :
 - soit au moyen des composantes u_{sg} et v_{sg} ,
 - soit avec le module V_{sg} et la route R ,
 - soit avec la vitesse sol dans un repère lié à l'avion V_{sa} et la dérive d (on calcule alors le vent dans ce repère lié à l'avion et on fait le changement en repère géographique en utilisant le cap).

Mesure des vitesses avion

Calcul de la vitesse propre ou vitesse par rapport à l'air
Essentiellement ce sont trois paramètres qui vont intervenir dans l'estimation de la vitesse propre (voir encadré 4) : la température, les pressions statique et totale (ou statique et dynamique). Le paramètre le plus critique à mesurer est ici la pression dynamique.

Mesure de la vitesse de l'avion par rapport au sol

Pour mesurer la vitesse de l'avion par rapport au sol, on peut soit mesurer directement cette vitesse (radar Doppler), soit repérer à chaque instant la position de l'avion et en dériver sa vitesse.

Radar Doppler de navigation

On mesure dans ce cas la vitesse relative du sol par rapport à l'avion et, éventuellement, la dérive (voir par exemple Kayton et Fried, 1969).

La mesure de la vitesse est déduite après détection du décalage de fréquence du signal renvoyé par la cible. Ce décalage est plus ou moins facile à déterminer selon la largeur du « spectre Doppler » et il est influencé par le mouvement propre de cibles (aérosols, gouttes nuageuses, précipitations, courants marins,...). Compte tenu du temps nécessaire à l'intégration du signal (de quelques dixièmes de seconde à une seconde) et à la précision possible (de l'ordre du m/s), l'information est insuffisante pour des mesures à petite échelle.

Encadré 3

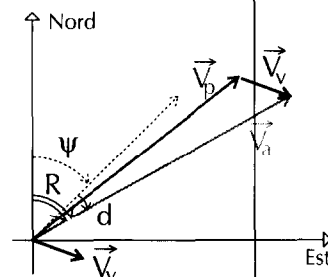
Composition des vitesses : $\vec{V}_{ag} = \vec{V}_{pg} + \vec{V}_{vg}$

Indices :
 a = « avion »
 p = « propre » (relatif à l'air)
 v = « vent »
 g = « géographique »

Repère géographique : \vec{O}_x, \vec{O}_y ; vers l'Est et le Nord, \vec{O}_z ; vers le haut

En moyenne, si l'avion a un cap Ψ , sa route vraie R diffère du cap sous l'action du vent d'un angle de dérive d .

(On suppose dans un premier temps que le vecteur \vec{V}_p est dans l'axe de l'avion)



Ψ cap	\vec{V}_p vitesse propre
R route	\vec{V}_a vitesse de l'avion
d dérive	\vec{V}_v vitesse du vent

Encadré 4. Expression de la vitesse propre (en m/s)

- Avec le nombre de Mach : $V_p = aM_a = M_a \sqrt{RT_s}$

a : vitesse du son, T_s : température statique,
R : constante des gaz pour l'air sec (≈ 287 J/(kg.K)).

- Avec pressions, température mesurée et facteur de récupération de la sonde température :

$$V_p^2 = \frac{2\gamma R}{\gamma-1} \frac{T_{im}}{r + [(pt / ps)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1]^{-1}}$$

$$2\gamma R / (\gamma-1) \approx 2009,3 \text{ J / (kg.K)}$$

Ces systèmes, largement utilisés dans les années 60 à 90 sont maintenant suppléés avantageusement par les systèmes de positionnement par satellites « GPS ».

Systèmes donnant la position de l'avion. GPS, INS
Il y a de nombreux systèmes permettant de déterminer la position d'un avion : systèmes de radio-navigation (Loran-C, Toran, Omega...), radar de poursuite, balise pour satellite. Ces systèmes sont dépassés depuis la mise en service du réseau GPS (Global Positioning System, cf. Hoffman-Wellenhof et al., 1992; Botton et al., 1997). La précision, de l'ordre de quelques dizaines de mètres (si les signaux ne sont pas dégradés), peut être améliorée avec un GPS différentiel (par rapport à un récepteur de référence). Toutefois, pour calculer la vitesse sur des échelles inférieures au kilomètre, cette précision n'est pas encore suffisante.

Les systèmes de navigation par inertie (INS) ont l'avantage d'être autonomes et de délivrer à cadence élevée, outre la vitesse de l'avion et sa position, tous les autres paramètres de vol : angles d'attitude, cap, éventuellement accélérations et variations angulaires. Cependant ce type de système est sujet à dérives dans le temps (cf. Faure, 1971).

En résumé, la détermination de la vitesse du vent à partir de l'avion fait appel à une grande variété d'informations et à des mesures dans différents repères. Si on souhaite avoir une bonne précision sur une large gamme d'échelles, ce sont plusieurs mesures qu'il faut coupler.

Mesure des angles aérodynamiques : incidence et dérapage

Les angles aérodynamiques définissent la direction du vecteur vitesse propre par rapport à l'avion. Ils sont obtenus soit à partir de girouettes, soit en utilisant des pressions différentielles. Si on souhaite une bonne précision sur les composantes de la vitesse de l'air (une erreur de 0,5 degré sur un de ces angles entraîne une erreur de l'ordre de 1 m/s sur la composante correspondante du vent pour un avion volant à 100 m/s !), il est indispensable de réaliser des opérations de calibrage soignées.

Méthodes de mesures

Girouettes mobiles

Ce sont de petites girouettes, placées à l'avant de l'avion (si possible sur une perche) dont les axes de rotation sont respectivement vertical (dérapage) et horizontal (incidence) dans le repère avion. (Il existe d'autres types de girouettes, en particulier des girouettes « fixes » à jauges de contrainte, non développées sur les avions européens).

Pressions différentielles

La pression dynamique subie par un obstacle sphérique dans un flux d'air est maximale au point d'arrêt, c'est-à-dire au point le plus en amont par rapport au flux. Elle varie en s'atténuant de part et d'autre de ce point d'arrêt. En mesurant la différence de pression totale entre deux points de l'obstacle sphérique, il est possible de déterminer la direction de l'écoulement dans le plan passant par ces deux points. Dans le cas des avions, on mesure les angles aérodynamiques en mesurant les pressions différentielles en deux couples de points : un dans le plan vertical du repère avion (incidence) l'autre dans le plan horizontal (dérapage). Cette double mesure, associée à la mesure de pression totale, est réalisée sur une sonde commercialisée par Rosemount; elle est aussi parfois réalisée directement sur le nez de l'avion (c'est le cas sur le Merlin de Météo-France).

Calibrage

Dans tous les cas, il est difficile de réaliser parfaitement le « zéro » de la mesure et il est nécessaire de calibrer les mesures en conditions de vol. Ce calibrage, généralement au premier ordre, inclut les effets de déformation en amont de l'avion. Les procédures de calibrage consistent par exemple à faire voler l'avion soit à différentes valeurs d'assiette soit à différentes valeurs de dérapage artificiellement induit par le pilotage.

Mesure des angles d'attitude et des composantes de la vitesse par rapport au sol

Les angles d'attitude (assiette, roulis) sont obtenus à partir de gyroscopes ; les vitesses peuvent être déduites des accélérations. Les centrales à inertie qui incluent gyroscopes et accéléromètres délivrent à la fois les angles d'attitude, le cap, les accélérations, les composantes de la vitesse de l'avion en repère géographique et sa position.

Sans entrer dans le détail du fonctionnement des systèmes de navigation inertiels, ni dans les différentes formes de réalisation, il faut cependant connaître quelques caractéristiques de leur réponse.

Le mouvement de l'avion est analysé à partir d'instruments très précis, mais qui possèdent eux mêmes quelques défauts à corriger. Ceci est expliqué dans l'encadré 5.

Cas de la vitesse verticale

L'intégration directe de l'accélération verticale est toujours instable (variation linéaire due à un biais constant et surtout dérive exponentielle due à l'effet de la variation de g avec l'altitude). Là encore, il est nécessaire

Encadré 5. Oscillation de Schuler

Le couplage entre gyroscope et accéléromètre entraîne une oscillation de la réponse (période de Schuller ; cf. Faure, 1971).

Cette oscillation peut induire une erreur de plusieurs mètres par seconde (voir Lenschow, 1986) sur la vitesse. Pour éviter cette erreur il faut coupler l'information de la centrale avec une autre information de position (G.P.S., ...) ou de vitesse (radar Doppler).

Un décalage d'angle φ de la verticale de la plate-forme par rapport à la verticale locale entraîne :

- une erreur de position : $\Delta x \approx R\varphi$
(R = rayon terrestre)
- un effet de l'accélération de la pesanteur sur l'accélération horizontale mesurée, entachée alors d'une erreur d'accélération fonction de l'accélération de la pesanteur g : $\Delta x \approx -g\varphi$

Le système se comporte quant à ces erreurs comme un oscillateur de période :

$$T_s = 2\pi \sqrt{R/g} \approx 84 \text{ mn}$$

de coupler l'information de la centrale avec une autre information (altitude déduite de la pression, ou de l'altitude GPS) et à stabiliser l'intégration en minimisant l'écart entre l'altitude intégrée et l'altitude barométrique. Sur le Merlin et sur l'ARAT/Fokker 27 ce couplage est effectué directement au niveau du calculateur de la centrale inertielle.

Problèmes généraux des chaînes de mesures complexes

On a vu que pour extraire une information météorologique utilisable (vitesses du vent, température...) on avait éventuellement besoin de multiples informations. Deux cas peuvent se produire :

- les informations à « mélanger » sont simultanées (par exemple, on doit faire à chaque instant la différence de deux vitesses pour en obtenir une troisième). Dans ce cas les deux mesures primaires doivent être compatibles avec la même résolution au même instant, dans le même domaine fréquentiel ;
- les informations à utiliser sont complémentaires (par exemple la vitesse verticale de l'avion doit être déduite de deux appareils qui n'ont pas la même bande passante en fréquences). Le jeu consiste alors à « mélanger » les deux informations pour obtenir une mesure valable sur l'ensemble (réunion) des deux domaines de fréquence. Le paramètre calculé subit alors différemment les effets des paramètres primaires selon la fréquence. Dans les exemples précédents, les fluctuations des vitesses du vent calculé seront connues grâce aux mesures du système inertiel aux fréquences élevées et grâce à d'autres mesures (pression, position) aux basses fréquences.

Ces remarques s'appliquent aux mesures en avion mais aussi à tout autre système de mesure !

Mesures radiatives

Les avions de recherche atmosphériques sont toujours équipés de capteurs pour la mesure du rayonnement solaire au moins dans le visible et le proche infrarouge. Ces grandeurs sont aussi importantes pour les bilans énergétiques que pour les conséquences des effets photo-chimiques atmosphériques.

Les mesures radiatives en avion sont analogues aux mesures semblables au sol avec les difficultés supplémentaires liées à l'orientation variable du support et à la vitesse. On mesure séparément les « courtes » longueurs d'ondes ($\approx 0,3-3 \mu\text{m}$) et les « grandes » longueurs d'ondes ($\approx 3-100 \mu\text{m}$).

Capteurs utilisés aux courtes longueurs d'ondes : pyranomètres

Le pyranomètre peut être « noir et blanc » ou « spectral », il peut être dédié à la mesure du rayonnement global, de l'albédo (rayonnement réfléchi) ou du rayonnement diffus. Le détecteur est généralement une thermopile.

Toutes les mesures de flux radiatifs nécessitent des corrections liées aux températures. La mesure du flux visible descendant nécessite en avion une correction d'attitude de l'avion, d'orientation par rapport au soleil, de temps de réponse de la thermopile.

Capteurs utilisés aux grandes longueurs d'ondes : pyrgeomètres

Le principe des pyrgeomètres repose sur la mesure du bilan radiatif entre le détecteur (surface absorbante) et la cible (ciel, ou sol ou nuage...). Le calibrage consiste à calculer les pondérations qui affectent chaque paramètre (en fait des températures) qui interviennent dans ce bilan.

En vol, c'est une opération délicate qui consiste à rechercher (a posteriori) des zones où les flux sont suffisamment homogènes et procéder par régression (Brogniez et al., 1986).

Une comparaison entre plusieurs avions montre que l'on peut obtenir les flux visibles avec une dispersion de l'ordre de 4 % et de l'ordre de 6 % pour les flux dans l'infrarouge (Saunders et al., 1992).

Radiomètre directionnel en infrarouge ; mesure de la température du sol

En absence de nuage, la mesure de l'émission infrarouge du sol fournit une donnée reliée à la température. Les radiomètres BARNES sont utilisés à cette fin depuis plusieurs décennies. Un nouveau système à deux longueurs d'onde (CLIMAT/CIMEL) devrait être prochainement disponible. Dans les deux cas, ce sont les bandes voisines de $10 \mu\text{m}$ qui sont utilisées. Une des difficultés de cette mesure réside dans le fait que

les surfaces sont des émetteurs imparfaits : la mesure de la température de surface marine est plus aisée que celle des surfaces terrestres hétérogènes.

Remarques finales

Il n'a pas été question dans ce document de mesures physico-chimiques *in situ*, ni de mesures microphysiques nuageuses. Les avions de recherche atmosphériques sont cependant généralement bien équipés et souvent dédiés à ces mesures.

La plupart des opérations d'étalonnage et de calibrage évoquées dans ce document sont depuis une dizaine d'années pratiquement toutes effectuées par les équipes techniques responsables des avions. Ces équipes techniques facilitent également la tâche des expérimentateurs pour les aspects de contraintes et de réglementation de vol. Il faut toutefois penser que certaines vérifications sont à faire en cours d'expérience, particulièrement lorsque plusieurs avions sont impliqués dans une même expérience. La comparaison des mesures entre les divers avions est alors nécessaire ; c'est également pratiquement la seule façon de vérifier la validité des étalonnages en altitude (voir le cas des mesures radiométriques).

BIBLIOGRAPHIE GÉNÉRALE

- André, M., 1985. L'avion plate-forme de mesures atmosphériques. Note de travail de l'Établissement d'Études et de Recherches Météorologiques n° 130. Ministère de l'Urbanisme, du Logement et des Transports, Direction de la Météorologie.
- Chalon, J. P., et al., 1998. Les avions français de recherche atmosphérique et de télédétection, bilan et perspectives ; *La Météorologie*, 8, 14-44 et 85-86 (avec de nombreuses références sur les travaux effectués avec les avions en France).

BIBLIOGRAPHIE SPÉCIALISÉE

- Albrecht, B.A., Cox, S.K., Schubert, W.H., 1979. Radiometric Measurements of in-cloud temperature fluctuation. *J. Appl. Met.*, 18, 1066-1071.
- Botton, S., Duquenne, F., Egels, Y., Even, M., Willis, P., 1997. GPS, localisation et navigation. Hermès, Paris.
- Brognez, G., Buriez, J. C., Vanhoutte, J. C., Fouquart, Y., 1986. An improvement of the calibration of the Eppley Pyrogeometer for the case of airborne measurements. *Contr. Atmos. Physics*, 59, 538-551.
- Busen, R., Buck, A.L., 1995. A high-performance hygrometer for aircraft use: description, installation and flight data. *J. Atmos. Ocean. Tech.*, 12, 73-84.
- Cruette, D., Marillier, A., Dufresne, J.L., Grandpeix, J.Y., Nacass, P., Bellec, H., 2000. Fast temperature and true airspeed measurements with the airborne

ultrasonic anemometer-thermometer (AUSAT), *J. Atmos. Ocean. Tech.*, 17, 1020-1039.

- Daw, D.F., 1977. Tests of a Reverse Flow outside air temperature probe for use on cloud physics research aircraft. Laboratory Technical Report - FR 57. National Aeronautical Establishment, Ottawa, Canada.
- Delahaye, J.Y., Guérin, C., Vinson, J.P., Dupuis, H., Weill, A., Branger, H., Eymard, L., Lavernat, J., Lachaud, G., 2001. A new shipborne microwave refractometer for estimating the evaporation flux at the sea surface. *J. Atmos. Oceanic. Technol.*, 18, 459-475.
- Desjardins, R.L. and MacPherson, J.L., 1991. Water vapor flux measurements from aircraft. Land surface evaporation; T.J. Schmugge, J.C. André ed., (Papers presented at a workshop held in Banyuls, France, October 1988). Springer-Verlag.
- Etienne, J.C., 1997. Les instruments de mesure de la teneur en eau dans les nuages installés sur le Merlin IV. Note de Travail du Centre d'Aviation Meteorologique, 11, Centre National de Recherches Météorologiques, Météo-France.
- Faure, P., 1971. Navigation inertielle optimale et filtrage statistique. Dunod, Paris.
- Friehe, C.A., Grossman, R. L., Pann, Y., 1986. Calibration of an airborne Lyman-alpha hygrometer and measurement of water vapor flux using a thermoelectric hygrometer. *J. Atmos. Ocean. Tech.*, 3, 299-304.
- Guillemet, B., Mascart, P., Ravaut, M., Isaka, H., 1977. Calibrage autonome et correction d'un système aéroporté pour la mesure du vent horizontal. *J. Rech. Atmos.*, 11, 1, 9-37.
- Hofman-Wellenhop, B., Lichtenegger, H., Collins, J., 1992. GPS, theory and practice. Springer-Verlag.
- Kayton, M., Fried, W. R., 1969. Avionics Navigation Systems. John Wiley and Sons Inc., New-York.
- Lawson, R. P., Cooper, W. A., 1990. Performance of some airborne thermometers in clouds. *J. Atmos. Ocean. Tech.*, 7, 480-494.
- Lawson, R. P., Rodi, A. R., 1987. Airborne tests of sensor wetting in a reverse flow temperature probe. Sixth Symposium on Meteor. Observations and Instrumentation. New Orleans, 253-256.
- Lenschow, D.H., 1986. Aircraft measurements in the boundary layer. Probing the Atmospheric Boundary Layer, 39-55. D. H. Lenschow (Ed.): *Am. Meteor. Soc.*
- Lenschow, D.H., Pennell, W.T., 1974. On the measurement of in-cloud and wet-bulb temperatures from an aircraft. *Mon. Weather Review*, 102, 447-454.
- Mac Carthy, J., 1973. A method for correcting airborne temperature data for sensor response time. *J. Appl. Meteor.*, 12, 211-214.
- Nacass, P., 1992. Theoretical errors on airborne measurements of static pressure, impact temperature, air flow angle and air flow speed. NCAR Technical Note, 385, 80 p. Boulder, Co.
- Rodi, A.R., Spyers-Duran, P., 1972. Analysis of time response of airborne temperature sensors. *J. Appl. Meteor.*, 11, 554-556.
- Rosemount Inc., 1981. Rosemount total temperature sensors. Technical Report 5755, revision A. Rosemount Inc., Minneapolis, Minnesota.
- Saunders, R.W., Brogniez, G., Buriez, J. C., Meekötter, R., Wendling, P., 1992. A comparison of measured and modelled broad band fluxes from aircraft data during the ICE'89 field experiment. *J. Atmos. Ocean. Tech.*, 9, 391-406.
- Semiond, J.C., 1977. La mesure de l'humidité atmosphérique par avion. Thèse de Doctorat de l'université Clermont-Ferrand II.
- Wyngaard, J.C., Pennell, W.T., Lenschow, D.H., Le Mone, M. A., 1978. The temperature humidity covariance budget in the convective boundary layer. *J. Atmos. Sci.*, 35, 47-58.
- On peut également trouver de nombreuses descriptions et des références sur le site du NCAR (Research Aviation Facility) : <http://raf.atd.ucar.edu/Bulletins/>.