QB
4
.D66
G85
no. 16
ocgre

Énergie, Mines et Ressources Canada

Direction de la physique du globe

Energy, Mines and Resources Canada

Earth Physics Branch

Service géomagnétique du Canada

LEVÉ AÉROMAGNÉTIQUE À TROIS COMPOSANTES DE L'EST DU CANADA

G.V. Haines et W. Hannaford

RESERVE/RÉSERVÉ

NOT TO BE TAKEN FROM THE ROOM
POUR LA CONSULTATION SUR PLACE

Série géomagnétique
Numéro 16
Ottawa, Canada 1980

This document was produced by scanning the original publication.

Ce document est le produit d'une numérisation par balayage de la publication originale.

Énergie, Mines et Ressources Canada
Direction de la physique du globe
1 Place de l'Observatoire
Ottawa Canada
K1A 0Y3

Energy, Mines and Resources Canada
Earth Physics Branch
1 Observatory Crescent
Ottawa Canada
K1A 0Y3

Service géomagnétique du Canada

LEVÉ AÉROMAGNÉTIQUE À TROIS COMPOSANTES DE L'EST DU CANADA

G.V. Haines et W. Hannaford

Série géomagnétique
Numéro 16
Ottawa, Canada 1980

TABLE DES MATIÈRES

Résumé..... iii

Introduction..... 1

Navigation..... 1

Champs horizontaux, angles, et système de coordonnées..... 2

Corrections de l'étalonnage et du champ magnétique

(permanent et induit) de l'avion..... 4

1. Cas général..... 4

2. Aucune variation de Z pendant les vols d'étalonnage..... 5

3. Aucune variation de H ni de Z pendant les vols d'étalonnage..... 6

Corrections de l'étalonnage et du champ (permanent) de l'avion..... 6

Corrections d'étalonnage..... 7

Corrections de compatibilité de Z..... 8

Cohérence des données obtenues avec les deux magnétomètres..... 10

Présentation des données..... 10

Remerciements..... 12

Références..... 12

RÉSUMÉ

Un levé aéromagnétique à trois composantes a été effectué au-dessus du Centre et de l'Est du Québec, du détroit de Davis, des provinces de l'Atlantique, et des régions océaniques adjacentes en 1976. La distance moyenne entre les lignes de vol était de 74 km et l'altitude moyenne était de 4,6 km au-dessus du niveau de la mer.

On ne présente que les données qui ont été enregistrées pendant les périodes tranquilles. Les données du levé sont représentées sous forme de moyennes sur une période de 30 secondes, équivalente à une distance de 3,5 km. On a soustrait de ces données les valeurs du champ géomagnétique international de référence (International Geomagnetic Reference Field - IGRF), et les données résiduelles ont été tracées sous formes de profils. On a appliqué un polynôme du 3e degré aux données du levé par la méthode des moindres carrés. On présente des cartes de lignes d'égale valeur du champ polynôme duquel a été soustrait l'IGRF.

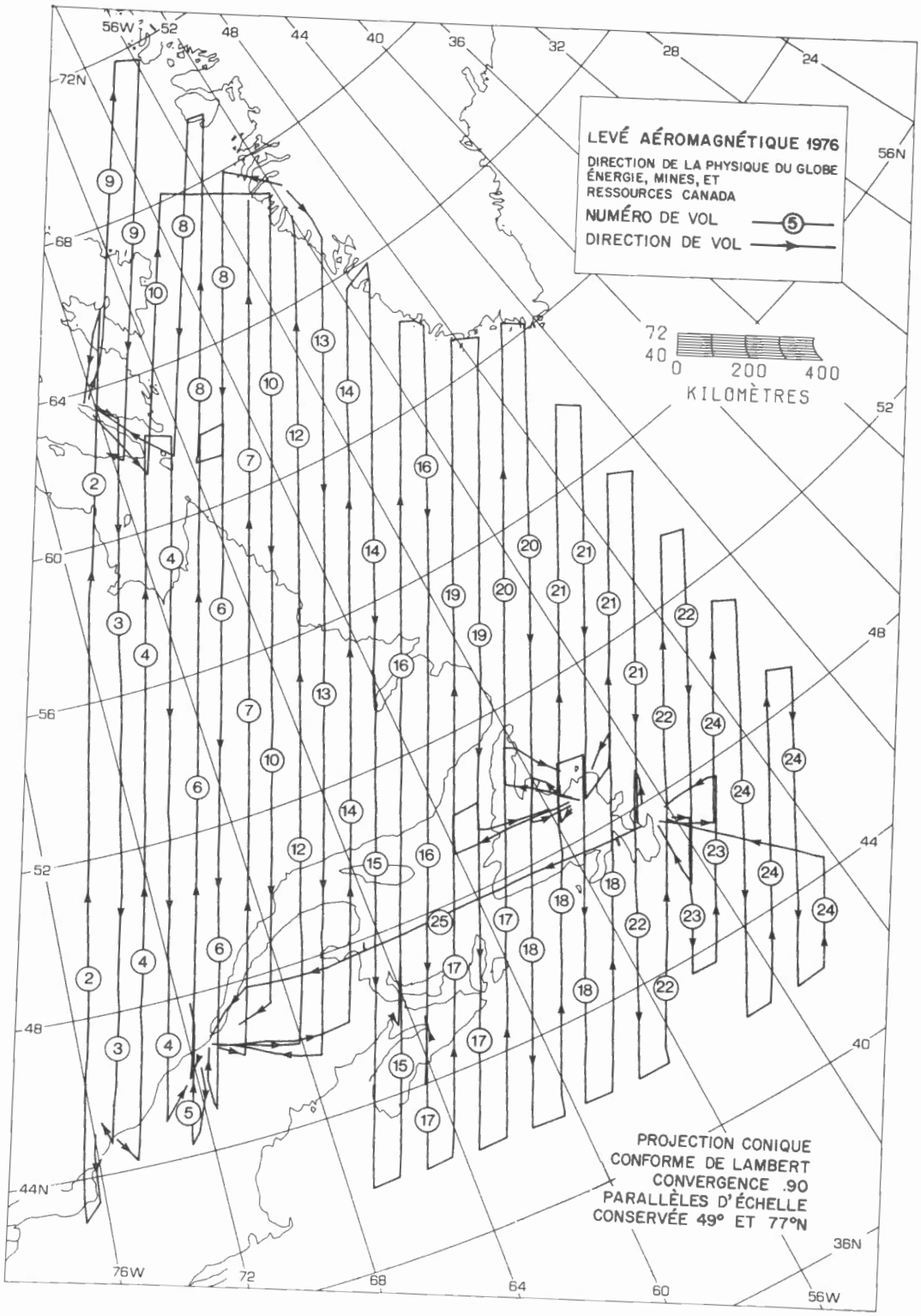

Fig. 1 Lignes de vols du levé aéromagnétique à trois composantes de l'Est du Canada effectué en 1976 par la Direction de la physique du globe. Les numéros des vols sont encerclés et les pointes des flèches indiquent la direction de vol. Le levé a été effectué entre le 31 août et le 15 octobre 1976, à l'altitude moyenne de 4,6 km.

LEVÉ AÉROMAGNÉTIQUE À TROIS COMPOSANTES DE L'EST DU CANADA

G.V. Haines et W. Hannaford

INTRODUCTION

Du 31 août au 15 octobre 1976 la Direction de la physique du globe a réalisé un levé aéromagnétique à trois composantes au-dessus du Centre et de l'Est du Québec, au-dessus du détroit de Davis, du Nouveau-Brunswick, de la Nouvelle-Écosse, de l'Île-du-Prince-Edouard, de Terre-Neuve et de zones adjacentes de l'océan Atlantique. Une carte index des lignes de vol est donnée à la figure 1.

L'appareil utilisé était un DC-6, affrété à la Conair Aviation. Environ 85 000 kilomètres ont été survolés, dont à peu près 23 000 pour des vols d'essai, de convoyage et d'étalonnage.

Les 62 000 kilomètres de vol au-dessus de la principale zone de levés ont été effectués avec un espacement moyen de 74 kilomètres entre les lignes de vol, et à des altitudes variant entre 3 et 4,9 kilomètres (la moyenne étant de 4,6 kilomètres). La zone couverte était de $4,5 \times 10^6$ km^2.

Les mesures magnétométriques ont été prises à l'aide de deux magnétomètres indépendants: une sonde à précession de protons a été montée sur une lisse à l'arrière de l'appareil et une sonde à saturation (fluxgate) triaxiale gyrostabilisée a été montée à l'arrière de la cabine de l'appareil. La première a relevé l'intensité totale F du champ et la deuxième a donné la déclinaison D, la composante horizontale H et la composante verticale Z.

Pour obtenir une description détaillée de la plate-forme, des magnétomètres, du système d'acquisition des données et du mini-ordinateur installé à bord de l'appareil, veuillez consulter Haines et Hannaford (1974 et 1978).

NAVIGATION

L'appareil était équipé de deux systèmes de navigation par inertie Litton LTN-51. L'un deux a constamment été plus précis que l'autre, et a donc servi d'instrument principal de navigation tandis que le deuxième servait de système d'appoint. Les deux systèmes ont fonctionné continuellement tout le long de chaque vol, à l'exception du vol 23 pendant lequel le système principal de navigation par inertie a cessé de fonctionner peu après le décollage.

Le tableau de commande du système de navigation par inertie est équipé d'un clavier et deux écrans de visualisation numérique pour recevoir et donner des renseignements en matière de navigation. Avant le décollage, le navigateur introduit dans le système les valeurs de latitude et de longitude de la position de l'appareil à ce moment donnée, ainsi que les mêmes valeurs pour la destination finale et pour un maximum de neuf points tournants sur l'itinéraire désiré. Par la suite, le système de navigation par inertie calcule à chaque seconde les nouvelles valeurs de latitude et de longitude, d'angle de route vraie et de vitesse-sol, ainsi que le cap vrai et l'angle de dérive jusqu'au point tournant suivant. Le type de renseignements que l'on veut obtenir sur le double écran de visualisation du système peut être choisi par paire. La latitude et la longitude sont données en degrés et en minutes au dixième de minute près; la vitesse est donnée en noeuds et les distances en milles marins. De nouvelles valeurs apparaissent à chaque seconde sauf si l'on presse le bouton HOLD.

La latitude et la longitude indiquées par les deux systèmes ont été, en général, enregistrées toutes les dix minutes, ainsi que les autres données fournies par le système de navigation par inertie.

Lorsque les repères identifiables étaient visibles, la position réelle de l'appareil a été déterminée de temps en temps à l'aide de la carte. Si l'on constatait que la position donnée par le système de navigation par inertie variait de plus de deux ou trois milles marins, les valeurs vraies de la latitude et de la longitude étaient composées sur le clavier

et une instruction de correction était donnée. Cette méthode a eu pour effet d'éliminer l'erreur qui s'accumule dans les positions données par le système de navigation par inertie entre une correction et la suivante.

Immédiatement après chaque vol, l'appareil stationnait dans un endroit dont la position était connue avec précision et la position correspondante était enregistrée au moyen du système de navigation par inertie. La distance en milles marins entre ces deux positions, appelée erreur terminale, est alors calculée par le système après insertion de la latitude et de la longitude vraies. De plus, le système calcule la distance entre la position finale vraie et celle qu'il aurait indiquée si aucune correction en vol n'avait été effectuée. Cette dernière est définie comme étant l'erreur de parcours; en divisant ce chiffre par la durée du vol on obtient le taux d'erreur moyen. La moyenne des taux d'erreurs calculée pour 24 vols était de 1,5 km/h, et l'écart-type était de 1,1.

On a obtenu une indication de la précision des positions données par le système de navigation par inertie en utilisant les erreurs terminales avec celles qui avaient été déterminées par contrôles visuels en vol. Dans les deux cas, l'erreur est influencée par la correction précédente, s'il y en a eu une. L'écart moyen et l'écart-type de 90 erreurs de positionnement dues au système de navigation par inertie ainsi obtenues étaient respectivement de 5,9 et de 4,8 kilomètres.

Cependant, certaines modifications ont été apportées aux positions données par le système de navigation par inertie avant le report définitif des positions géographiques dans les données obtenues au cours du levé. Une modification linéaire a été apportée aux positions avant correction, afin d'éliminer la discontinuité qui serait apparue autrement. De même, lorsqu'aucune correction n'a été apportée, mais lorsque des contrôles visuels ont indiqué un décalage constant par rapport aux positions données par le système de navigation par inertie, un rajustement a été effectué en conséquence. La liste résultante, comprenant les positions de l'appareil toutes les dix minutes et parfois lorsque l'appareil changeait de cap, a été utilisée comme point de départ pour déterminer l'emplacement des profils géomagnétiques présentés ici. Des positions intermédiaires ont été calculées en présumant que l'appareil suivait une route orthodromique à une vitesse-sol constante entre deux positions consécutives sur la liste.

La précision des renseignements en matière de navigation dans leur forme finale a alors été estimée en comparant les 66 points visuels observés en vol avec les positions calculées correspondantes. L'écart moyen et l'écart-type des erreurs indiquées étaient respectivement de 3,9 et de 2,5 kilomètres.

En outre de fournir les renseignements sur lesquels a été fondé le positionnement des données du levé, le principal système de navigation par inertie a aussi permis au pilote automatique de maintenir automatiquement le cap de l'appareil en donnant des valeurs analogiques de la tension correspondant à la déviation latérale de l'avion qui pouvaient être communiquées à la commande de direction du pilote automatique.

Lors de levés précédents, un système doppler a servi de moyen indépendant de navigation et a aussi fourni des renseignements sur la vitesse-sol et sur la dérive au mini-ordinateur couplé aux magnétomètres (voir Haines et Hannaford, 1978). En ce qui concerne le levé de 1976 dont nous faisons ici état, ces fonctions ont été exécutées par le deuxième système de navigation par inertie.

CHAMPS HORIZONTAUX, ANGLES, ET SYSTÈME DE COORDONNÉES

La figure 2 montre les champs horizontaux et les directions de référence du magnétomètre à saturation. Les lettres affectées du signe "prime" indiquent les éléments du champ "apparent" (champs magnétiques de la Terre et de l'appareil combinés). Les lettres suivies d'un astérisque indiquent les mesures ou les valeurs calculées simplement à partir des mesures.

La longitude Est λ_e est donnée par le système de navigation décrit dans la dernière section. L'angle ε^* s'obtient en observant fréquemment les astres pendant le vol. Sa détermination a été expliquée par Haines et Hannaford (1978). C'est une mesure de l'angle entre le nord de la grille (défini comme étant la direction du nord vrai plus la longitude Est) et le cap gyromagnétique. Les angles ε et ε^* peuvent varier de quelques degrés, selon la précision avec laquelle on aligne le sextant lors du montage initial dans l'appareil.

L'angle D_g^* est la mesure de l'angle D'_g entre le nord gyroscopique et le nord magnétique apparent (direction de H'). Les deux angles peuvent varier de quelques dixièmes de degré en raison de faibles erreurs dans le voltmètre numérique, dans l'alimentation de tension de précision, et dans le potentiomètre de précision.

Les deux différences de correction $(\varepsilon - \varepsilon^*)$ et $(D'_g - D_g^*)$ sont combinées dans l'angle de correction d'étalonnage d_o, qui permet le calcul de la déclinaison apparente D':

$$D' = \lambda_e + \varepsilon^* + D_g^* + d_o \qquad 1$$

La composante H* mesurée du champ horizontal doit être corrigée de la constante d'étalonnage h_o pour donner la composante H' du champ horizontal apparent:

$$H' = H^* + h_o \qquad 2$$

Les deux valeurs D' et H' sont corrigées des champs de l'avion afin de donner la déclinaison D et la composante H du champ horizontal de la Terre.

La mesure de l'angle ψ_g entre le gyroscope et l'axe de roulis de la plate-forme est donnée par ψ_g^*. Les angles varient, en raison d'une erreur de synchro, d'environ un dixième de degré. La plate-forme et le carter de la sonde à saturation sont installés dans l'avion de façon que l'axe de roulis de la plate-forme ne varie pas de plus d'un degré ou deux par rapport à l'axe de roulis (ou de l'axe longitudinal) de l'appareil. Par conséquent, ψ_g^* est à un ou deux degrés de l'axe longitudinal de l'appareil et donne effectivement le cap de l'appareil par rapport au gyroscope.

Pour déterminer et faire disparaître les champs de l'avion, un système de coordonnées établi par rapport à l'avion est défini au moyen de l'angle ψ_g^*. Si l'on ajoute ψ_g^* à la direction du zéro du sextant, on obtient la direction de la coordonnée "P"; la coordonnée "Q" se trouve à 90° de cette première coordonnée dans le sens des aiguilles d'une montre. La coordonnée P est donc à quelques degrés de l'axe longitudinal de l'appareil. En fait, l'angle formé dans le sens des aiguilles d'une montre à partir

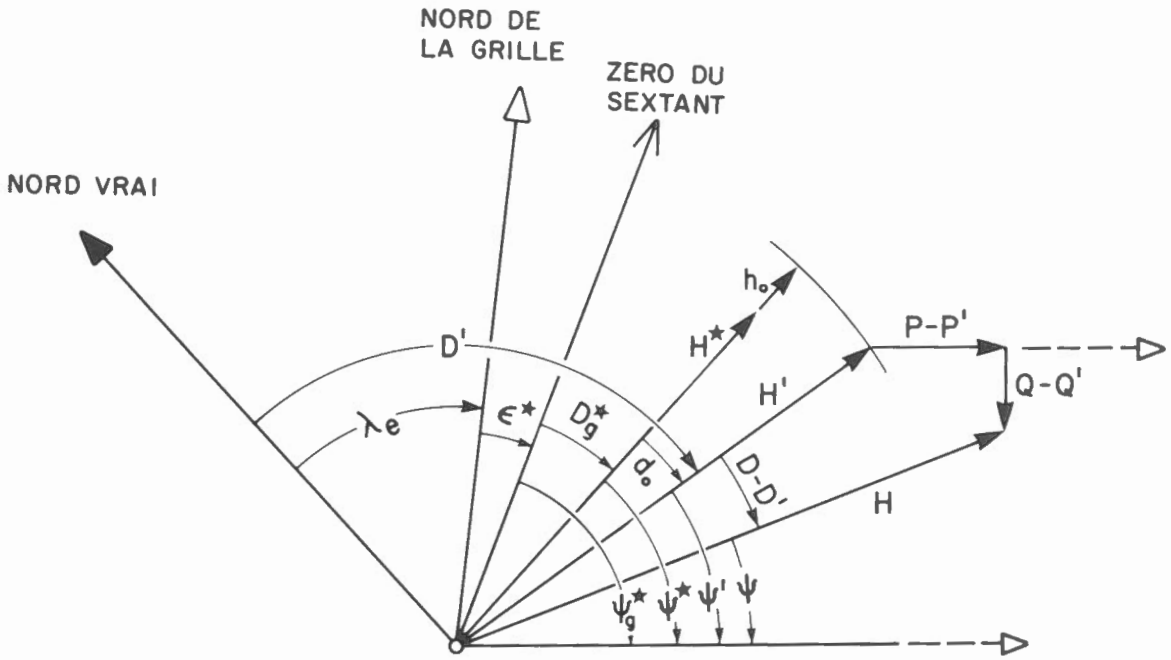

Fig. 2 Champs horizontaux et directions de référence correspondant à l'établissement des composantes D et H. Les corrections P-P' et Q-Q' des champs de l'avion comprennent les effets des champs permanents et induits. Cependant, les effets des champs induits ne peuvent être séparés de l'effet de l'angle d_o. Les corrections sont exprimées par rapport à H'; elles peuvent bien sûr être exprimées par rapport à H* comme dans la figure 3.

de la direction P jusqu'à l'axe longitudinal de l'appareil est égal à $(\varepsilon - \varepsilon^*) + (\psi_g - \psi_g^*) + \alpha$, où α est l'angle formé dans le sens des aiguilles d'une montre à partir de l'axe de roulis de la plate-forme jusqu'à l'axe de roulis de l'appareil.

Les vecteurs P-P' et Q-Q' sont des composantes des corrections du champ de l'appareil dans ce système de coordonnées. Le cap magnétique mesuré ψ^* de la direction de la coordonnée P est donné par

$$\psi^* = \psi_g^* - D_g^* \qquad 3$$

Le cap magnétique vrai, aux fins de l'analyse des résultats du vol d'étalonnage (pour déterminer les champs de l'avion lorsque les valeurs de D et de H sont données) est

$$\psi = \lambda_e + \varepsilon^* + \psi_g^* - D \qquad 4$$

Le cap magnétique apparent est simplement

$$\psi' = \psi^* - d_o \qquad 5$$

Comme nous l'avons déjà mentionné, ces "caps" varient de quelques degrés par rapport aux caps respectifs de l'avion.

CORRECTIONS DE L'ÉTALONNAGE ET DU CHAMP MAGNÉTIQUE (PERMANENT ET INDUIT) DE L'AVION

1. Cas général

Les effets des corrections P-P' et Q-Q' du champ magnétique de l'avion et des corrections d'étalonnage h_o et d_o peuvent se combiner (voir la figure 3) pour donner

$$P - P_o^* = aP + bQ + cZ + P_0 \qquad 6$$

$$Q - Q_o^* = dP + eQ + fZ + Q_0 \qquad 7$$

$$Z - Z^* = gP + hQ + kZ + R_0 \qquad 8$$

où

$$P = H \cos \psi \qquad 9$$

$$Q = -H \sin \psi \qquad 10$$

$$P_o^* = (H^* + h_o) \cos \psi^* \qquad 11$$

$$Q_o^* = -(H^* + h_o) \sin \psi^* \qquad 12$$

et a, b, ..., k sont des coefficients qui résultent des champs induits de l'avion et de l'angle d_o, et P_0, Q_0 et R_0 sont des constantes qui résultent des champs

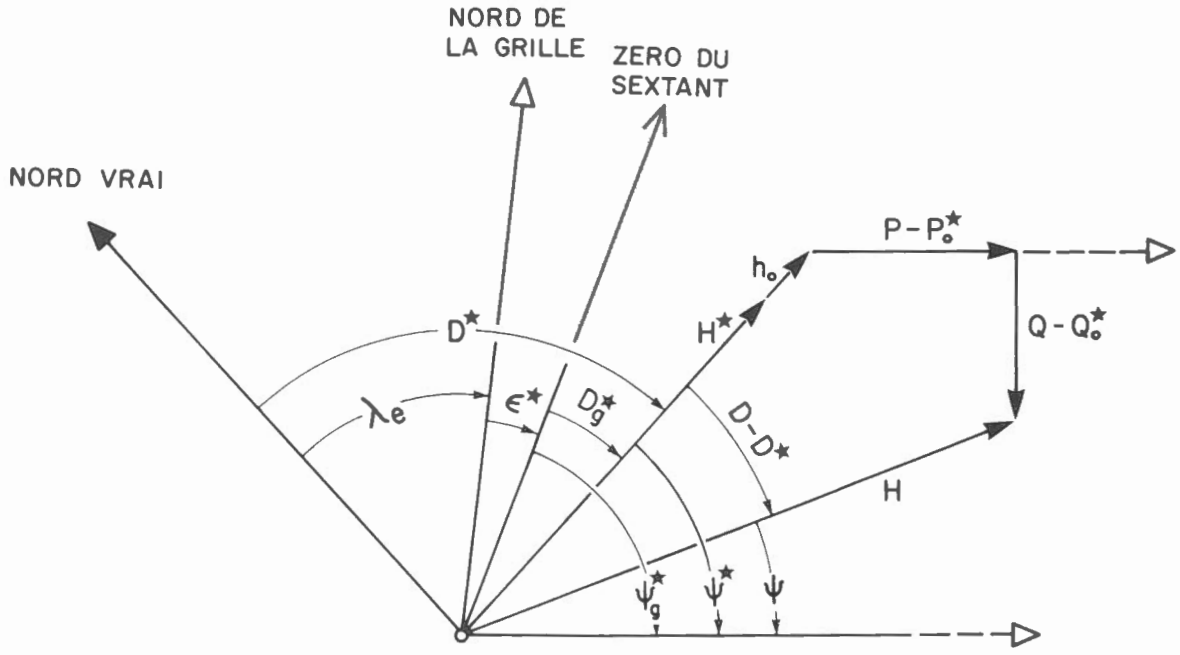

Fig. 3 Corrections d'étalonnage et corrections des champs de l'avion par rapport à H*. Les corrections $P-P_o^*$ et $Q-Q_o^*$ comprennent l'effet de l'angle d_o (figure 2) ainsi que l'effet des champs permanents et induits.

magnétiques permanents. Il faut remarquer que P_o^* et Q_o^* sont des composantes du vecteur $H^* + h_o$, qui équivaut à H' en magnitude, et pas seulement du vecteur H*.

Les coefficients réels des équations 6 et 7 en fonction de d_o et en fonction des coefficients induits a, b, ..., k, se trouvent par exemple dans Haines et Hannaford (1978), équations 38 et 39 avec $P'' = P_o^*$, $Q'' = Q_o^*$, $a_1 = b_2 = \cos d_o$, $a_2 = -b_1 = \sin d_o$, $a_3 = b_3 = 0$. Cependant, étant donné que leurs effets ne peuvent pas être séparés, les équations 6 et 7 sont les plus générales. En fait, elles comprennent aussi les effets dus à l'orientation du magnétomètre (ibid., page 7).

2. Aucune variation de Z pendant les vols d'étalonnage

Si Z varie peu dans les vols d'étalonnage, l'effet des champs induits par Z doit être combiné avec celui des champs permanents respectifs (voir Haines et Hannaford, 1978). Si l'on remplace ces effets combinés par les constantes P_1, Q_1 et R_1:

$$P - P_o^* = aP + bQ + P_1 \qquad 13$$

$$Q - Q_o^* = dP + eQ + Q_1 \qquad 14$$

$$Z - Z^* = gP + hQ + R_1 \qquad 15$$

Comme auparavant, les coefficients a, b, d et e comprennent non seulement les effets des champs magnétiques induits de l'appareil et de l'orientation du magnétomètre, mais aussi ceux de l'angle d_o.

Si l'on exprime les équations 13 et 14 en fonction de H*, ψ^*, H et ψ (où ψ^* et ψ sont donnés par les équations 3 et 4):

$$H\cos\psi - H^*\cos\psi^* = P_1 + h_o\cos\psi^* + aH\cos\psi - bH\sin\psi \qquad 16$$

$$-H\sin\psi + H^*\sin\psi^* = Q_1 - h_o\sin\psi^* + dH\cos\psi - eH\sin\psi \qquad 17$$

Ces équations sont exactes et sont linéaires dans les inconnues h_o, a, b, d et e. Elles peuvent donc être résolues directement par la méthode normale des moindres carrés. Les deux équations contiennent bien sûr l'inconnue h_o, et doivent donc être résolues simultanément.

Haines et Hannaford (1978, équations 25 et 26) ont donné les mêmes expressions à l'exception près qu'un terme comprenant explicitement d_o était inclus, ainsi que des termes induits a, b, d et e. En conséquence, seules 4 des 5 inconnues ont pu être déterminées. Comme auparavant, les effets de d_o et des champs induits ne peuvent être distingués et donc chacune des 4 inconnues comprend les effets de la 5e. Les équations (25 et 26) dans Haines et Hannaford (1978) ne sont cependant qu'approximatives (afin de les rendres linéaires dans le paramètre d_o), et il semblerait que seules d_o, b et d soient reliées, et que la relation (plus petite) de a et de e disparaisse à cause des termes erronés.

Les données du levé peuvent être corrigées compte tenu des valeurs des moindres carrés de h_o, a, b, P_1, d, e, Q_1, g, h, R_1 d'après les équations 13 à 15 (ou de la même façon, 15 à 17) par les rapports inverses

$$P = \frac{(1-e)(P_o + P_1) + b(Q_o + Q_1)}{(1-a)(1-e) - bd} \qquad 18$$

$$Q = \frac{(1-a)(Q_o + Q_1) + d(P_o + P_1)}{(1-a)(1-e) - bd} \qquad 19$$

$$Z = (Z^* + R_1) + gP + hQ \qquad 20$$

Les valeurs corrigées ψ, H et D sont les suivantes:

$$\psi = \arctan(-Q/P) \qquad 21$$

$$H = \sqrt{P^2 + Q^2} \qquad 22$$

$$D = \lambda_e + \varepsilon^* + D_g^* + \psi^* - \psi \qquad 23$$

où l'arc tangente doit être pris dans le quadrant approprié aux signes de P et de Q.

La correction de F est donnée (voir Haines et Hannaford, 1978, équation 30) par

$$F - F^* = \left[a\cos^2\psi - (b+d)\sin\psi\cos\psi + e\sin^2\psi\right]H^2/F + \left[P_2\cos\psi - Q_2\sin\psi\right]H/F + R_1Z/F \qquad 24$$

$$= \left[\left(\frac{a+e}{2}\right) + \left(\frac{a-e}{2}\right)\cos 2\psi - \left(\frac{b+d}{2}\right)\sin 2\psi\right]H^2/F + \left[P_2\cos\psi - Q_2\sin\psi\right]H/F + R_1Z/F \qquad 25$$

où P_2 résulte de la combinaison des effets de gZ et P_1, et Q_2 de la combinaison hZ et Q_1.

Les paramètres calculés dans la présente section, d'après les observations effectuées au cours des vols d'étalonnage lorsque Z varie, doivent bien sûr être utilisés pour corriger les données obtenues tout au cours du levé. Par exemple, pendant ce levé, la valeur la plus grande de Z est d'environ 3 500 nT supérieure à la valeur d'étalonnage, la plus faible était inférieure d'environ 9 000 nT. Étant donné que l'erreur d'approximation des équations 6 à 8 par les équations 13 à 15 est respectivement c, f et k fois, la quantité dont Z varie par rapport à la valeur Z d'étalonnage, cette erreur pourrait être appréciable.

3. Aucune variation de H ni de Z pendant les vols d'étalonnage

Il est à remarquer que la solution des équations 16 et 17 dépend de la variation de H ainsi que de ψ. Lorsque les vols d'étalonnage ne sont effectués que dans un seul endroit, les termes h_o et aH ne peuvent être distingués dans l'équation 16, parce que ψ et ψ^* sont presque égaux. De même, les termes h_o et eH ne peuvent être distingués dans l'équation 17. Dans ces conditions, les équations deviennent:

$$H \cos \psi - H^* \cos \psi^* = P_1 + (h_o + aH) \cos \psi - bH \sin \psi + \varepsilon_1 \quad 26$$

$$-H \sin \psi + H^* \sin \psi^* = Q_1 - (h_o + eH) \sin \psi + dH \cos \psi + \varepsilon_2 \quad 27$$

où

$$\varepsilon_1 = h_o (\cos \psi^* - \cos \psi) \quad 28$$

$$\varepsilon_2 = -h_o (\sin \psi^* - \sin \psi) \quad 29$$

On peut démontrer que la valeur maximale de $|\varepsilon_1|$ et de $|\varepsilon_2|$ est $2h_o \sin |\frac{D-D^*}{2}|$. Dans ce levé, l'erreur maximale était d'environ 3 nT, et l'on pouvait donc négliger ε_1 et ε_2.

Dans le cas présent, lorsque la variation de H ou de Z est faible par rapport aux valeurs d'étalonnage, les équations obtenues par la méthode des moindres carrés ne sont plus associées, et contiennent chacune trois inconnues. Comme dans le cas où il n'existe aucune variation de Z, la correction des données obtenues en cours de levé en fonction d'un modèle contenant un nombre réduit d'inconnues comme celui-ci ne serait pas souhaitable s'il existait de grandes variations de H au cours du levé, étant donné que de grandes erreurs pourraient se produire lorsque la valeur de H sur le lieu du levé variait considérablement par rapport à la valeur de H à l'emplacement où a été effectué l'étalonnage. Au cours du levé, par exemple, la valeur la plus élevée de H était d'environ 5 000 nT supérieure à la valeur d'étalonnage, et la valeur la plus faible était d'environ 8 500 nT inférieure. Les erreurs dues au rapprochement des équations 16 et 17 avec les équations 26 et 27 pourraient être très grandes, en fonction respectivement des valeurs de a et e. De plus, les erreurs résultant de l'absence de la variation de H au-dessus des zones d'étalonnage, s'ajoutent aux erreurs que nous avons mentionnées dans la dernière section et qui résultent de l'absence de variation de Z au-dessus des zones d'étalonnage.

La correction de Z (équation 15) demeure la même lorsqu'il n'y a aucune variation de H au-dessus des zones d'étalonnage. Dans le cas de la correction de F (équation 25) les termes $(\frac{a+e}{2})H^2/F$ et R_1Z/F ne peuvent être distingués et doivent être combinés. Encore une fois, cela pourrait provoquer des erreurs lorsqu'on corrige la valeur de F au cours du levé.

CORRECTIONS DE L'ÉTALONNAGE ET DU CHAMP (PERMANENT) DE L'AVION

Lorsque les coefficients a, b, d, e ne dérivent que de l'angle d_o, on peut démontrer que

$$a = 1 - \cos d_o \quad 30$$

$$b = -\sin d_o \quad 31$$

$$d = \sin d_o \quad 32$$

$$e = 1 - \cos d_o \quad 33$$

Si l'on introduit ces équations dans les équations 16 et 17, on obtient

$$\cos d_o \, H \cos \psi - (H^* + h_o) \cos \psi^* = P_1 + \sin d_o \, H \sin \psi \quad 34$$

$$-\cos d_o \, H \sin \psi + (H^* + h_o) \sin \psi^* = Q_1 + \sin d_o \, H \cos \psi \quad 35$$

Bien qu'exactes, ces équations ne sont pas linéaires dans le paramètre d_o. Elles sont associées par h_o et d_o et peuvent être immédiatement résolues par des méthodes non linéaires de moindres carrés.

La solution de ces équations peut être soumise à des tests statistiques en fonction de la solution des équations 16 et 17

(aucune variation de Z) ou des équations 26 et 27 (aucune variation de H ni de Z), et elle peut en conséquence remplacer cette dernière.

La correction des données obtenues pendant le levé s'effectue alors, lorsqu'il n'existe pas de champ induit, en déterminant:

$$P = \cos d_o \ (P_o^* + P_1) \ - \sin d_o \ (Q_o^* + Q_1) \qquad 36$$

$$Q = \sin d_o \ (P_o^* + P_1) \ + \cos d_o \ (Q_o^* + Q_1) \qquad 37$$

$$Z = Z^* + R_1 \qquad 38$$

$$F = F^* + R_1 \ Z/F + (P_2 \cos \psi - Q_2 \sin \psi) \ H/F \qquad 39$$

et en utilisant les équations 21 à 23 comme auparavant.

CORRECTIONS D'ÉTALONNAGE

La méthode des corrections d'étalonnage a été expliquée en détail par Haines et Hannaford (1976).

Pendant ce levé, trois vols d'étalonnage ont été effectués au-dessus de Rosaire (Québec). L'un d'eux comprenait dix passages au début du levé (vol n° 1), le deuxième comprenait dix passages au milieu (vol 11), et le troisième en comprenait douze à la fin (vol 26). Il y a eu aussi un passage pendant le vol 5, mais dans ce cas on n'a pu utiliser que la mesure F des magnétomètres à protons étant donné que la plate-forme n'était pas horizontale, ce qui rendait nulles les mesures D, H et Z obtenues avec la sonde à saturation.

Étant donné que toutes les observations d'étalonnage ont été effectuées en un seul endroit, les équations à utiliser pour les champs permanents et induits de l'avion sont celles de la sous-section traitant de l'absence de variations de H ou de Z au cours des vols d'étalonnage. Les équations des champs permanents seulement sont celles de la dernière section. La solution de ces dernières équations peut être soumise à un test statistique en fonction des précédentes, afin de déterminer si elles permettent, à elles seules, d'expliquer la variation contenue dans ces observations. Les deux séries d'équations comprennent naturellement les effets des corrections h_o et d_o d'étalonnage.

En réalité, on a constaté que les champs induits n'étaient pas significatifs statistiquement. De même, les composantes avant du champ de l'avion, tant la composante P_1 de la sonde à saturation que la composante P_2 du magnétomètre à protons, n'étaient pas significatifs statistiquement. Les corrections d'étalonnage de la sonde à saturation et les autres corrections du champ permanent des deux magnétomètres ont donné les résultats suivants, les écarts-types étant donnés en quantités positives ou négatives:

Sonde à saturation

$d_o = -1.42 + .09°$
$h_o = 61 \pm 25$ nT
$Q_1 = -322 \pm 25$ nT
$R_1 = 50$ nT

Magnétomètre à protons

$Q_2 = -28 \pm 7$ nT
$R_1 = -12.1 \pm 1.6$ nT

Les valeurs H-H' et H(D-D') d'étalonnage sont tracées par rapport au cap magnétique dans le diagramme supérieur de la figure 4. La courbe de correction par la méthode des moindres carrés lorsque H = 15 950 nT (valeur moyenne à Rosaire) est aussi indiquée. La dispersion des 64 points de part et d'autre de la courbe obtenue par la méthode des moindres carrés est de 142 nT.

Le diagramme inférieur de la figure 4 donne des valeurs Z-Z' corrigées de la valeur R_1 d'étalonnage constant suivante:

Vol	R_1	Écart-type
1	-14 nT	16 nT
11	18	16
26	83	14

C'est à dire, Z-Z' varie en fonction du temps, et pour étudier tous les effets sur le cap (coefficients g et h dans l'équation 15) il faut tout d'abord supprimer cette variation. On a constaté que les effets sur le cap n'étaient pas significatifs statistiquement. La dispersion des 32 points, après élimination de ces moyennes pour chaque vol, est de 49 nT.

La valeur donnée d'étalonnage de 50 nT pour R_1 n'est pas attribuable au choix d'une moyenne simple ou pondérée, mais plutôt à l'estimation de la moyenne au cours de l'ensemble du levé. Une correction Z "d'homogénéité", que nous étudierons plus

loin, est apportée, après les corrections d'étalonnage, et elle annule toute erreur de la valeur R_1 de l'étalonnage.

Les valeurs F-F' obtenues avec le magnétomètre à protons et la courbe résultante de correction par la méthode des moindres carrés sont données à la figure 5. La dispersion des 33 points de part et d'autre de la courbe établie selon la méthode des moindres carrés est de 8,6 nT.

CORRECTIONS DE COMPATIBILITÉ DE Z

La méthode qui permet de déterminer et d'apporter une correction changeante de compatibilité de Z (δR) a été expliquée par Haines et Hannaford (1978). La correction globale de Z est:

$$Z-Z^* = gH \cos \psi - hH \sin \psi + R_1 + \delta R \qquad 40$$

où g et h sont des coefficients induits (qui

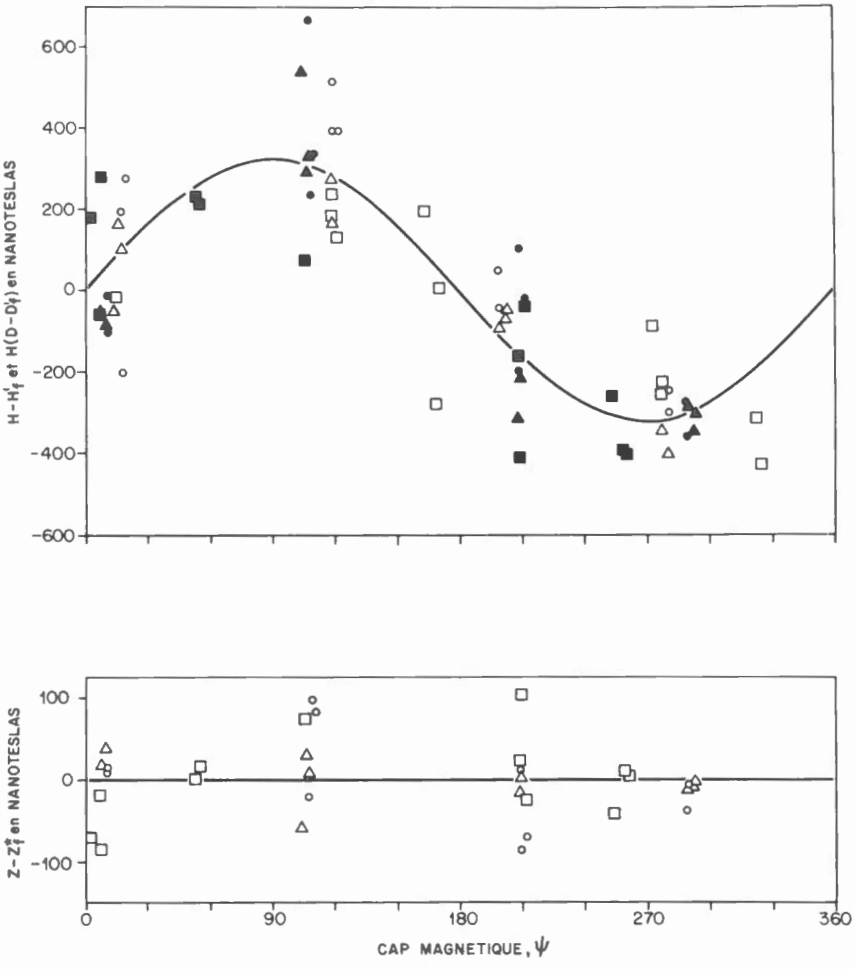

Fig. 4

Corrections d'étalonnage des composantes H et D mesurées par la sonde à saturation, et de la composante Z mesurée par la sonde à saturation après élimination des valeurs d'étalonnage de R_1. Les cercles, les triangles et les carrés s'appliquent respectivement aux vols d'étalonnage 1, 11 et 26 effectués au-dessus de Rosaire. Dans le diagramme supérieur, les symboles pochés sont tracés en fonction de H-H' pour un cap magnétique ψ, les symboles en blanc sont tracés en fonction de H(D-D') pour un cap magnétique de ψ - 90°. La courbe de correction de H à Rosaire (H = 15 950 nT) apparaît aussi.

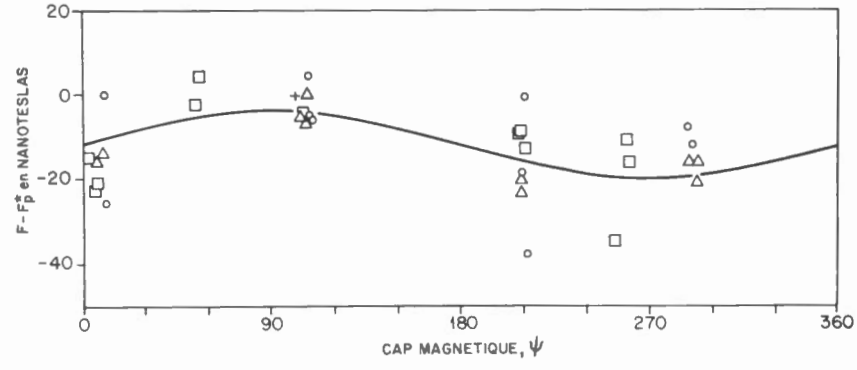

Fig. 5

Corrections d'étalonnage de la composante F mesurée avec le magnétomètre à protons. Les cercles, les triangles et les carrés s'appliquent respectivement aux vols d'étalonnage 1, 11 et 26 effectués au-dessus de Rosaire; le signe plus s'applique au seul passage effectué au-dessus de Rosaire pendant le vol 5. Le diagramme montre également la courbe de correction à Rosaire (H = 15 950 nT).

n'étaient pas significatifs statistiquement pour ce levé et ont été présumés égaux à zéro), et R_1 est la correction de Z d'étalonnage (égale à 50 nT pour ce levé).

La figure 6 montre la différence changeante entre le champ total F_p tel qu'il est mesuré par le magnétomètre à protons et le champ total $F_f = \sqrt{H^2 + Z^2}$ tel qu'il est mesuré par la sonde à saturation. On adopte cette différence changeante comme étant la correction de compatibilité δR.

Si l'on adopte $(F_p - F_f)$ comme étant une correction de Z, on obtient bien sûr une approximation, étant donné que l'expression réelle de δR est (ibid., équation 59):

$$\delta R = F/Z\ (F_p - F_f) - \delta P\ (H/F) \cos \psi + \delta Q\ (H/F) \sin \psi \qquad 41$$

où δP et δQ sont les variations inconnues des champs horizontaux P et Q. Les termes composés de δP et δQ sont généralement faibles, en raison du facteur H/Z. On peut estimer leur amplitude en prenant la moitié des différences entre les valeurs de l'expression $F_p - F_f$ avant et après des virages d'environ 180°. On a constaté qu'elles étaient faibles: l'amplitude moyenne de $\delta P\ (H/F) \cos \psi - \delta Q\ (H/F) \sin \psi$ de 24 virages était de 8 nT, et la dispersion était de 7 nT. En outre, on a adopté comme unité le facteur F/Z, ce qui entraîne une erreur de seulement 1 ou 2 nT. Cette dernière erreur est tout à fait acceptable, et elle est en fait beaucoup plus faible que l'erreur moyenne qui résulte si l'on pose: $\delta P = \delta Q = 0$.

La moyenne de plus de 15 000 valeurs de $F_p - F_f$ obtenues au cours du levé, après corrections de compatibilité, était de 0,9 nT et la dispersion était de 6,2 nT.

Il faut signaler que la valeur δR de compatibilité corrige toute erreur de la valeur R_1 d'étalonnage.

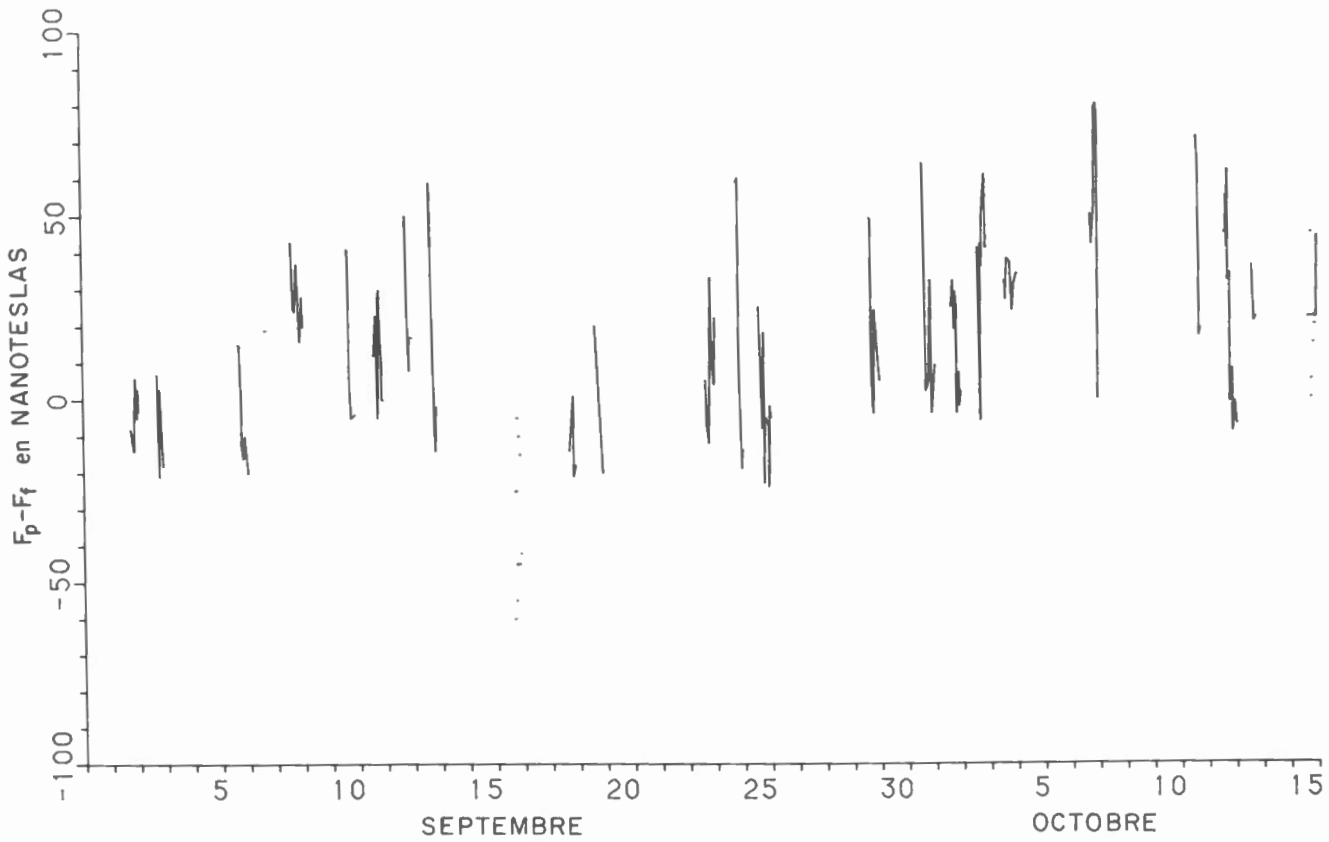

Fig. 6 Tracé de $F_p - F_f$ pour le levé aéromagnétique de 1976. On a adopté pour cette fonction changeante, la correction de compatibilité de Z (δR).

COHÉRENCE DES DONNÉES OBTENUES AVEC LES DEUX MAGNÉTOMÈTRES

Les deux magnétomètres ont donné des mesures distinctes du champ total, le magnétomètre à protons mesurant directement F_p et le magnétomètre à saturation mesurant F_f au moyen de H_f et Z_f.

Étant donné que la mesure de F_p était beaucoup plus exacte que la mesure F_f, on a choisi F_p toutes les fois qu'elle était disponible. De plus, étant donné que F_p a un degré plus élevé d'exactitude et que Z est assez proche de F sur la zone du levé, le calcul de $F_p^2 - H_f^2$ a un degré d'exactitude plus élevé que celui de Z_f. Ce calcul sert en fait de base à la valeur δR de la correction Z de compatibilité. Ainsi, chaque fois que F_p et H_f sont disponibles, le champ vertical (Z_{pf}, par exemple) est calculé à partir de ces valeurs. Cela assure automatiquement la cohérence des données puisque $H_f^2 + Z_{pf}^2 = F_p^2$.

Cependant, lorsque F_p n'est pas disponible, et que F_f l'est, il faut veiller à ce que F_f concorde avec F_p, c'est-à-dire qu'il n'y ait pas de changement de niveau lorsque la valeur de F varie de F_p à F_f. De même, lorsque H_f et F_p ne sont pas disponibles, mais que Z_f l'est, il ne devrait pas y avoir de changement de niveau lorsque Z varie de Z_{pf} à Z_f.

L'élimination de toute différence importante de niveau dans Z et F, puisque les données des deux magnétomètres sont combinées, est accomplie par la valeur δR de la correction de compatibilité de Z. Ainsi, bien que Z_f soit éliminé en faveur de Z_{pf} lorsque H_f, Z_f et F_p sont toutes disponibles, cette valeur est néanmoins utilisée pour déterminer les valeurs de $F_p - F_f$ à partir desquelles on calcule la correction δR en fonction du temps. Cette valeur δR peut alors servir à corriger Z_f lorsque F_p et H_f ne sont pas disponibles. La moyenne de 1 nT et la dispersion de 6 nT des valeurs de $F_p - F_f$ est présumée être une indication des différences finales de niveau entre F_f et F_p, et entre Z_f et Z_{pf}.

Pour le levé, seulement 5% des valeurs finales de F et 14% des valeurs finales de Z ont été obtenues avec le magnétomètre à saturation. Le nombre des moyennes de 30 secondes dans les diverses combinaisons de mesures est le suivant (l'élément dérivé est entre parenthèses):

Combinaison	Nombre de moyennes
Z_f	106
H_f Z_f (F_f)	16
D_f H_f Z_f (F_f)	794
F_p	1 672
D_f H_f F_p (Z_{pf})	105
Z_f F_p	1 371
H_f Z_f F_p (Z_{pf})	54
D_f H_f Z_f F_p (Z_{pf})	13 340
Total	17 458

Les valeurs Z_f dans les deux dernières combinaisons sont remplacées par la valeur Z_{pf} dérivée. Il faut aussi remarquer qu'aucune intensité horizontale n'a été calculée à partir de la combinaison Z_f et F_p, étant donné que l'erreur résultante ne serait pas acceptable.

PRÉSENTATION DES DONNÉES

Haines et Hannaford (1976) ont décrit l'enregistrement de données brutes de 3 secondes, le processus d'édition, et la mise en forme et l'édition des statistiques, par ordinateur, des moyennes prélevées toutes les 30 secondes. Haines et Hannaford (1978) ont décrit la technique et les critères utilisés pour déterminer si le champ est suffisamment perturbé pour justifier le rejet des données. Les moyennes acceptées relatives aux données prélevées toutes les 30 secondes sont finalement corrigées des erreurs d'étalonnage et des champs de l'avion, comme nous l'avons décrit précédemment.

Un polynôme à deux coordonnées spatiales a été appliqué à chacune des trois composantes orthogonales U, V et Z, après réduction des données au niveau de la mer au moyen de la relation avec "l'inverse du cube" (voir par exemple Haines et Hannaford, 1976). Les composantes horizontales U et V sont définies par les équations suivantes:

$$U = H \cos \left[D - (\lambda - \lambda_o)\right] \qquad 42$$

$$V = H \sin \left[D - (\lambda - \lambda_o)\right] \qquad 43$$

où λ est la longitude géographique Est et λ_o est un angle de rotation de la carte, qui a été fixé à -180° pour ce levé.

Les erreurs types d'estimation de l'ajustement par les moindres carrés aux polynômes du 1er, du 2e, du 3e et du

4e degrés, et aux polynômes adoptés du 3e degré avec uniquement les termes significatifs, sont données au tableau I.

Les coefficients des polynômes adoptés du 3e degré sont donnés au tableau II. Les définitions des coordonnées spatiales et les composantes U, V et Z, ainsi que les formules établissant la relation entre U et V et les composantes plus familières, D, H, X et Y sont aussi données dans ce tableau.

Une comparaison du champ géomagnétique international de référence (International Geomagnetic Reference Field) avec le champ du polynôme du 3e degré du tableau II est donnée à la figure 7. Il existe de grandes inexactitudes du champ géomagnétique international de référence sur la zone couverte, comme il y en a à propos des aires couvertes par les précédents levés (Haines et Hannaford, 1972, 1974, 1976 et 1978).

Les tracés des valeurs résiduelles du champ géomagnétique international de référence sur une demi-minute pour D, H, Z, X, Y, et F sont donnés aux figures 8 à 13. Une valeur résiduelle est une moyenne sur une demi-minute (corrigée des erreurs d'étalonnage et des champs permanents de l'avion) de laquelle on soustrait la valeur correspondante du champ géomagnétique international de référence pour 1976.7 à l'altitude d'observation. Les valeurs résiduelles, représentées par les courtes lignes reliant le profil à la ligne de vol, sont tracées perpendiculairement à la ligne de vol, les valeurs résiduelles positives se trouvant dans le demi-plan supérieur droit, les valeurs négatives dans le demi-plan inférieur gauche (voir l'échelle circulaire dans le cartouche: le demi-cercle quadrillé délimite l'aire contenant les valeurs résiduelles positives). En raison de la réduction d'échelle requise pour la publication sur une page, seule une valeur résiduelle sur deux a été reliée à la ligne de vol.

Les tracés ont été entièrement produits par ordinateur, à l'échelle de 1/5 000 000. Les données représentant les côtes ne sont pas précises (à certains endroits, l'erreur est de 35 km) et il faudrait donc localiser les anomalies en utilisant le quadrillage de la latitude et de la longitude au lieu des côtes.

TABLEAU I

Erreurs-types en nanoteslas des champs négatifs observés des polynômes du 1er, du 2e, du 3e et du 4e degrés, et du polynôme adopté du 3e degré avec uniquement les termes significatifs (indiqués par 3 sig). La colonne des coefficients donne le nombre total de coefficients dans les trois polynômes. Taille de l'échantillon: 1424 pour U et V, 1577 pour Z.

Degré	Coefficients	U	V	Z
1	9	235.7	277.4	604.5
2	18	141.9	175.9	166.0
3	30	140.7	164.1	158.1
4	45	139.9	163.7	155.9
3 sig	26	140.7	164.3	158.1

TABLEAU II

Champ de référence du polynôme du 3e degré en nanoteslas en 1976.7 au niveau de la mer.

$U = \Sigma u_i x_i \qquad V = \Sigma v_i x_i \qquad Z = \Sigma z_i x_i$

$a = -K \tan(\theta/2) \cos(\lambda - \lambda_o) - a_o$
$b = K \tan(\theta/2) \sin(\lambda - \lambda_o) - b_o$

θ = colatitude
λ = east longitude
K = 100.
λ_o = -180°
a_o = 17.2
b_o = 27.6

$D = \arctan(V/U) + (\lambda - \lambda_o)$
$H = (U^2 + V^2)^{1/2}$
$X = U \cos(\lambda - \lambda_o) - V \sin(\lambda - \lambda_o)$
$Y = U \sin(\lambda - \lambda_o) + V \cos(\lambda - \lambda_o)$

i	x_i	u_i	v_i	z_i
1	1	-12574.51	-6424.86	54688.41
2	a	-579.841	5.846	-570.272
3	b	-48.080	-547.847	-3.265
4	a^2	5.8275	-1.7265	-9.6514
5	ab	-5.3429	8.6736	-5.6998
6	b^2	4.1649	-6.9881	-12.8409
7	a^3			.09716
8	a^2b	.08556		-.21247
9	ab^2	.08318		.39113
10	b^3	.05327	.32415	-.18687

Nota: Les coefficients qui n'étaient pas significatifs statistiquement sont laissés en blanc, et on leur a donné la valeur zéro.

REMERCIEMENTS

Les auteurs désirent remercier la Conair Aviation Ltd. pour sa collaboration au levé, et ils désirent en particulier faire mention de l'aide que leur ont accordé les capitaines D. Maclagan et A. Melhof et le navigateur A. Lyon.

Les scientifiques du levé aéroporté comprenaient F. Andersen, G. Carr, R. Charbonneau et W. Hannaford du personnel de la Direction de la physique du globe. Une station de répétition située à Rosaire (Québec) a été opérée par G. Massie et L. Newitt au début du levé, et par E. Berndt et M. Gervais à la fin du levé.

G. Jansen van Beek et E. Loomer ont fourni les valeurs mesurées par l'observatoire d'Ottawa pour le contrôle des valeurs de Rosaire, et les magnétogrammes utilisés pour la vérification des perturbations magnétiques pendant le levé.

R.L. Coles a aidé à déterminer les intervalles de temps perturbés magnétiquement afin d'éliminer certaines données.

Les auteurs désirent remercier MM. R.L. Coles et P.H. Serson pour leur examen du manuscrit.

RÉFÉRENCES

Haines, G.V. and W. Hannaford, 1972. Magnetic anomaly maps of British Columbia and the adjacent Pacific Ocean. Pub. Earth Phys. Br., Vol. 42, No. 7, pp. 211-228.

Haines, G.V. and W. Hannaford, 1974. A three-component aeromagnetic survey of the Canadian Arctic. Pub. Earth Phys. Br., Vol. 44, No. 8, pp. 209-234.

Haines, G.V. and W. Hannaford, 1976. A three-component aeromagnetic survey of Saskatchewan, Alberta, Yukon and the District of Mackenzie. Geomagnetic Service of Canada, Geomag. Series No. 8, 34 p.

Haines, G.V. and W. Hannaford, 1978. A three-component aeromagnetic survey of central Canada. Geomagnetic Service of Canada, Geomag. Series No. 13, 28 p.

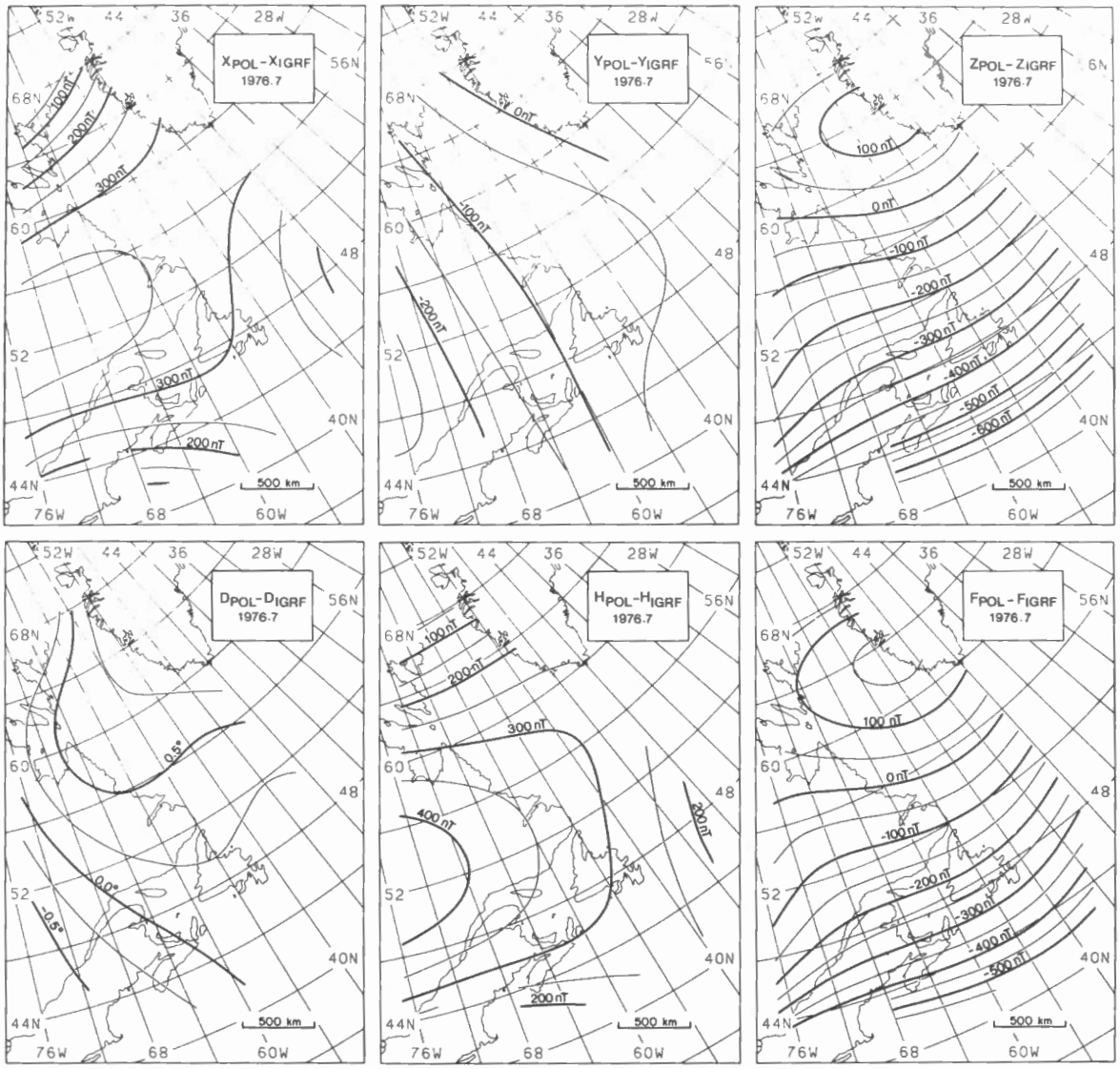

Fig. 7 Comparaison du champ géomagnétique international de référence (IGRF) avec le polynôme adopté du 3e degré (POL).

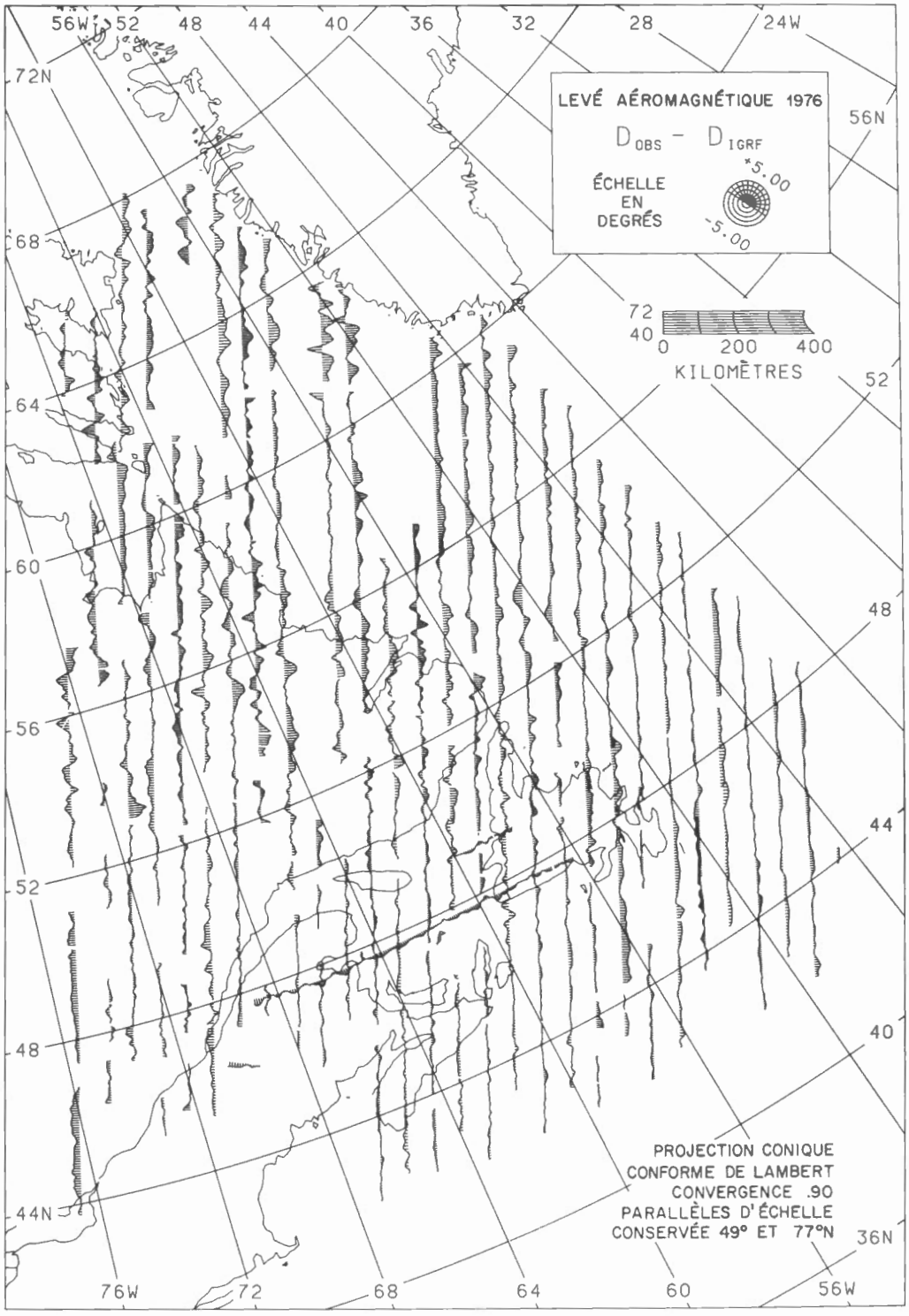

Fig. 8

Profils résiduels de la déclinaison D, par rapport au champ géomatique international de référence (IGRF) en 1976.7. Les valeurs résiduelles sont des moyennes sur une demi-minute (corrigées des erreurs d'étalonnage et des champs de l'avion) desquelles on a soustrait les valeurs correspondantes de l'IGRF pour 1976.7 à l'altitude d'observation. Les valeurs résiduelles sont tracées perpendiculairement à la ligne de vol, les valeurs résiduelles positives se trouvant dans le demi-plan supérieur droit (zone quadrillée de l'échelle circulaire) et les valeurs négatives se trouvent dans le demi-plan inférieur gauche. Seule une valeur résiduelle sur deux est reliée à la ligne de vol. Les tracés des valeurs résiduelles ont été entièrement produits par ordinateur, et les côtes manquent d'exactitude à certains endroits. Par conséquent, il faudrait localiser les anomalies en se référant au quadrillage de la latitude et de la longitude.

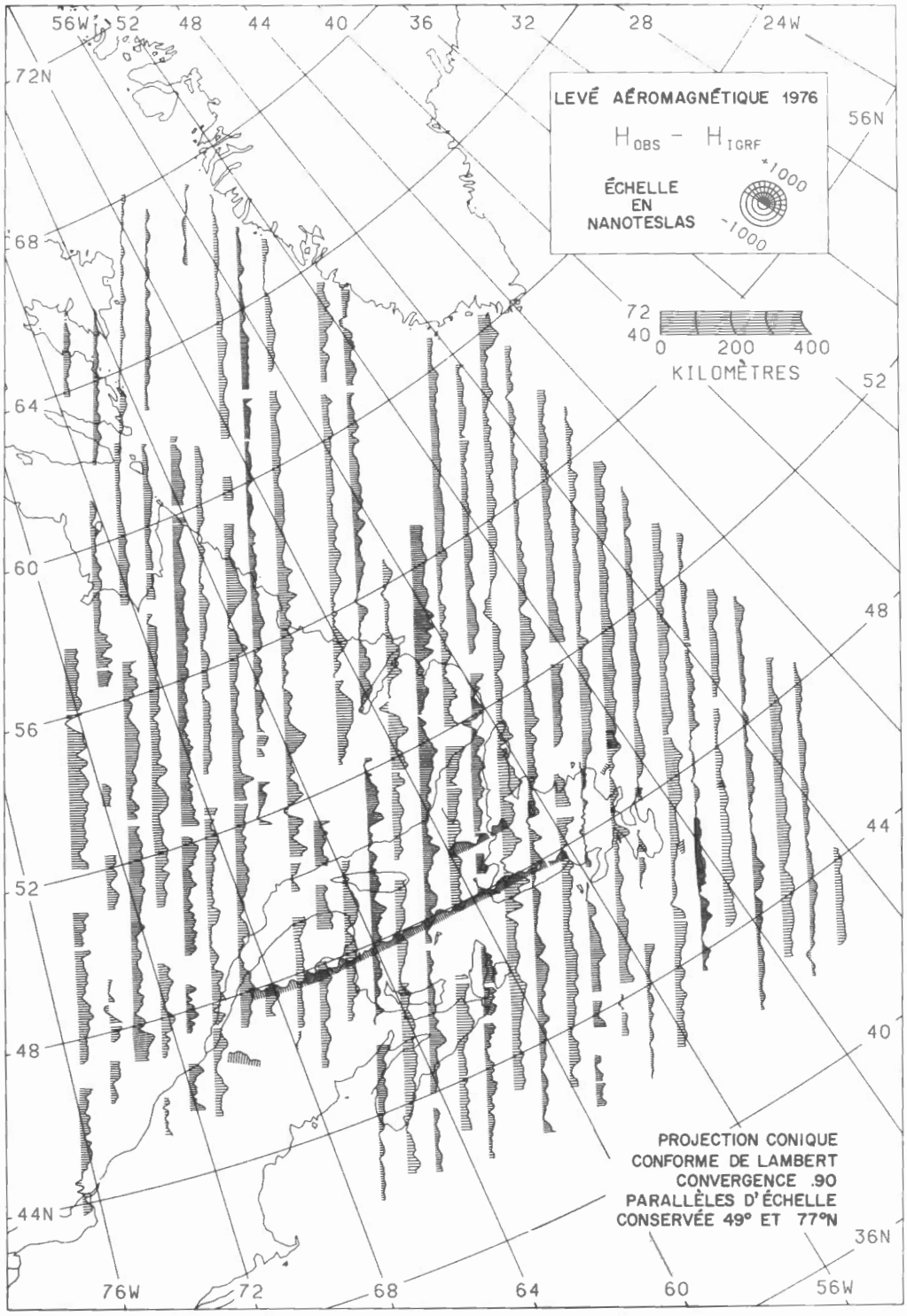

Fig. 9 Profils des valeurs résiduelles de l'intensité horizontale H, par rapport au champ géomagnétique international de référence en 1976.7.

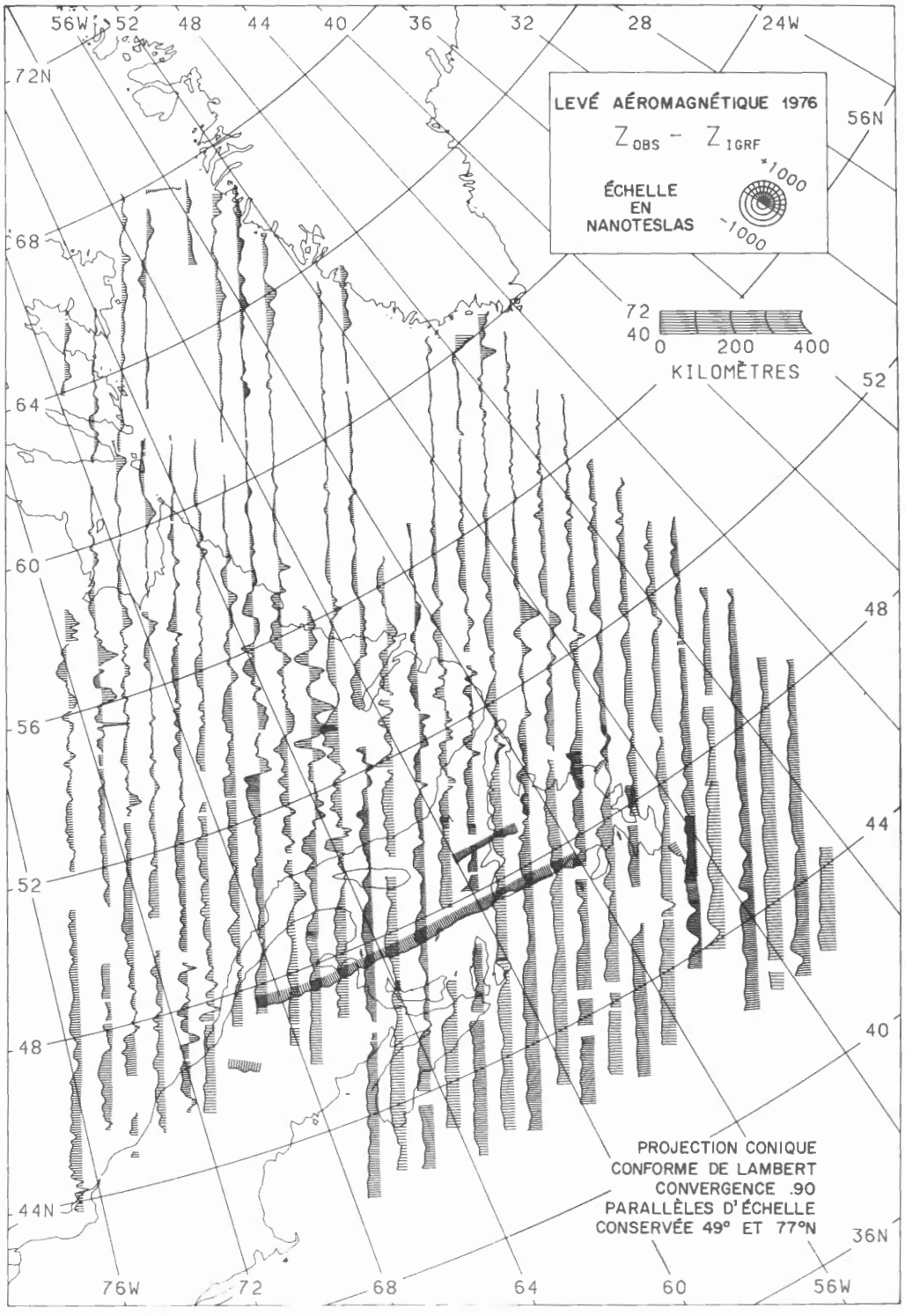

Fig. 10 Profils des valeurs résiduelles de l'intensité verticale Z, par rapport au champ géomagnétique international de référence en 1976.7.

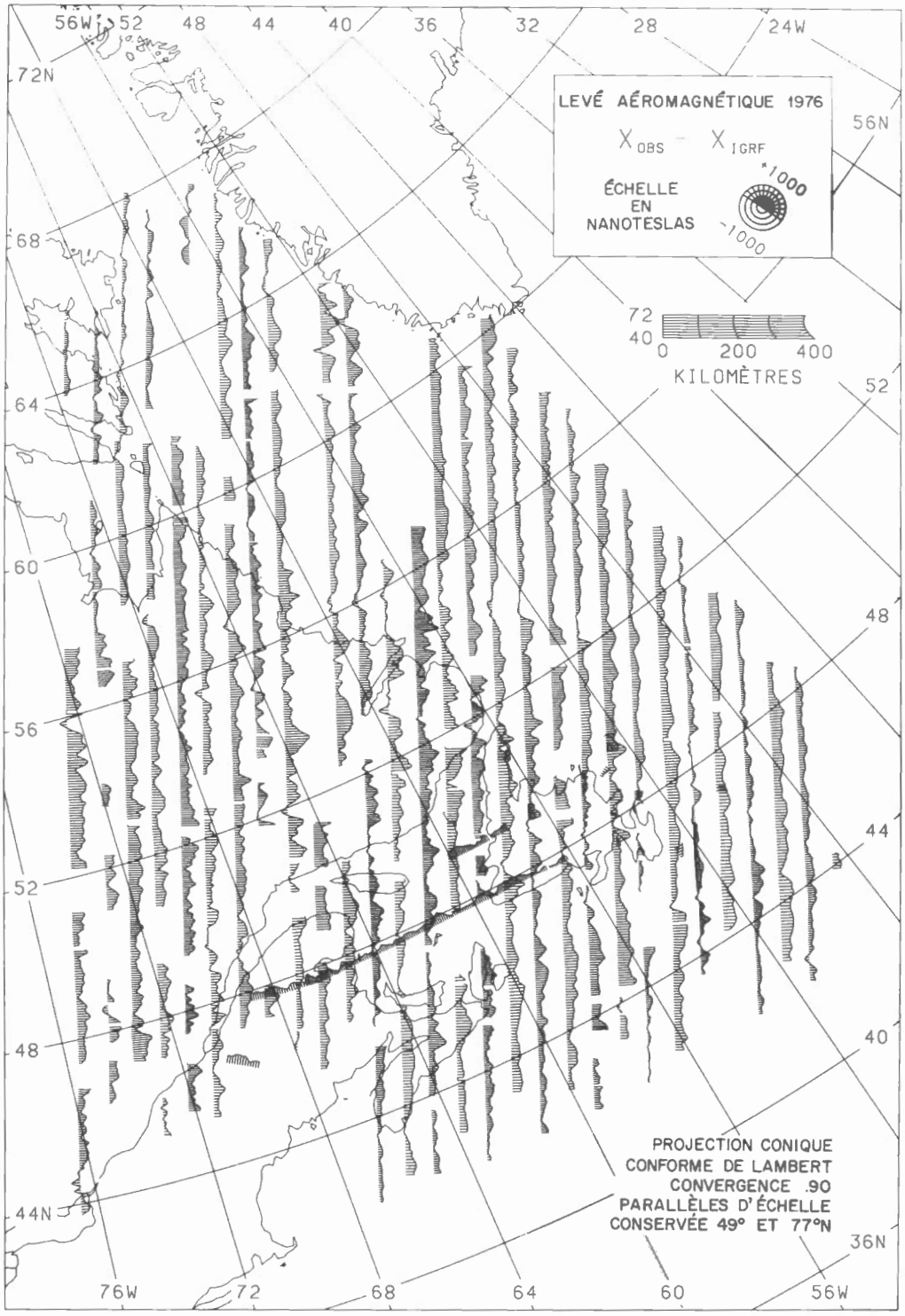

Fig. 11 Profils des valeurs résiduelles de la composante X du nord géographique, par rapport au champ géomagnétique international de référence en 1976.7.

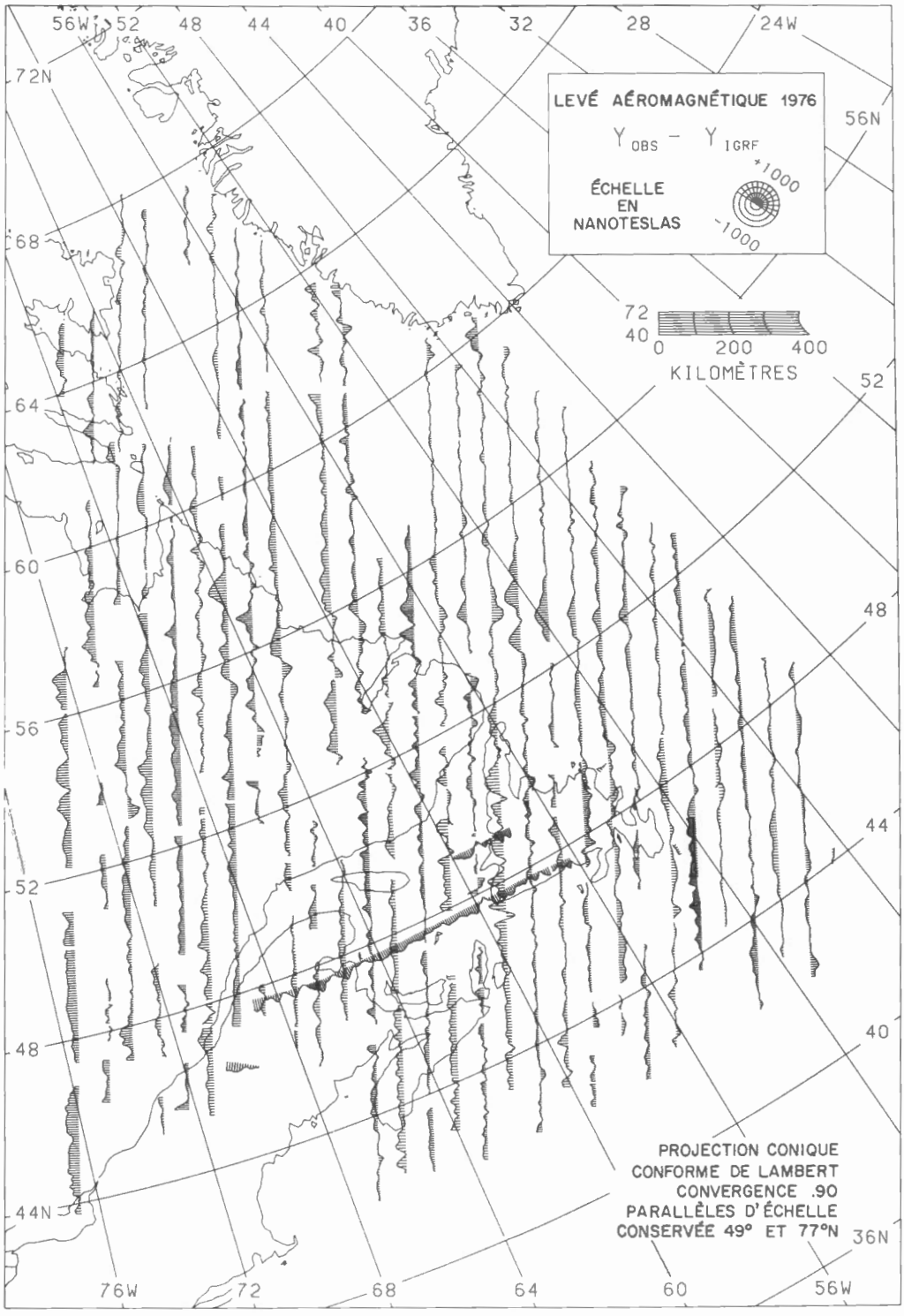

Fig. 12 Profils des valeurs résiduelles de la composante Y de l'Est géographique, par rapport au champ géomagnétique international de référence en 1976.7.

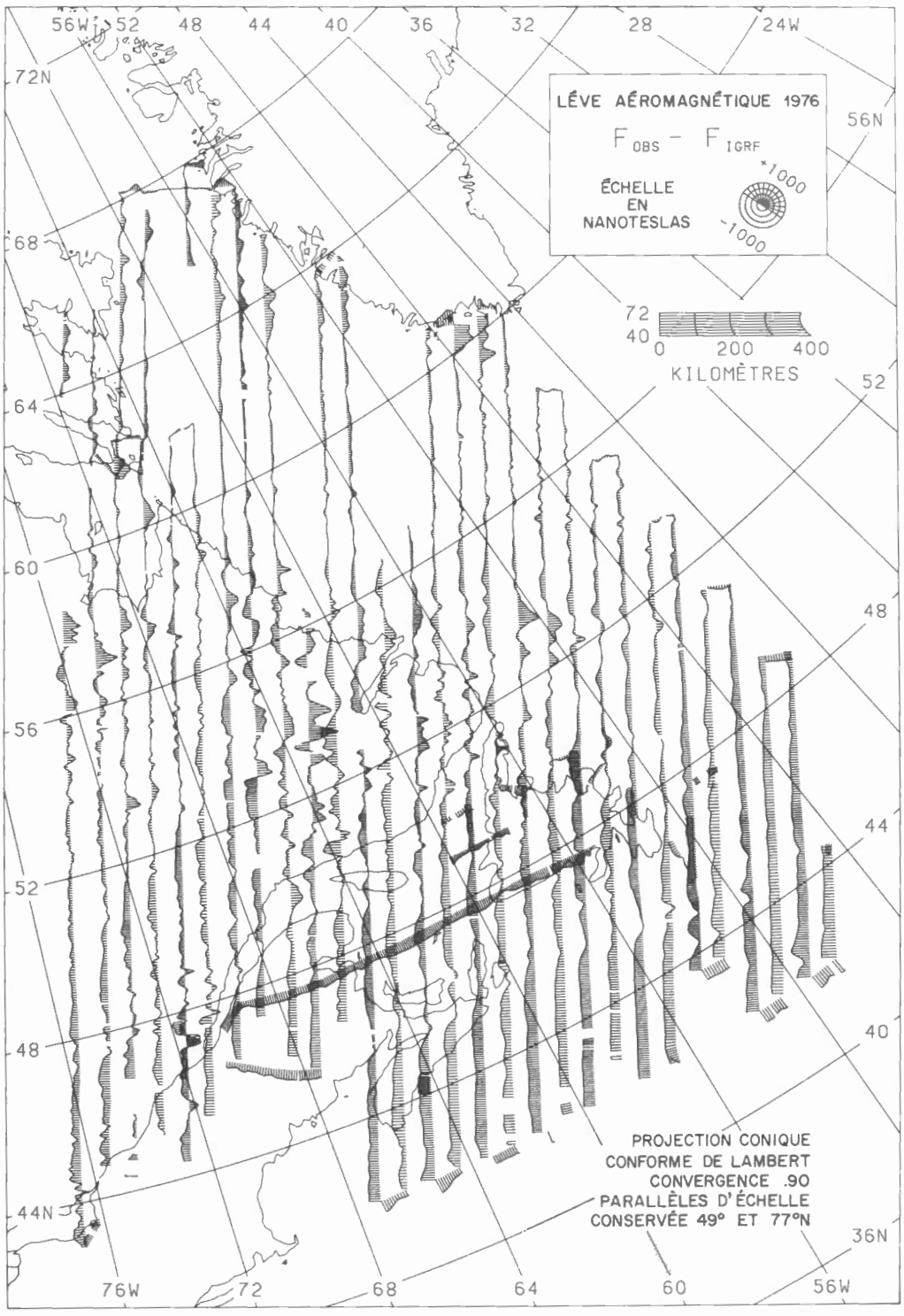

Fig. 13 Profils des valeurs résiduelles de l'intensité totale F, par rapport au champ magnétique international de référence en 1976.7.