

# LES PROBLEMES METEOROLOGIQUES

## DU VOL A HAUTE ALTITUDE

par J. BESSEMOULIN

(Rapport présenté à la semaine nationale  
de la sécurité 1952)

---

### Avertissement

L'intéressant exposé de M. J. BESSEMOULIN, Chef de la Préviation à la Météorologie Nationale, traite des problèmes posés à la Météorologie par les vols à haute altitude.

Ainsi que l'auteur l'indique, les premiers radiosondages datent de 25 ans; le premier réseau cohérent de mesures en altitude remonte à 1945.

Cependant la Météorologie a mis à profit ces quelques années d'avances sur la navigation aérienne en altitude.

Dès 1938, paraissait, en France, une première étude sur la "turbulence et la navigation aérienne dans la substratosphère"(1) qui mettait en garde les futurs navigateurs de cette région contre les prétendus calmes stratosphériques.

En 1949-1950, des vols retentissants de prototypes d'avions à réaction, commandés bientôt en série par les lignes aériennes commerciales, attirèrent l'attention du monde aéronautique sur cette question. Je fus amené à en faire le point, pour ce qui concernait la Météorologie(2).

Les progrès de l'aviation ne connaissent pas de répit. Il convient sans cesse de refaire ce point, à la fois pour aviser les navigateurs des nouvelles découvertes en la matière et pour attirer l'attention sur la nécessité impérieuse d'équilibrer les besoins croissants de l'aéronautique et les moyens nécessaires pour que la Météorologie puisse les satisfaire.

C'est ce double but que M. J. BESSEMOULIN a poursuivi dans ce rapport.

A. VIAUT

Directeur de la Météorologie Nationale

---

(1) L'aéronautique 1938 "Turbulence et Navigation Aérienne dans la substratosphère par MIRONOVITCH et A. VIAUT.

(2) Ascendance déc. 1950. Météorologie et Navigation à haute altitude par A. VIAUT.

## Les problèmes météorologiques du vol à haute altitude

---

Avant 1939 les déplacements aériens s'effectuaient, pour la presque totalité, au-dessous de 3.000 m. Dans les quelques années qui ont suivi la guerre, la plupart de ces vols s'effectuaient au-dessous de 6.000 m. L'avènement de l'aviation commerciale à réaction nous permet d'envisager des vols réguliers à 8.000, 10.000 et sans doute 12.000 à 15.000 mètres.

Nous conviendrons d'entendre par vols à haute altitude, ceux qui ont lieu dans l'espace aérien compris entre les niveaux 6.000 et 15.000 mètres.

Les régions de l'atmosphère comprises entre 6.000 et 15.000 m. sont loin d'être inconnues aux météorologistes et aux aviateurs : les avions militaires évoluent déjà à ces altitudes depuis de nombreuses années, tandis que le début de l'exploration de la stratosphère par ballons sondes date de plus de 50 ans et que les premiers radiosondages datent de 25 ans. Il reste néanmoins que la conquête de cet espace aérien par l'aviation commerciale pose des problèmes dont la solution reste à trouver.

Le but du présent exposé est d'essayer de préciser la nature de ces problèmes et d'envisager leurs incidences sur la sécurité.

Il est évident que, dans la solution de ces problèmes, le milieu dans lequel évolue l'avion, c'est-à-dire l'atmosphère, joue un rôle plus ou moins prépondérant. Chacun de ces problèmes présente donc un aspect météorologique.

Nous nous proposons d'étudier successivement un certain nombre des facteurs météorologiques susceptibles d'avoir une influence sur la conduite des vols à haute altitude.

Nous examinerons tour à tour les facteurs météorologiques suivant que nous considérons comme les plus importants:

- la température
- le vent
- les nuages
- la turbulence
- le givrage

et nous ne chercherons pas spécialement à mettre en évidence le rôle direct qu'ils peuvent jouer quant à la sécurité des vols, partant du principe que tous les éléments qui peuvent influencer sur la conduite d'un avion sont susceptibles de comporter plus ou moins indirectement des incidences sur la sécurité.

## I.- LA TEMPERATURE.-

On peut considérer que la répartition des températures en altitude est connue avec une précision suffisante pour l'aviation jusqu'à des altitudes de l'ordre de 15 km. Au-dessus de 15 km. l'imprécision des mesures, avec l'appareillage actuel, semble devoir augmenter rapidement sans qu'on possède cependant des éléments suffisants pour donner un ordre de grandeur des erreurs.

Rappelons que notre connaissance du champ de température en altitude provient essentiellement des données des radiosondages.

Sur la figure 1, on a représenté le réseau actuel des stations de radiosondages pour la région Europe, Afrique du Nord, Atlantique Nord et Amérique du Nord. Ces régions sont, de loin, les mieux équipées du globe. Chaque station effectue, en principe, 2 lancers par jour à 3 h. et 15 h. TU. Certaines stations en effectuent 3 et même 4; par contre, et c'est, depuis peu, faute de crédits, le cas particulier pour la France et l'Afrique du Nord, il existe des stations qui n'effectuent qu'un seul lancer chaque jour.

On voit sur la figure que la densité du réseau est correcte entre 30°N et 75° ou 80°N, à quelques remaniements près.

Par contre, dans les régions polaires et les régions subtropicales et équatoriales, le réseau est pauvre ou pratiquement inexistant.

Au cours de ces dernières années de nombreuses missions ont été organisées dans l'Arctique et surtout dans l'Antarctique.

Les Expéditions polaires françaises (F.E. VICTOR) avec le concours de la Météorologie Nationale de France ont effectué des radiosondages au Groënland et en Terre Adélie.

Cette documentation apportera un élément constructif à la connaissance des températures en altitude dans ces régions.

La figure 2 donne pour 5 stations : TRAPPES, NIMES, ALGER, AOULEF et DAKAR la répartition moyenne de la température en altitude pour le mois de Juillet 1951.

La figure 3 donne pour le 3/2/52 à 3 heures le champ de température sur la surface isobare 300 Mb, correspondant à l'altitude-pressure standard de 9160 mètres.

Tout ceci montre que notre connaissance du champ de température en altitude peut être considérée comme satisfaisante dans les régions du globe où l'on dispose d'une densité suffisante de radiosondages à la fois dans le temps et dans l'espace.

La variabilité de la température à un niveau donné est suffisamment réduite pour qu'on puisse, dans certains problèmes, faire correspondre une température déterminée à chaque niveau. C'est le cas dans les problèmes usuels d'altimétrie lorsqu'une grande précision n'est pas requise (navigation).

Les problèmes de rendement des moteurs à réaction ainsi que le calcul de la charge limite à emporter au décollage présentent plus d'exigence. En effet, la portance d'une aile est fonction de la masse spécifique de l'air et le rendement du réacteur est fonction entre autres de la température de l'air. Pour un avion du type COMET on estimerait qu'une augmentation de température de l'air de 1°C au décollage entraîne une perte de charge marchande de 150 Kg (ce qui correspond au poids d'un passager avec bagages). Cette influence est suffisamment grande pour que l'on envisage le décollage d'avions long courriers au lever du soleil au moment du minimum de température, spécialement sur les aérodromes élevés des régions tropicales.

En vol, toujours pour un avion du type Comet, une augmentation de température de l'air de 5°C se traduirait, pour un régime de moteur donné, par une perte d'altitude de croisière de 300 m., avec augmentation correspondante de la consommation(1). Un "creux" de la tropopause ou une tropopause basse liée à une invasion d'air arctique qui correspondent à une stratosphère chaude entraînent donc une réduction des performances de l'avion.

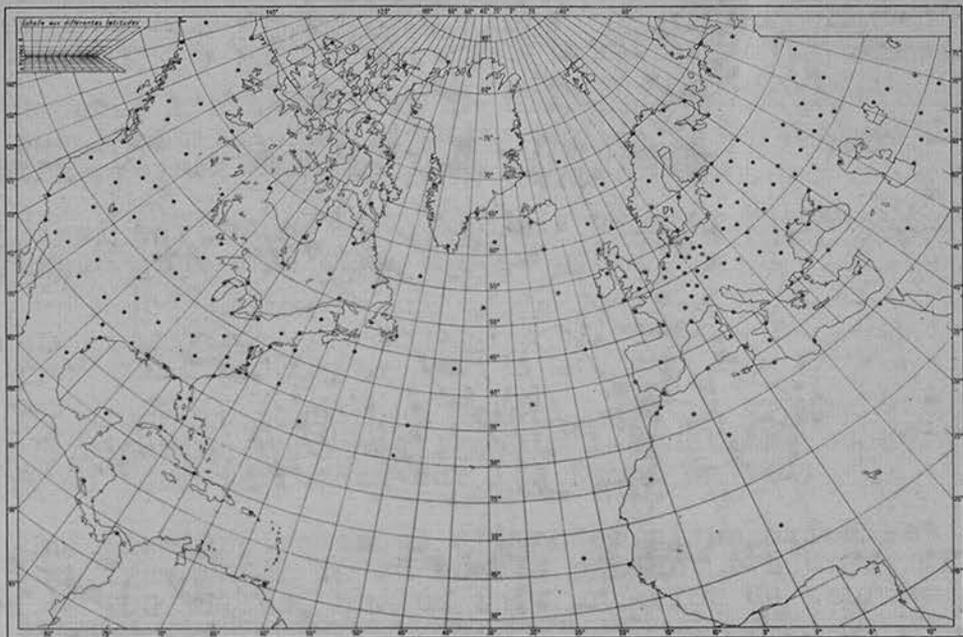
Dans un autre ordre d'idées, on a remarqué que sur certains avions la matière plastique utilisée pour la confection des cockpits peut se fendiller et même se briser pour des températures inférieures à -50°C ou -55°C. Etant donné les dangers d'une telle éventualité, on attache une grande importance à la prévision de l'altitude de l'isotherme -50°C.

La figure 4 donne (2), pour les années 1948 à 1949-1950, la fréquence des températures inférieures ou égales à -50°C pour les niveaux 300mb, 250mb et 200mb correspondant respectivement aux altitudes-pressure standard de 9160 m., 10360 m. et 11.790 m.

---

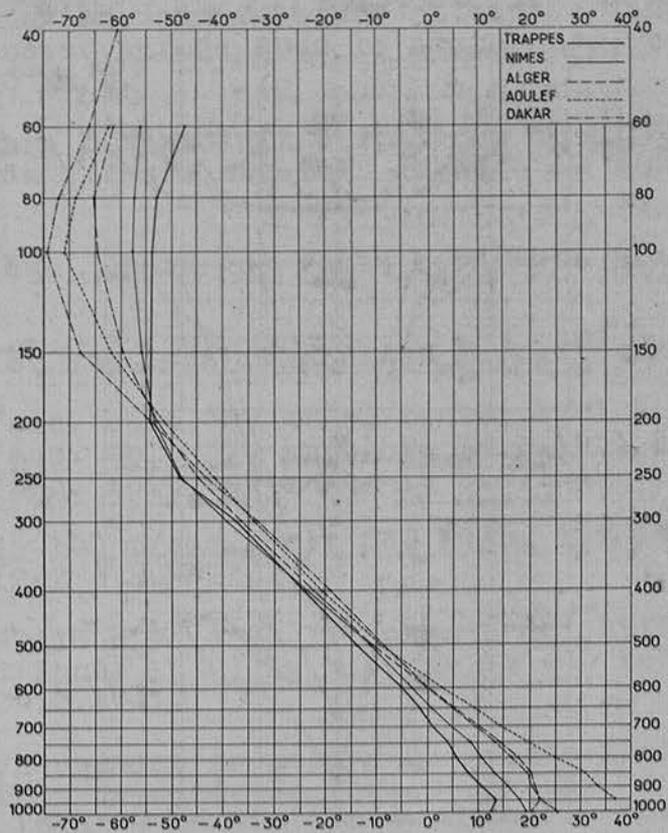
(1) La procédure utilisée pour le vol du Comet consiste à laisser l'appareil choisir sa propre altitude de vol pour un régime donné au moteur. L'avion gagne ainsi de l'altitude au fur et à mesure qu'il consomme du carburant (environ 300 mètres à l'heure). La consommation à 6.000 mètres est le double de celle à 12.000 mètres et au niveau de la mer elle est le triple. En gros, une dénivellation de 300m. correspondrait donc à une augmentation de la consommation de l'ordre de 3 à 5%.

(2) d'après M. CHAMPOLLION - Division Exploitation Prévision - Météorologie Nationale (SMMA).



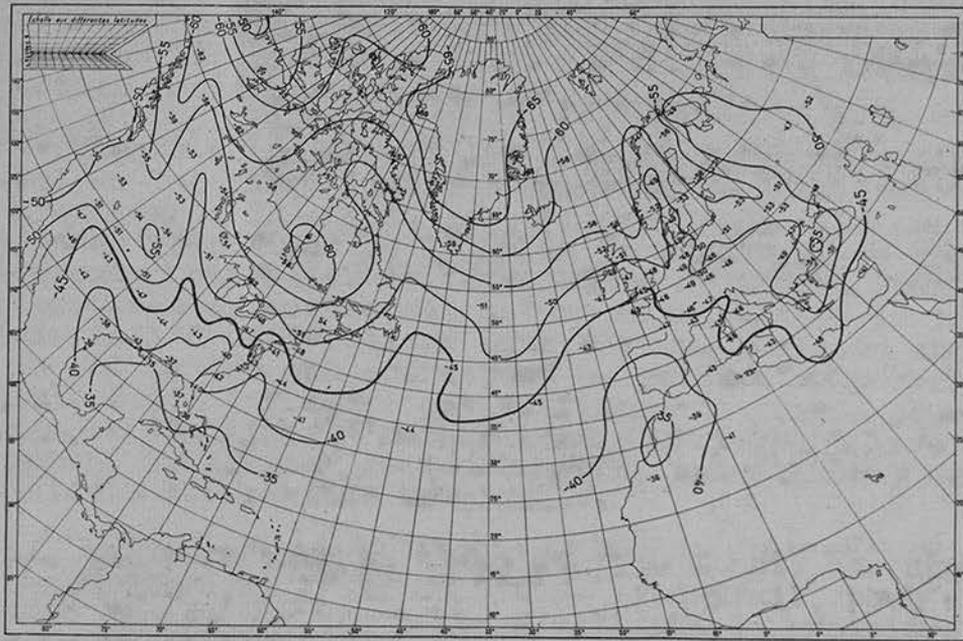
Réseau radio-sondages existant au 1-5-1952

Fig. 1



Moyennes de température en juillet 1951 (réseau de 03 h. T.U.)

Fig. 2



Isothermes à 300 mb. (altitude - pression standard: 9160 m, le 32/52 à 3hTU)

Fig. 3

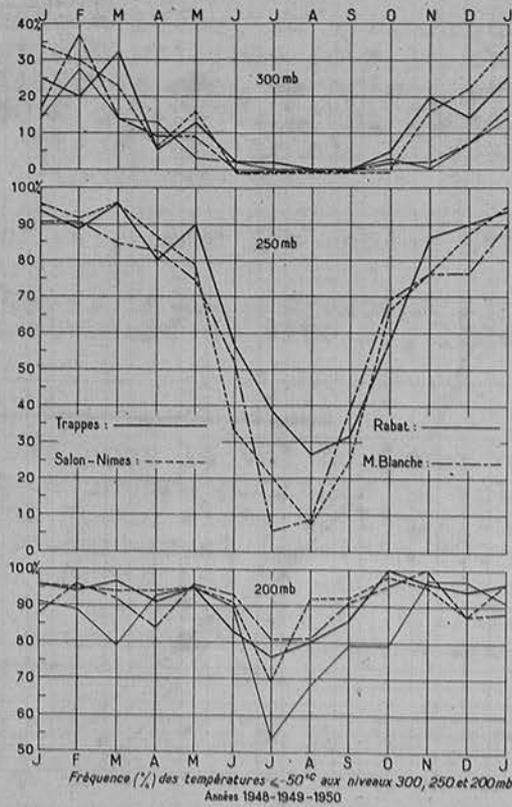


Fig. 4

En résumé, en ce qui concerne la température, nous voyons apparaître l'importance de la prévision de température au sol, pour le décollage et l'importance de la température aux environs de l'altitude de croisière (12000m. pour un Comet).

De plus l'altitude et la température de la tropopause ainsi que l'altitude de l'isotherme  $-50^{\circ}\text{C}$  devront systématiquement être prévues tout le long du parcours.

Ainsi se trouve une première fois justifiée la nécessité d'un réseau cohérent de radiosondages.

## II.- LE VENT.-

On pourrait penser, à priori, que la grande vitesse des avions à réaction rend négligeable les actions de dérive dues au vent ou leur influence sur les temps de vol.

Une première remarque s'impose: si un avion est soumis à un vent traversier de 20 noeuds pendant 5 heures, il sera dérivé de 100 milles, que ce soit un avion de tourisme ou un avion à réaction.

De plus, les vents à haute altitude atteignent des vitesses considérablement plus grandes que dans la basse atmosphère. Les vitesses maxima, généralement atteintes dans la couche de 3 Km. d'épaisseur située sous la tropopause, peuvent dépasser largement 200 Km/h.

La figure 5 reproduit 3 sondages de BREST dans lesquels la plus grande vitesse atteinte dépasse 60 m/sec., près de 225 km/h.

On a déjà mesuré des vents nettement plus forts, supérieurs à 300 km/h.

Dans les stations françaises de radiosondage on a mesuré:

105 m/sec. soit 380 km/h. le 9.1.1951 à 9000 m. à NIMES  
102 m/sec. soit 370 km/h. le 14.1.1951 à 12.000 à NIMES  
120 m/sec. soit 440 km/h. le 8.2.1949 à 11.000 m. et  
12.000 m. à TRAPPES  
plus de 100 m/sec. soit 360 km/h. les 14, 15, 17 et  
24.1.1947 à BORDEAUX.

M. MONDAIN cite dans le Journal Scientifique de la Météorologie (n°2 Année 1949) la vitesse de 440 km/h. mesurée à LIMOGES le 29.3.1941.

Malheureusement la mesure des vents forts est difficile et peut parfois entachée de fortes erreurs, du fait que le ballon est emporté loin de la Station de mesure. Aussi les chiffres précédents ne sont-ils fournis qu'avec certaines réserves

D'après une étude encore inédite de M. CHAMPOLLION de la Météorologie Nationale, effectuée à l'aide des R.S. de TRAPPES, la fréquence des vents supérieurs à 115 km/h. serait de l'ordre de 20% entre 9000 et 12000m. et celle des vents supérieurs à 200 km/h. serait de l'ordre de 2%. Ces pourcentages sont valables pour Trappes qui est assez souvent en dehors du courant de perturbations atlantiques et ils risquent d'être plus élevés pour des stations plus nordiques.

Nous retiendrons donc que les vents en altitude peuvent être très forts et d'un ordre de grandeur tel qu'ils puissent notablement affecter le vol d'un avion à réaction et même compromettre la sécurité d'un tel vol compte tenu de la faible réserve de carburant emportée par ce type d'appareils.

La figure 6 donne la vitesse moyenne des vents à différentes altitudes d'après divers auteurs. On remarquera que les déterminations les plus récentes conduisent à des moyennes de vent plus élevées. L'explication de cette particularité est aisée si l'on examine les procédés de mesure utilisés. Les mesures anciennes étant effectuées par un procédé optique (ballon suivi au théodolite) ne pouvaient être obtenues à haute altitude que par très beau temps.

Au contraire les mesures les plus récentes effectuées par des procédés radioélectriques permettant la mesure du vent même par ciel nuageux.

Il est possible qu'un perfectionnement des procédés actuels permette de mettre en évidence des vents plus forts, car il arrive encore fréquemment que les mesures soient interrompues par suite de l'éloignement du ballon emporté par des vents violents.

Lorsque l'on considère une carte telle que celle de la figure 7 que représente la topographie de la surface 300mb le 19:1/51 à 3h. (altitude-pression 9160m.) à l'aide des lignes de niveau tracées de 40m. à 40m., on remarque que la pente de la surface est très forte le long d'une bande assez étroite. Comme le vent est fonction de la pente de la surface isobare (il lui est proportionnel dans les régions de faible courbure), il en résulte que la zone de vents forts se présente comme une sorte de ruban allongé. C'est ce ruban que les météorologistes Américains ont baptisé: "jet stream".

Un examen rapide d'une série de cartes montre aisément que ces zones de vents forts correspondent à de véritables jets d'air chaud au-dessous de la tropopause.

Il est inutile de souligner l'intérêt de la mise en évidence de ces configurations, que seul un réseau de radiosondages peut permettre de déceler.

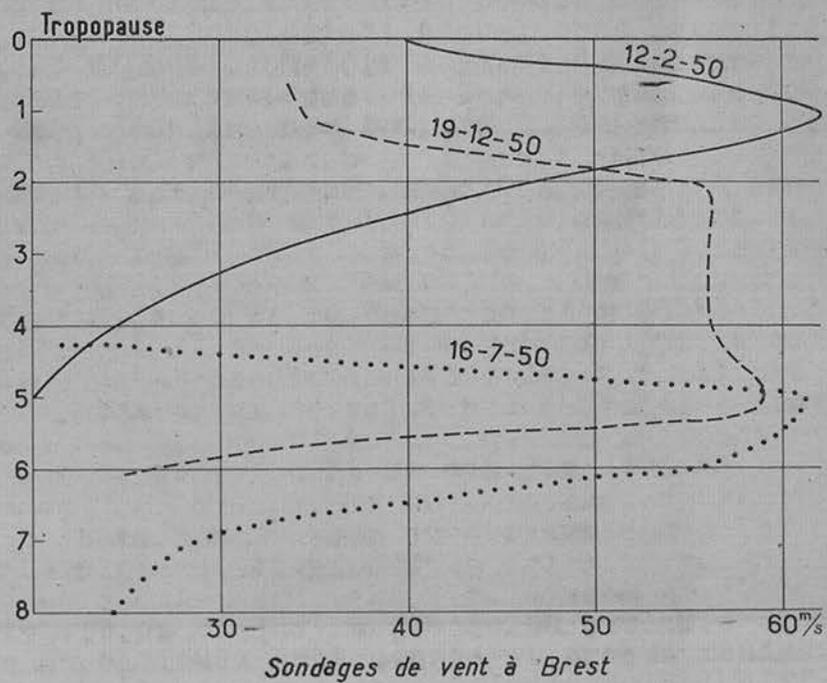


Fig. 5

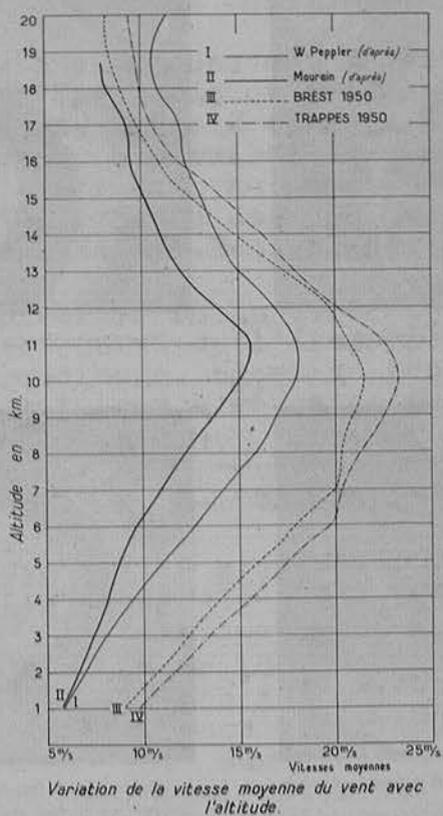


Fig. 6

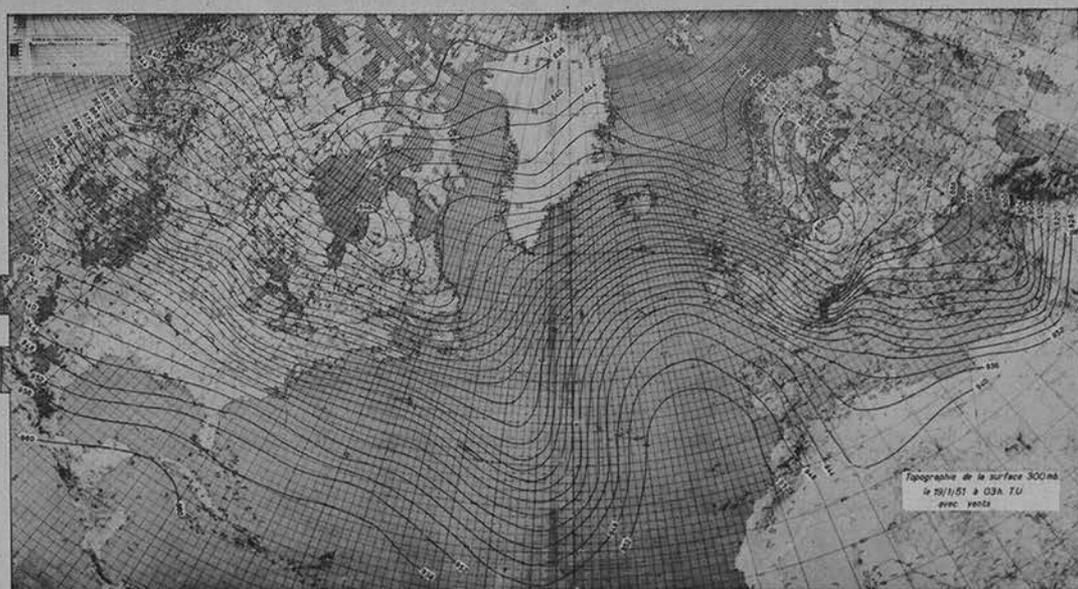
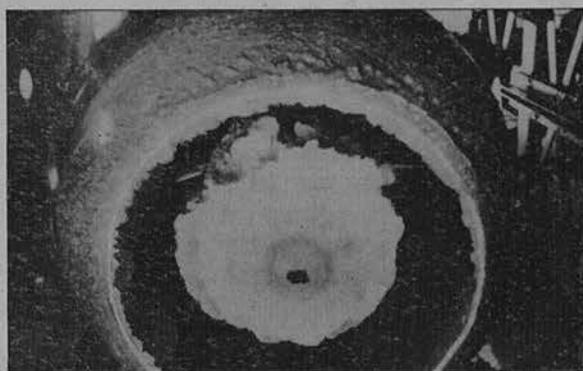
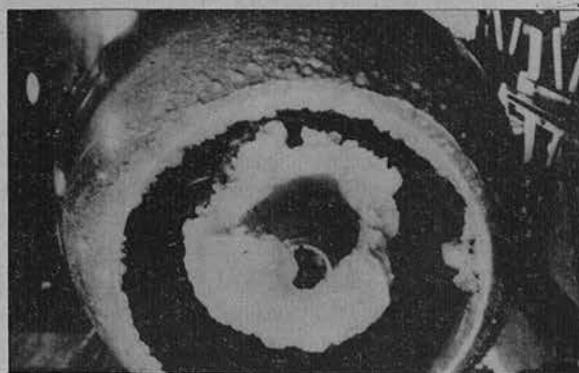


Fig. 7



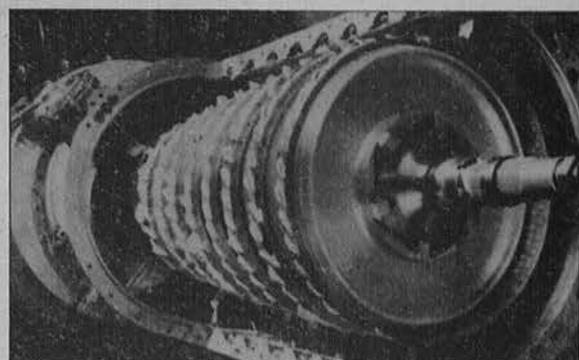
a) "Couronne" et léger givrage du carénage.



b) Un morceau de la "couronne" s'est détaché.



c) Un petite morceau de glace suffit déjà à endommager un aube de compresseur.



d) La glace qui a pénétré dans le compresseur a abimé toutes les aubes du rotor.

Fig. 8

Dans un article intitulé: "Comets and weather" (1) (Les "Comets" et la Météorologie") auquel nous avons fait plusieurs emprunts, E. CHAMBERS, Météorologiste du Meteorological Office, détaché comme Superintendant de la Météorologie à la B.O.A.C. (British Overseas Air ways Corporation) ne craint pas d'affirmer":

"Dans le cas d'avions munis de moteurs à pistons il y a souvent avantage à choisir l'altitude de vol et la route (ou les deux) pour bénéficier des vents les plus favorables.

"Avec le Comet il ne sera jamais intéressant de quitter le "grand cercle et il ne sera probablement jamais sage de changer "d'altitude dans l'espoir de profiter de meilleurs vents.... "Il ne sera avantageux de voler à une altitude inférieure à "l'altitude normale de croisière que si le gradient vertical "de vent est supérieur à 10 noeuds par 300m."

Je ne suis pas du tout de cet avis au moins en ce qui concerne le choix de la route.

S'il est exact que la précision actuelle avec laquelle les vents en altitude sont connus et prévus rendra assez souvent illusoire le choix d'une altitude de vol différente de l'altitude de croisière normale, il n'en reste pas moins que des gradients verticaux de vent de 90 noeuds (160 km/h, 45 m/s) par kilomètre ont été observé (2). Ceci correspond à une valeur 3 fois plus grande que celle mentionnée par CHAMBERS.

Il nous semble enfin que des vents de 150 à 200 km/h. sont susceptibles d'être pris en considération pour la détermination de la meilleure route à suivre. Je rappellerai à cette occasion la méthode de détermination des "routes aériennes à durée minimum" que j'ai mise au point avec mon collègue M. POLE et qui a été publiée dans le Journal Scientifique de la Météorologie (1ère Année n°4 Oct.Déc. 1949).

Un dernier problème où la détermination précise du vent a son rôle à jouer est celui de l'atterrissage par plafond assez bas et visibilité médiocre. C'est un problème très important pour les avions militaires à réaction qui, au retour de mission,

---

(1) "Comets" and weather. E. CHAMBERS - Weather Vol 7 n°s 3 à 4 avril 1952.

(2) Observation de DURST et DAVIS citée par SHEPPARD - Science Progress n° 155 Juil. 1951.

Ces auteurs mentionnent également des gradients horizontaux de l'ordre de 90 noeuds pour 100 km.

Toutes ces observations sont valables pour un jet de 90 m/s Bien entendu de tels gradients ne se conservent pas sur des distances normales au "jet" supérieures à celles données par les ordres de grandeurs précités (1 km. et 100 km.) bien que ces gradients restent du même ordre de grandeur le long du jet.

effectuent une descente rapide vers le terrain d'atterrissage. La question intéresse aussi les avions commerciaux. Au cours de la manoeuvre d'approche, les avions sont dérivés par le vent et il importe que cette dérive soit connue de façon que l'appareil se présente en bonne position pour prendre sa piste. Dans le cas contraire, il est obligé d'effectuer un tour de piste à basse altitude avec grosse consommation de carburant, alors que la réserve de combustible est souvent presque épuisée. De plus, par mauvaise visibilité, le grand rayon du virage peut amener le pilote à perdre totalement le terrain de vue, de sorte qu'une nouvelle présentation face à la piste pose de nouveau le problème de la précision de l'approche.

Il faut donc, avant la descente, fournir à l'avion une sorte de vent "balistique" analogue à ce qui est donné aux artilleurs pour calculer la dérive des obus.

Ce problème ne pose pas de difficultés si l'on dispose d'une densité suffisante de radiosondages et de radiovents permettant la prévision correcte des vents en altitude. On peut penser que le problème sera à peu près résolu pour la France avec la mise en place des 13 stations de radiovent projetées, effectuant 4 sondages par jour.

Actuellement, le réseau est insuffisant et ne comporte que 7 stations pour la France continentale et la Corse avec une régularité de fonctionnement loin d'être satisfaisante.

Ce problème de la prévision du vent pendant les manoeuvres d'approche n'est d'ailleurs qu'un des aspects du problème de l'atterrissage qui nécessite des prévisions très précises lorsque les conditions minima risquent d'être atteintes sur l'aérodrome d'arrivée et susceptibles de nécessiter un déroutement. C'est là une importante question que nous ne ferons qu'effleurer ici.

### III.- LES NUAGES.-

En général les vols à haute altitude s'effectuent au-dessus des grandes masses nuageuses. Toutefois, il n'est pas rare que l'on rencontre des couches nuageuses jusqu'à 10 et 12 km. Ce cas est relativement fréquent par situation orageuse où les enclumes des Cumulonimbus s'étalent sous la tropopause. On a rencontré de telles enclumes jusqu'à plus de 13.000 m.

Dans certaines situations météorologiques des voiles de Cirrus ou de Cirrostratus soudés ou non à des nappes inférieures d'Altostratus présentaient des épaisseurs de plusieurs milliers de mètres.

D'une première étude des situations météorologiques correspondantes, on peut tirer comme conclusion au moins provisoire,

que ces nappes de nuages à haute altitude se forment dans de vigoureuses poussées d'air chaud fortement soulevées en altitude dans la vallée formée par deux dômes d'air froid en voie de rapprochement.

En France de tels cas se présentent, par exemple, lorsqu'une première masse épaisse d'air froid est bloquée sur le massif Alpin et qu'une seconde masse d'air froid venant du Nord-Ouest est précédée d'une invasion d'air tropical de Sud-Ouest.

De telles invasions chaudes donnent naissance à un jet stream.

On voit à nouveau l'importance que revêt pour les vols à haute altitude la mise en évidence des jets d'air chaud que seuls peuvent révéler les radiosondages.

Comme conclusion, nous retiendrons que les vols à haute altitude ne sont pas systématiquement des vols en ciel clair.

Il est juste, cependant, de préciser que la présence de nuages à ces altitudes élevées ne pose pas de problèmes opérationnels très sérieux pour l'exploitation des lignes commerciales. Pour l'aviation militaire ces nuages peuvent présenter un intérêt tactique et créer certaines difficultés au vol de groupe.

#### IV.- LA TURBULENCE.

Au cours d'un vol, un avion peut être soumis dans certaines régions de l'atmosphère à des accélérations verticales qui provoquent des secousses brutales susceptibles de gêner fortement le pilotage des avions rapides et même de provoquer certaines déformations ou ruptures. On confond fréquemment sous l'appellation : turbulence, l'agitation propre de l'atmosphère (irrégularité du vent, rafales horizontales ou verticales) et l'agitation induite sur un avion, les deux phénomènes ne présentant que des relations parfois assez lâches.

Un calcul simple montre que l'accélération verticale subie par un avion qui pénètre brusquement dans une colonne d'air ascendante de vitesse verticale  $W$  est donnée par la formule:

$$\gamma = \frac{1}{2} (W) \left( \frac{CV}{m} \right) \left( \frac{1}{s} \right)$$

où :  $\gamma$  = masse spécifique de l'air  
 $W$  = vitesse verticale de l'air ascendant  
 $C$  = coefficient de portance  
 $V$  = vitesse de l'avion  
 $m/s$  = charge alaire

On voit donc que l'accélération dépend pour une part de l'atmosphère et pour une autre part des caractéristiques de l'avion.

Les zones de turbulence se rencontrent surtout dans les nuages à développement vertical (Cumulus, Cumulonimbus, Altostratus instable) mais aussi parfois en atmosphère claire.

Dans le cas des nuages, le phénomène est assez bien connu et sa prévision est liée à celle du développement vertical des nuages correspondants. C'est une prévision que l'on sait faire à l'aide des données des radiosondages.

Il apparaît toutefois assez difficile de chiffrer l'intensité du phénomène; tout au plus est-il possible d'avoir une idée de la limite supérieure de cette intensité dans une échelle du genre: faible, modérée, assez forte, forte, très forte, échelle dont les degrés sont variables en fonction du type d'avion.

Il apparaît de plus que deux avions du même type pénétrant à la même altitude dans le même nuage à une demi-heure d'intervalle par exemple, sont susceptibles de rencontrer, l'un une turbulence faible ou modérée, l'autre une turbulence très forte.

On a envisagé d'équiper certains avions de radars sur ondes centimétriques ( $\lambda = 3$  cm) dans le but de détecter, notamment de nuit, les nuages à développement vertical, susceptibles d'être le siège de fortes turbulences. On a observé, en effet que les ondes radioélectriques très courtes sont fortement diffusées par les grosses gouttelettes d'eau notamment les gouttes de pluie, permettant ainsi d'obtenir des échos sur l'écran radar.

Or, les nuages à développement vertical contiennent fréquemment un pourcentage élevé de grosses gouttes maintenues en suspension dans les forts courants ascendants. Cette méthode permet également comme nous le verrons ci-après de détecter certaines zones de givrage dangereux.

Le problème qui retiendra plus spécialement notre attention dans le cas des vols à haute altitude est celui de la turbulence en dehors des nuages.

Il en résulte de rapports de pilotes que cette turbulence débute de façon très brutale. Cette apparition soudaine ne serait pas sans danger pour un avion naviguant "sur pilote automatique".

Plusieurs rapports insistent sur le caractère "plus cyclique" de cette forme de turbulence rappelant les cahots ressentis par une automobile rapide qui roulerait brusquement sur une route défoncée dont les accidents n'auraient pas été décelés auparavant (rapport d'un pilote anglais).

D'après les études en cours sur ce phénomène, il semble bien que cette turbulence soit associée aux régions de fort gradient vertical de vent et probablement à un degré moindre aux régions de fort gradient horizontal de vent. Autrement dit, on l'observerait surtout en bordure des "jet stream" et plus généralement sur le côté situé vers la zone de basses pressions.

Nous voyons une nouvelle fois apparaître l'importance des jet stream pour les vols à haute altitude.

#### V.- LE GIVRAGE.-

Etant donné la faible teneur en eau des couches élevées de l'atmosphère, le givrage à haute altitude est relativement peu important, quoiqu'on ait signalé pendant la guerre des cas de givrage obligeant à l'abandon de missions à haute altitude.

C'est surtout au cours de la montée ou de la descente que le phénomène est à craindre et spécialement au cours de la descente lorsque l'avion froid se trouve en présence de grosses gouttelettes d'eau à température inférieure à 0°C. On sait, en effet, que la dimension des gouttelettes d'eau surfondue influe considérablement sur la nature du givrage et sa résistance à l'action des dégivreurs.

De petites gouttelettes d'eau d'un diamètre de l'ordre de 10 microns (p) telles qu'on en rencontre dans les nuages en nappe du type Stratus ou Altostratus stable se solidifient en bloc et s'agglomèrent sous forme d'une matière pulvérulente comportant des inclusions d'air. Ce type de givre cède assez facilement à l'action des dégivreurs.

De grosses gouttelettes ou des gouttes de pluie de l'ordre de 1 mm (1.000.000 de fois plus grosses en volume que les précédentes) telles qu'on peut en rencontrer dans les nuages à développement vertical: Cumulus puissants, Cumulonimbus, Nimbostratus et Altostratus instables, donnent au contraire un givre du type verglas beaucoup plus adhérent et compact et plus difficile à éliminer.

Les radars sur ondes très courtes (3cm) donnent généralement des échos sur de tels nuages de sorte que leur emploi pour la détection de certaines zones de turbulence se trouve également justifié pour la détection de certaines zones de givrage dangereux.

En ce qui concerne les avions à réaction, on a pu penser que le givrage avait peu d'importance pour eux par suite de la température élevée de fonctionnement des réacteurs d'une part et par suite de la grande vitesse des appareils provoquant une élévation de leur température tant par frottement que par compression de l'air.

En fait, l'expérience a montré que les avions à réaction pouvaient givrer.

On a observé, tout comme pour les avions classiques, quoique plus rarement semble-t-il, des givrages de bords d'attaques, d'empennages, de cockpit etc...

On a également observé le givrage des réacteurs et ce givrage est particulièrement dangereux. D'après des expériences faites au Canada sur un turboréacteur allemand (1), les bords d'attaque de la piste d'air, le capotage de l'axe de compresseur, les attaches de fixation de ce capotage, la grille d'air et les deux premiers étages d'ailettes du compresseur axial peuvent être soumis à un givrage important.

Ce givrage a pour effet d'obstruer partiellement l'admission d'air notamment lorsqu'il existe une grille de protection et surtout, lorsque le dépôt est important, des morceaux de glace peuvent se détacher et endommager les ailettes du compresseur.

Toutes choses égales d'ailleurs, le givrage serait d'autant plus dangereux que le diamètre des gouttes d'eau est plus grand et que leur température négative est plus voisine de 0°C.

La figure 8 empruntée à Interavia montre un aspect du givrage et ses conséquences néfastes sur les aubes du rotor d'après les expériences précitées, effectuées par le National Research Council of Canada.

Comme l'obstruction partielle de l'entrée d'air a pour effet d'augmenter la température de combustion d'une quantité qui peut excéder 200 à 300°, le début du givrage du réacteur peut être détecté par un thermomètre.

Il y aurait encore beaucoup à dire sur la Météorologie des vols à haute altitude - il y aurait surtout beaucoup de précisions à apporter au présent exposé, mais nous nous limiterons volontairement à l'étude succincte des particularités essentielles qui viennent d'être examinées.

Nous voudrions toutefois mentionner deux observations intéressantes effectuées par deux pilotes français - il s'agit de courants descendants de l'ordre de 8 à 10 m/sec. au voisinage de la tropopause annihilant pratiquement la vitesse ascensionnelle de l'avion. De telles observations sont confirmées par l'étude de la vitesse ascensionnelle des ballons de radiosondage. Bien que ces deux cas isolés parvenus à notre connaissance ne permettent pas de tirer de conclusions fermes de l'étude qui en a été faite, il semble que cette éventualité de courants descendants soit associée à des configurations particulières de

---

(1) Interavia n° 3 - 3° année - mars 1948.

sondages de température mettant en évidence une double tropopause ou au moins la présence d'une couche froide dans la basse stratosphère.

Comme conclusion, nous pensons avoir suffisamment mis en évidence tout au long de cet exposé, l'importance fondamentale d'un réseau de radiosondages, sans lequel on ne peut espérer résoudre les problèmes météorologiques du vol à haute altitude.

En effet, si le réseau d'observations au sol, combiné avec quelques observations de nuages et de vent en altitude, permet assez souvent d'avoir une idée de la situation météorologique jusque vers 3.000, 4.000 ou même 5.000 m., il est pratiquement impossible d'en déduire une idée de ce qui se passe aux niveaux supérieurs. Il faut donc de toute nécessité mesurer à ces niveaux, la valeur d'un certain nombre d'éléments météorologiques pour être à même de prévoir leur évolution, d'où la nécessité du réseau de radiosondages et de radiovents.

Par mesures d'économie, ce réseau n'a pas été développé ou a été même réduit dans certains pays. Une telle mesure est intervenue récemment en France. Il est évident que l'exploitation d'un tel réseau coûte cher en matériel et en personnel spécialisé, mais il ne saurait y avoir deux politiques en matière d'aviation, l'une qui consisterait à mettre en service des appareils nouveaux très coûteux et l'autre qui leur refuserait les moyens d'infrastructure propres à assurer leur sécurité et leur exploitation rationnelle.

Je conclurai donc dans l'espoir que ces conditions économiques plus favorables viendront bientôt permettre le libre essor des lignes aériennes à haute altitude.