

Résumé : Cette note présente les résultats de la campagne de mesures de 1977 faite dans les stations du réseau magnétique de répétition de la France. Les résultats sont consignés dans deux tableaux (valeurs absolues des éléments du champ dans les stations en 1977,5) et un jeu de figures (variation séculaire des éléments entre 1972,5 et 1977,5). On note, comme pour les campagnes précédentes, que les résultats obtenus s'insèrent très bien dans l'ensemble des valeurs fournies par les observatoires européens. Cependant, l'écart est considérable entre ces observations et les prédictions d'un modèle comme l'IGRF 1975 (référence 5). En particulier, on constate une forte accélération de la déclinaison. Par ailleurs, une anomalie probable de variation séculaire est mise en évidence dans le Sud-ouest de la France.

OBSERVATIONS MAGNETIQUES - Fascicule n° 35
RESEAU MAGNETIQUE DE REPETITION DE LA FRANCE METROPOLITAINE

RESULTATS DE LA CAMPAGNE 1977

par

V. COURTILLOT, J.L. LE MOUEL et B. LEPRETRE

Les stations magnétiques françaises de répétition ont été réoccupées entre le 1er Août et le 21 octobre 1977 (à l'exception d'Auverse : 27-28 Juin, et Marle : 10-12 Décembre), soit cinq années après la campagne précédente (1,2). Les résultats des mesures ont été rapportés à l'époque 1977,5.

I EXECUTION DES MESURES

Les mesures ont été effectuées par V. COURTILLOT, J.L. LE MOUEL et B. LEPRETRE en appliquant le mode opératoire adopté en 1965 à l'occasion de la participation française au Levé Magnétique Mondial (3). On a mesuré :

- la déclinaison, D, au moyen de deux théodolites magnétiques "Chasselon"
- la composante horizontale, H, au moyen de quatre Q.H.M. "La Cour"
- l'intensité du champ total, F, au moyen d'un magnétomètre à protons "Elsec" et d'un magnétomètre à protons "Geometrics".

A - Contrôle des appareils à l'Observatoire de Chambon-la-Forêt

Théodolites - En principe, les erreurs provoquées par les défauts de construction du théodolite sont éliminées par le jeu des opérations combinées dans une série complète de mesures. Cependant, ces opérations ne corrigent pas les erreurs qui pourraient provenir du fait que les matériaux utilisés dans la construction de l'appareil ne sont pas suffisamment amagnétiques. Des mesures de la déclinaison ont été effectuées sur le pilier de mesures absolues à l'aide des théodolites n°66001 et 65611 utilisés pendant la campagne; Elles n'ont pas mis en évidence de différence appréciable entre les valeurs de D déduites de ces mesures et les valeurs simultanées de D déduites des enregistrements de l'observatoire.

Figure 1 : Comparaisons des appareils utilisés avec les étalons de Chambon-la-Forêt (l'axe des abscisses représente le temps du 1.5.77 au 1.1.78). Les périodes de mesure sont indiquées en grisé et les comparaisons à Chambon par des étoiles. Les valeurs des corrections retenues pour chaque période et chaque instrument sont indiquées dans les bandes grisées. Pour le magnétomètre Geometrics G816 n° 5107 on a retenu la valeur de 4,0 γ .

Figure 1 : Comparisons between the instruments used during the survey and the Chambon-la-Forêt standards (the abscissae axis shows time from 5.1.77 to 1.1.78). Measurement periods are shown in gray and comparisons made in Chambon are shown as stars. The correction values which have been used in reducing the data are given for each period and each instrument in the gray bands. A value of 4.0 γ was chosen for the Geometrics G816 magnetometer.

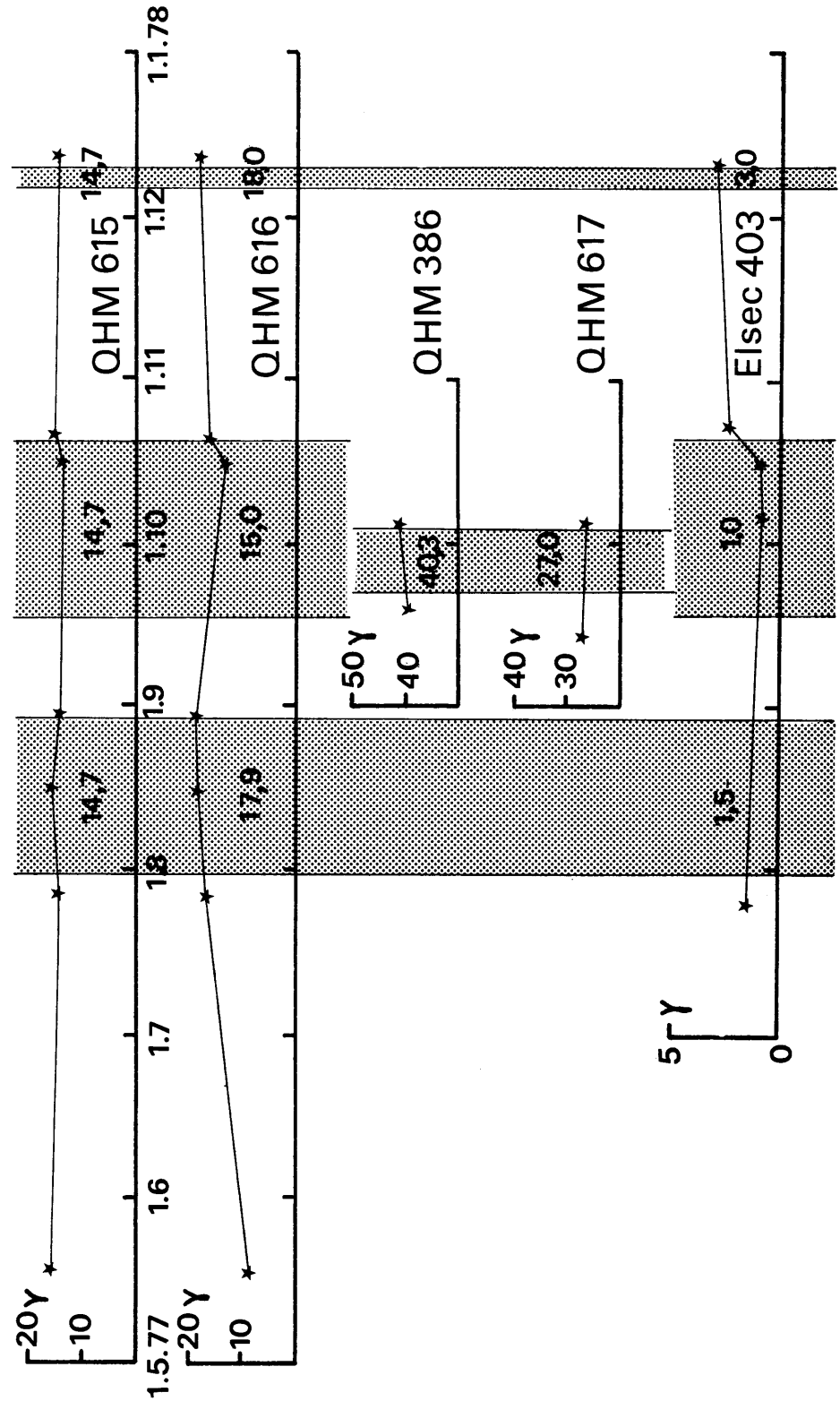


Figure 1 : Comparaisons avec les étalons de Chambon-la-Forêt

Magnétomètres à protons - Nous avons comparé les magnétomètres Elsec n° 403 et Geometrics G816 n° 5107 à l'étalon de l'Observatoire (magnétomètre Elsec n° 413). Les résultats de ces comparaisons sont consignés dans le tableau I a. Nous avons également vérifié que les valeurs fournies par ces magnétomètres sont indépendantes de l'orientation de l'axe de la sonde dans le plan horizontal.

TABLEAU I a Différences Magnétomètres à protons - Etalon de Chambon
(Elsec n°413)

<u>dates</u>	<u>Elsec n°403</u>	<u>Geometrics G816 n°5107</u>
26 juillet 1977	1,7 γ	-
18 août 1977	-	3,9 γ
6 octobre 1977	1,0 γ	-
16 octobre 1977	1,4 γ	4,4 γ
24 octobre 1977	2,5 γ	3,7 γ
12 décembre 1977	3,0 γ	-

Q.H.M. - Les QHM utilisés n° 386, 615, 616 et 617, ont été comparés à Chambon-la-Forêt avant, pendant et après la campagne. Les résultats de ces comparaisons sont consignés dans le tableau I b. Les corrections apportées aux mesures faites par les différents appareils aux différentes étapes de la campagne sont reportées sur la figure 1.

TABLEAU I b Différences QHM - Etalon de Chambon

<u>dates</u>	<u>QHM 615</u>	<u>QHM 616</u>	<u>QHM 617</u>	<u>QHM 386</u>
18 mai 1977	15,5 γ	9,0 γ		
27 juillet 1977	14,4 γ	17,0 γ		
16 août 1977	15,7 γ	18,2 γ		
30 août 1977	14,0 γ	18,6 γ		
14 septembre 1977	-	-	27,2 γ	-
19 septembre 1977	-	-	-	39,6 γ
5 octobre 1977	-	-	26,7 γ	41,0 γ
16 octobre 1977	13,7 γ	13,3 γ		
21 octobre 1977	14,9 γ	16,2 γ		
12 décembre 1977	14,4 γ	18,1 γ		

B - Exécution des mesures sur le terrain

Dans chaque station, on commence par vérifier qu'il n'y a pas de corps perturbateur au voisinage de la borne; pour celà, on procède à une prospection rapide au moyen du magnétomètre à protons.

Les mesures proprement dites comportent au moins (sauf exception) deux ensembles de détermination (D, H, F) répartis dans la journée de manière à limiter au mieux les erreurs entraînées par la réduction, c'est-à-dire en s'efforçant de placer les observations en dehors de la partie principale de la variation solaire: on effectue un ensemble de mesures assez tôt dans la matinée et un autre ensemble de mesures assez tard dans l'après-midi.

Chaque ensemble de déterminations comprend :

1°) - F - Une série de 30 lectures, espacées de 10 secondes, sur le magnétomètre à protons dont la sonde est placée au-dessus de la borne à la hauteur de l'aimant du théodolite ou du QHM. La sonde du magnétomètre est ensuite installée en un point auxiliaire P situé à une quinzaine de mètres de la borne. Des lectures effectuées périodiquement sur le magnétomètre permettent ainsi de suivre, sur place, l'évolution de la situation magnétique; en outre, un rattachement entre la borne et la station auxiliaire P permet d'utiliser aussi ces lectures pour la détermination de F sur la borne.

2°) - D - Une série de 2 mesures complètes de D.

3°) - H - Une série de 8 mesures complètes de H, 4 mesures avec chacun des deux QHM.

4°) - F - Une nouvelle série de 30 lectures sur le magnétomètre à protons dont la sonde a été ramenée au-dessus de la borne.

C - Etat du réseau. Création d'une nouvelle station

Lors de la campagne 1977 nous avons constaté une dégradation parfois assez importante des points repérés du réseau.

D'une part, à proximité (moins de 25 mètres) de la borne de Salon-la-Tour a été construite en 1973 une réserve d'eau en béton armé dont l'effet magnétique est considérable (plus de 100 γ sur la composante horizontale à l'aplomb de la borne). Une nouvelle station sera créée dans son voisinage dès que possible. D'autre part, une antenne haubannée de télécommunication a été construite à 25 m de la borne de Rieupeyroux. L'un des fers en I qui retiennent les haubans est fixé dans un socle de béton à 13 m de la borne. Un profil de mesures de F, de la base de ce hauban à la borne, montre que le gradient de l'anomalie est, à l'aplomb de la borne, de 3 γ / m et permet

d'estimer que l'effet permanent engendré par la construction est inférieur à 10γ . A Bionville, une prospection détaillée a montré l'existence d'une anomalie à proximité de la borne. Un bloc de béton armé enterré a été découvert et malencontreusement extrait. Il est certain que ce bloc était présent lors des campagnes précédentes.

La variation séculaire entre 1972,5 et 1977,5 ne peut donc être évaluée à Salon-la-Tour; sa mesure est entachée d'une erreur supplémentaire (voir le paragraphe "Discussion des résultats") vraisemblablement inférieure à 10γ sur toutes les composantes à Rieuepeyroux et à Bionville.

A Marle la borne était enterrée profondément et n'a été retrouvée qu'avec beaucoup de difficultés. Une équipe de l'IGN a pu depuis se rendre sur place et créer une nouvelle borne qui sera rattachée à l'ancienne borne en 1978.

Enfin, un certain nombre de bornes sont en danger à des titres divers : Biguglia (où une ligne à haute tension rend depuis quinze ans les mesures de F impossibles), Bonifacio (où le rayonnement d'un sémaphore rend ces mesures difficiles), Calenzana et Quinzana (où la borne n'est toujours marquée que par un pieux de bois entouré d'un cairn de pierre), Séglien (borne effritée en très mauvais état), Maisons-les-Soulaines (borne au bord d'un fossé en danger d'être déchaussée), Neufchâtel (le haut de la borne est détruit), Villeneuve de Marc (le pilier de mesures magnétiques est détruit, on peut le rattacher à une borne IGN proche; il faut cependant noter le projet de construction d'un château d'eau à proximité), Clarens et Nuret-le-Ferron (où les bornes sont renversées et à remettre en place), Ploudalmézeau et Léon (où les bornes sont enterrées et leur accès non protégé).

L'état du réseau montre qu'il est urgent de prendre des mesures conservatoires, de reconstruire certaines bornes, de mieux les protéger, enfin d'être informés à temps de tout projet de construction à proximité susceptible d'altérer la "propreté" magnétique du site. Une action en commun avec l'Institut Géographique National est envisagée dès 1978.

Signalons que, pour augmenter la densité insuffisante du réseau dans la région alpine, une station a été créée au cours de la campagne 1977 à proximité d'Ailefroide (Hautes-Alpes). Ce nom a été retenu pour la station magnétique dont les coordonnées sont les suivantes :

Point géodésique de Pelvoux II - le Sapet (Ailefroide)
 Feuille de St Christophe-en-Oisans XXXIV - 36, édition mars 1977
 Coordonnées : $\lambda = 6^{\circ}26'38''$ EG $\phi = 44^{\circ}53'02''$ altitude 1513 m
 Lambert III : X = 924.319,58 Y = 295.187,82
 Point situé à 600 m au Sud d'Ailefroide
 Borne en granit gravée : IGN
 Repère : Sommet "Le Sablier" ou "Tête des Lauzières" (alt. 2 928 m)
 Feuille de Briançon XXV - 36, Point n°215
 Azimut : $99^{\circ}29'08''$.

D - Réduction des observations

Les déterminations effectuées dans les stations durant la campagne 1977 ont été ramenées à l'époque 1977,5 (1 juillet 1977) à l'aide des données de l'Observatoire de Chambon-la-Forêt.

On sait que cette "réduction des observations" est basée sur l'hypothèse que l'écart entre la valeur instantanée d'un élément E et sa valeur moyenne annuelle centrée sur cet instant a la même valeur à la station S et à l'observatoire voisin O.

- Soit $E_{S,t}$ la valeur observée de l'élément E, à la station S,
- $E_{O,t}$ la valeur observée du même élément, au même instant, à l'observatoire O,
- $\bar{E}_{S,t}$ la valeur moyenne de l'élément E à la station S pour une année centrée sur l'époque t,
- $\bar{E}_{O,t}$ la valeur moyenne de l'élément E à l'observatoire pour une année centrée sur l'époque t.

On admet donc que :

$$E_{S,t} - \bar{E}_{S,t} = E_{O,t} - \bar{E}_{O,t}$$

La valeur moyenne au 1er juillet 1977, $\bar{E}_{S,1977,5}$, s'obtient ensuite en admettant, en outre, que la "variation séculaire" de l'élément entre l'époque t et le 1er juillet à la station S, ΔE_S , est la même que la "variation séculaire" de cet élément à l'observatoire O, ΔE_O . On a donc finalement :

$$\bar{E}_{S,1977,5} = \bar{E}_{O,1977,5} + (E_{S,t} - E_{O,t})$$

A chaque station S, nous disposons pour chacun des éléments D, H, F de plusieurs séries de valeurs réparties sur différentes heures d'un même jour ou de deux jours consécutifs. Nous obtenons ainsi, pour chaque élément, plusieurs valeurs de la différence $E_{S,t} - E_{O,t}$ du fait de l'incertitude expérimentale qui affecte chacune des valeurs $E_{S,t}$ et $E_{O,t}$, d'une part, et de la non uniformité des variations transitoires sur l'étendue du territoire, d'autre part. Pour déterminer la valeur définitivement attribuée à la différence $E_{S,t} - E_{O,t}$, nous avons procédé de la manière suivante.

On commence par reporter sur les magnétogrammes La Cour de Chambon-la-Forêt les intervalles de temps correspondant aux mesures de D et de H. Après examen de la situation magnétique correspondant à chaque mesure, on accorde un poids variable à chacune des déterminations selon que la situation magnétique est plus ou moins calme et selon que le niveau de l'élément considéré est plus ou moins voisin du niveau stationnaire de nuit à l'instant de la mesure. On obtient ainsi les différences $E_{S,t} - E_{O,t}$ pour les éléments D et H.

En ce qui concerne l'intensité F, on n'a pu, par suite d'un incident de fonctionnement, procéder comme en 1972 en faisant appel à l'enregistrement continu de F fourni par le magnétomètre à protons Sud-Aviation de l'Observatoire. On a donc procédé comme pour les mesures de D et de H en reportant sur les magnétogrammes La Cour de Chambon-la-Forêt (composantes H et Z) les intervalles de temps correspondant aux mesures de F.

Il suffit, en principe, d'ajouter à la différence $E_{S,t} - E_{O,t}$ la valeur moyenne de l'élément E à l'observatoire pendant l'année 1977 pour obtenir la valeur moyenne de l'élément E à la station pendant l'année 1977; la validité de cette réduction sera examinée au cours de la discussion.

II PRESENTATION DES RESULTATS

Nous avons adopté la présentation préconisée par le Manuel d'opérations pour le Levé Magnétique Mondial (4). Les valeurs relatives aux premières stations de répétition, créées en 1947, sont rassemblées dans le tableau II et les valeurs relatives aux stations complémentaires, créées à partir de 1965, dans le tableau III. (D'après le Manuel, la précision estimée de l'instrument est caractérisée par le symbole "c" quand il s'agit d'appareils classiques tels que le théodolite magnétique ou le QHM).

TABLEAU II

Pays : FRANCE - Stations de répétition			
Service responsable : Institut de Physique du Globe de Paris			
D	F	H	
Théodolite Chasselon	Magnétomètre à protons	QHM	
Comparaisons effectuées à Chambon-la-Forêt			
Précision	"c"	I gamma	"c"

REDUCTION DES OBSERVATIONS

Toutes les mesures de D, H et F ont été réduites
à l'aide des données de l'observatoire de
Chambon-la-Forêt

Epoque - 1977,5

(Les observations précédentes ont été effectuées
en 1972)

Code	Station	Latitude	Longitude	Date	-D	F	H	Z	I	Alt. (m)
CLF	CHAMBON-LA- FORET	45 48°01'4	2°15'6 _E		4°46'9	46941	20798	42082	63°42'0	145
BIG	BIGUGLIA	20 42°37'1	9°25'4 _E	18 et 19.09.77	1°30'6	-	23666	-	-	100
BON	BONIFACIO	20 41°22'2	9°10'3 _E	20 au 22.09.77	1°35'0	45082	24433	37887	57°10'9	20
BIO	BIONVILLE	57 49°06'5	6°29'6 _E	27 et 28.09.77	3°13'6	47253	20299	42671	64°33'6	280
DRA	DRAGUIGNAN	83 43°33'9	6°24'6 _E	10.08.77	2°35'5	45549	23154	39225	59°26'8	450
FRA	FRANGY	71 46°43'5	5°18'9 _E	04.08.77	3°21'8	46538	21547	41250	62°25'2	193
GAR	GARCHY	58 47°17'5	3°04'3 _E	02 et 03.08.77	4°38'3	46617	21234	41501	62°54'2	190
LEO	LEON	40 43°54'2	1°18'7 _W	21 et 22.08.77	5°38'9	45423	22952	39198	59°39'0	6

TABLEAU II (suite)

Code	Station	Latitude	Longitude	Date	-D	F	H	Z	I	Alt. (m)
MAR	MARLE	02 49°45'0	3°54'1 _E	09 et 10.12.77	4°08'9	47454	20036	43017	65°01'5	165
MIG	MIGRE	17 46°05'7	0°34'4 _W	19 et 20.10.77	5°38'5	46197	21826	40716	61°48'4	80
NAN	NANTES	44 47°14'8	1°33'6 _W	21.10.77	6°04'7	46533	21219	41413	62°52'2	35
NEU	NEUFCHATEL	76 49°47'8	1°30'7 _E	22.09.77	5°19'3	47359	19914	42969	65°08'1	230
RIE	RIEUFYROUX	12 44°18'0	2°13'9 _E	26 et 27.08.77	4°16'0	45633	22777	39542	60°03'4	800
SEG	SEGLIEN	56 48°05'3	3°11'1 _W	07 et 08.10.77	7°06'6	46822	20786	41956	63°38'7	226
TUC	TUCHAN	11 42°52'5	2°45'6 _E	25.08.77	3°57'4	45178	23557	38551	58°34'4	313
VIL	VILLENEUVE DE MARC	38 45°27'8	5°08'8 _E	06 et 07.08.77	3°21'4	46124	22187	40437	61°14'8	480

TABLEAU III

Pays : FRANCE - Stations de répétition complémentaires			
Service responsable : Institut de Physique du Globe de Paris			
Instrument	D	F	H
	Théodolite Chasselon à protons		Magnétomètre QHM
Comparaisons effectuées à Chambon-la-Forêt			
Précision	"c"	l gamma	"c"

REDUCTION DES OBSERVATIONS

Toutes les mesures de D, H et F ont été réduites à l'aide des données de l'observatoire de Chambon-la-Forêt

Epoque - 1977,5

(Les observations précédentes ont été effectuées en 1972)

Code	Station	Latitude	Longitude	Date	-D	F	H	Z	I	Alt. (m)
AIL	AILEFROIDE	05 44°53'0	6°26'6 _E	08 et 09.08.77	2°49'6	45454	21494	40050	61°46'7	1513
AUV	AUVERSE	49 47°29'4	0°04'6 _E	27 et 28.06.77	5°23'1	46680	21026	41676	63°13'7	86
CAL	CALENZANA	20 42°31'2	8°52'2 _E	24.09.77	1°53'0	45260	23758	38524	58°20'3	280
CLA	CLARENS	65 43°09'3	0°24'3 _E	23 et 24.08.77	4°52'4	45212	23348	38717	58°54'5	563
CLC	CLARENSAC	30 43°50'3	4°14'0 _E	11 et 12.08.77	3°32'7	45559	23052	39296	59°36'2	207
DEL	DELETTES	62 50°35'8	2°13'9 _E	23 et 24.09.77	5°04'7	47626	19549	43429	65°46'0	131
HAG	HAGENBACH	68 47°38'4	7°09'2 _E	02.10.77	2°46'2	46914	21065	41919	63°19'2	318
LAM	LA MEURDRAQUIERE	50 48°51'2	1°24'7 _W	12 et 13.10.77	6°26'4	47091	20394	42446	64°20'2	125

TABLEAU III (suite)

Code	Station	Latitude	Longitude	Date	-D	F	H	Z	I	Alt. (m)
LEF	LE FAVRIL	27 49°10'8	0°31'1 _E	20 et 21.09.77	5°28'4	47232	20290	42651	64°33'5	173
LEM	LE MONESTIER	63 45°40'8	3°35'9 _E	13 et 14.08.77	3°58'3	46176	22067	40562	61°27'2	634
MAI	MAISONS-LES SOULAINES	10 48°17'8	4°46'4 _E	04.10.77	3°47'7	47055	20776	42220	63°47'9	280
MAH	MARLENHEIM	67 48°37'8	7°28'9 _E	30.09.77	2°54'2	47294	20575	42584	64°12'7	359
NUR	NURET-LE-FERRON	36 46°40'4	1°23'4 _E	17.10.77	4°47'2	46480	21562	41176	62°21'6	172
PLO	PLOUDAL-MEZEAU	29 48°30'6	4°38'8 _W	10 et 11.10.77	7°48'1	46965	20567	42222	64°01'7	66
QUI	QUINZENA	20 42°06'6	9°19'9 _E	21 et 22.09.77	1°25'6	45015	23973	38101	57°49'3	400
SAI	SAINT-EMILION	33 44°51'9	0°08'7 _W	19 et 20.08.77	5°15'6	45769	22480	39868	60°35'0	14
SAL	SALON-LA-TOUR	19 45°29'8	1°31'7 _E	18 et 19.10.77	-	-	-	-	-	456

III DISCUSSION DES RESULTATS

On a vu que la valeur réduite à l'époque 1977,5 de l'élément E à la station S, $\bar{E}_{S,1977,5}$, est obtenue à partir de la valeur moyenne annuelle de l'élément à Chambon-la-Forêt, $\bar{E}_{O,1977,5}$, en appliquant la relation :

$$\bar{E}_{S,1977,5} = \bar{E}_{O,1977,5} + (E_{S,t} - E_{O,t}) + (\Delta E_O - \Delta E_S)$$

Nous allons essayer d'évaluer l'incertitude liée à chacun des termes de cette relation.

A - Incertitude liée au terme $(\Delta E_O - \Delta E_S)$

ΔE_O et ΔE_S représentent la "variation séculaire" de l'élément E à l'observatoire et à la station entre le jour de la mesure à la station et le 1er juillet 1977 (voir la remarque à la fin du paragraphe IV).

On peut évaluer, a posteriori, les limites de l'erreur que l'on a commise en négligeant la correction $\Delta E_O - \Delta E_S$. En effet, si nous examinons les valeurs réduites, avec cette simplification, aux époques 1972,5 et 1977,5 dans les stations de répétition, nous observons les variations séculaires maximales et minimales suivantes :

- F : (+ 137 gammas à Chambon, soit environ 27 gammas par an),
 " + 159 γ à Marlenheim, Est de la France, soit environ 32 γ / an,
 + 98 γ à Léon, Sud-Ouest de la France, soit environ 20 γ / an;
- H : (+ 144 gammas à Chambon, soit environ 29 gammas par an),
 + 178 γ à Léon, au Sud-Ouest, soit environ 36 γ / an,
 + 114 γ à Marlenheim, à l'Est, soit environ 23 γ / an;
- D : (- 35'4 à Chambon, soit environ - 7'1 par an),
 - 41'2 à Ploudalmézeau, à l'Ouest, soit environ - 8'2 / an,
 - 30'3 à Hagenbach, à l'Est, soit environ - 6'1 / an.

Si l'on tient compte de la distribution de la variation séculaire sur le territoire français et du laps de temps écoulé entre le 1er juillet et la date des mesures dans chaque station, on constate que l'erreur maximale que l'on a pu commettre en négligeant le terme $\Delta E_O - \Delta E_S$ est de l'ordre de :

- 2 gammas sur F
- 2 gammas sur H
- 0,3 à 0,4 minute sur D.

Il est évident que le fait de rapporter les mesures au 1er juillet au lieu de les rapporter au 1er janvier de l'année en cours, comme ce fut le cas en 1965, diminue l'erreur commise en négligeant le terme $\Delta E_O - \Delta E_S$, puisque la date moyenne des mesures est nettement plus proche du 1er juillet que du 1er janvier.

B - Incertitude liée au terme $(E_{S,t} - E_{O,t})$

L'incertitude liée à ce terme est la résultante, d'une part des incertitudes provenant de la mesure de l'élément E à l'instant t, à la station et à l'observatoire, d'autre part de l'approximation qui consiste à admettre que les écarts instantanés à la valeur moyenne $(E_{S,t} - \bar{E}_{S,t})$ et $(E_{O,t} - \bar{E}_{O,t})$ sont les mêmes au même instant à la station S et à l'observatoire O.

a) Erreurs de mesure à la station S. On dispose, pour chaque station, comme nous l'avons dit, de deux ensembles comprenant chacun au moins une série de deux mesures complètes de D, une série de huit mesures de H, deux séries de trente pointés de F. D'après le tableau des séries de valeurs obtenues par situation magnétique calme et compte tenu du contrôle des appareils à l'observatoire de Chambon, on peut estimer l'erreur maximale possible sur le résultat d'une série de mesures à :

- 1 minute sur $D_{S,t}$,
- 2 gammas sur $H_{S,t}$,
- 0,5 gammas sur $F_{S,t}$.

b) Erreurs de mesure à l'observatoire O. Les valeurs correspondantes des éléments à Chambon sont relevées sur les magnétogrammes de l'observatoire pour D, H et, cette année, F (par l'intermédiaire de H et Z). L'incertitude sur les valeurs individuelles $E_{O,t}$ fournies par l'observatoire est de l'ordre de :

- 1 minute sur $D_{O,t}$,
- 3 gammas sur $H_{O,t}$,
- 4 gammas sur $F_{O,t}$.

c) Erreurs de réduction des variations transitoires. Il est bien connu que l'hypothèse, que l'on est contraint d'adopter pour les besoins de la réduction, suivant laquelle

$$E_{S,t} - \bar{E}_{S,t} = E_{O,t} - \bar{E}_{O,t}$$

est valable seulement en première approximation. En fait, l'écart instantané $E_{S,t} - \bar{E}_{S,t}$ est la somme de plusieurs termes dont les plus importants sont fournis par la variation solaire journalière et par les variations d'agitation du type "baie" dont la durée est comprise entre quelques minutes et deux heures environ. L'amplitude et la forme de ces variations dépendent des coordonnées géographiques de la station considérée et, aussi, par le jeu des courants telluriques induits, des structures de la croûte et du manteau au voisinage de la station. En outre, la variation diurne est gouvernée par l'heure solaire locale tandis que les variations d'agitation sont synchrones en temps universel.

Ainsi que nous l'avons signalé, nous nous sommes efforcés de placer les mesures en dehors de la partie principale de la variation solaire journalière, de telle sorte que la valeur de l'élément magnétique au moment de la mesure soit aussi voisine que possible de la valeur "stationnaire" qu'on observe pendant la nuit. Dans ces conditions, la différence de forme ou d'amplitude de la variation diurne, de même que la différence d'heure locale à la station et à l'observatoire, interviennent peu. De plus, comme les deux ensembles de mesures, dans chaque station, sont situés l'un en début de matinée, l'autre en fin d'après-midi, il arrive souvent qu'au moins l'une des séries de mesures correspondant à chacun des éléments ait été effectuée par situation magnétique calme.

Finalement, après avoir tiré parti du nombre de déterminations de la différence ($E_{S,t} - E_{O,t}$), on arrive à la conclusion que l'incertitude portant sur la valeur définitive du terme ($E_{S,t} - E_{O,t}$) est en général inférieure à :

- 2 minutes pour D,
- 5 gammas pour F,
- 5 gammas pour H,

lorsqu'il s'agit des stations de la France continentale. On peut admettre que l'incertitude liée à ce terme est légèrement supérieure lorsqu'il s'agit d'une station de Corse.

C - Incertaince liée au terme $\bar{E}_{O,1977,5}$

Traditionnellement $\bar{E}_{O,1977,5}$ représente la valeur moyenne de l'ensemble des valeurs horaires pour l'année 1977. Pour éliminer de la moyenne l'influence des variations d'agitation, on pourrait songer à déterminer la valeur moyenne à partir des valeurs horaires correspondant aux cinq jours les plus

calmes de chaque mois. De même, pour éliminer l'influence de la variation solaire sur la valeur moyenne annuelle, on pourrait prendre pour celle-ci la valeur moyenne calculée sur une valeur horaire de nuit, par exemple la valeur moyenne entre 2 h et 3 h T.U. Le tableau IV donne les valeurs des différentes moyennes relevées à Chambon pour l'année 1977.

TABEAU IV Valeurs moyennes relevées à Chambon pendant l'année 1977

	- D	F	H	Z	I
Tous les jours	4°46'9	46 940 γ	20 798 γ	42 082 γ	63°42'0
Jours calmes	4°47'3	46 942 γ	20 805 γ	42 080 γ	63°41'4
Jours agités	4°46'4	46 938 γ	20 787 γ	42 085 γ	63°42'8
Toutes les nuits	4°45'8	46 943 γ	20 803 γ	42 082 γ	63°41'6
Nuits calmes	4°46'3	46 944 γ	20 805 γ	42 082 γ	63°41'5
Nuits agitées	4°44'8	46 940 γ	20 801 γ	42 080 γ	63°41'7

L'incertitude sur $\bar{E}_{O,1977,5}$ est la même quelle que soit la nature de la valeur moyenne considérée. Elle dépend des moyens mis en oeuvre à l'observatoire et doit être de l'ordre de :

- 1 gamma sur $\bar{F}_{O,1977,5}$
- 1 gamma sur $\bar{H}_{O,1977,5}$
- 0,1 minute sur $\bar{D}_{O,1977,5}$

D - Conclusion

En définitive nous estimons les incertitudes maximales à :

- 7 gammas sur $\bar{F}_{S,1977,5}$
- 7 gammas sur $\bar{H}_{S,1977,5}$
- 2,5 minutes sur $\bar{D}_{S,1977,5}$

Remarque : La station de Bonifacio (Corse) a été occupée par situation magnétique très agitée. De plus, un rayonnement électromagnétique puissant (séma-

Figure 2a : Localisation et noms de code des stations de répétition et des observatoires dont les données sont utilisées dans cette étude. Les stations fondées en 1947 sont indiquées par des triangles, les stations complémentaires par des croix et les observatoires par des cercles.

Figure 2b : Variation séculaire des éléments D, F, H et I dans les stations de répétition et les observatoires européens entre les époques 1972,5 et 1977,5 .

Figure 3a : Variation séculaire des composantes horizontale \vec{H} et verticale Z dans les stations de répétition et les observatoires européens entre les époques 1972,5 et 1977,5 . Les variations observées sont figurées par des chiffres sans parenthèses (ΔZ observé) et des vecteurs en trait plein ($\vec{\Delta H}$ observé). Les valeurs déduites de l'IGRF 1975 sont indiquées entre parenthèses (ΔZ théorique) et par des vecteurs en tireté ($\vec{\Delta H}$ théorique).

Figure 3b : Figure identique à la figure 3a sur laquelle ont été superposées les isopores de la composante verticale observées (en trait plein) et déduites de l'IGRF 1975 (en tireté).

Figure 2a : Localisation and code names of repeat stations and observatories used in this study. Stations started in 1947 are shown as triangles, complementary stations as crosses and observatories as circles.

Figure 2b : Secular variation of components D, F, H and I at repeat stations and european observatories between epochs 1972.5 and 1977.5 .

Figure 3a : Secular variation of horizontal \vec{H} and vertical Z components at repeat stations and european observatories between epochs 1972.5 and 1977.5 . Observed variations are shown as figures without parentheses (observed ΔZ) and full line vectors (observed $\vec{\Delta H}$). Values computed from the 1975 IGRF are shown as figures between parentheses (theoretical ΔZ) and dashed line vectors (theoretical $\vec{\Delta H}$).

Figure 3b : Same as figure 3a with superimposed isoporic lines for the vertical component, both observed (full line) and computed from IGRF 1975 (dashed line).

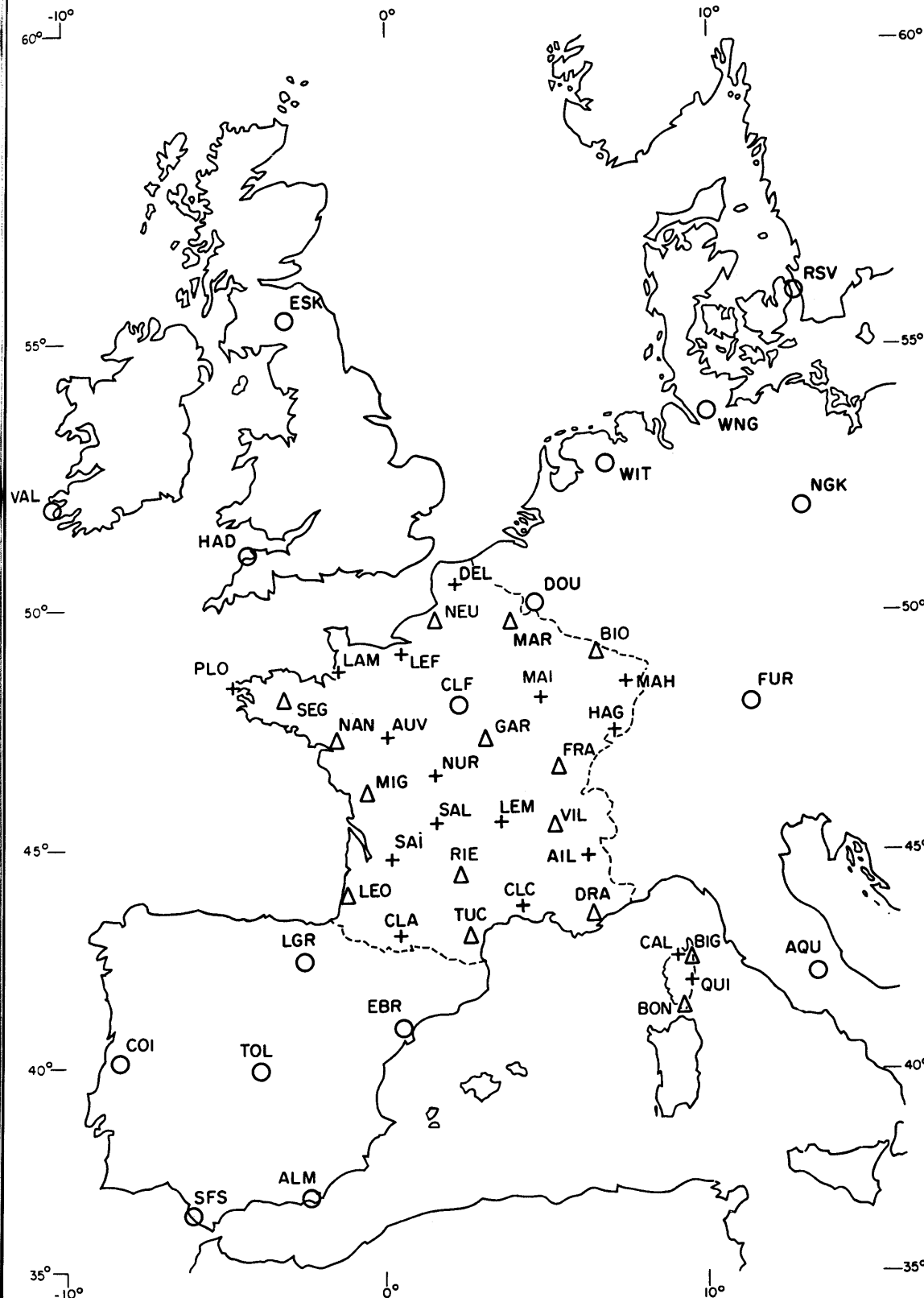
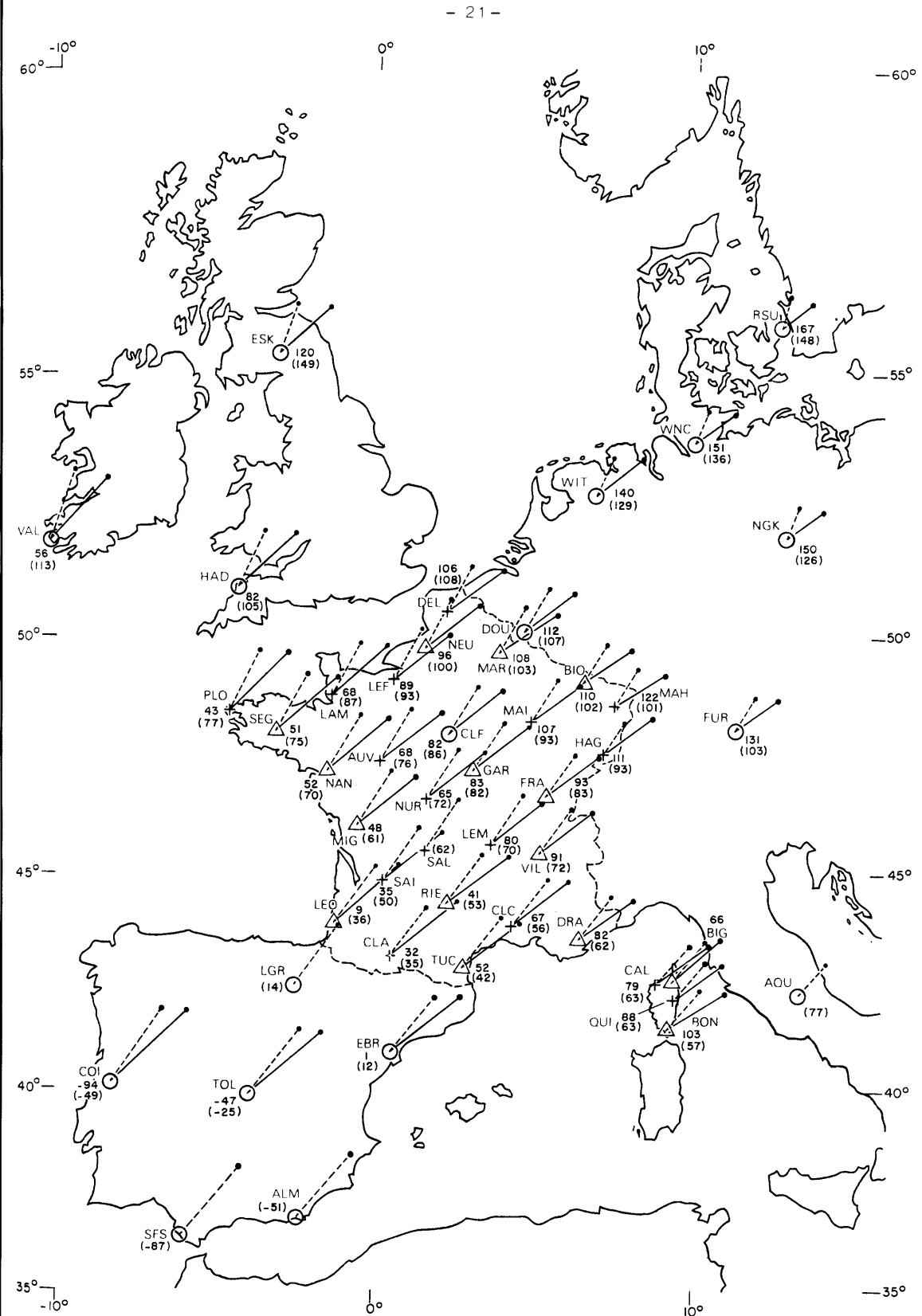
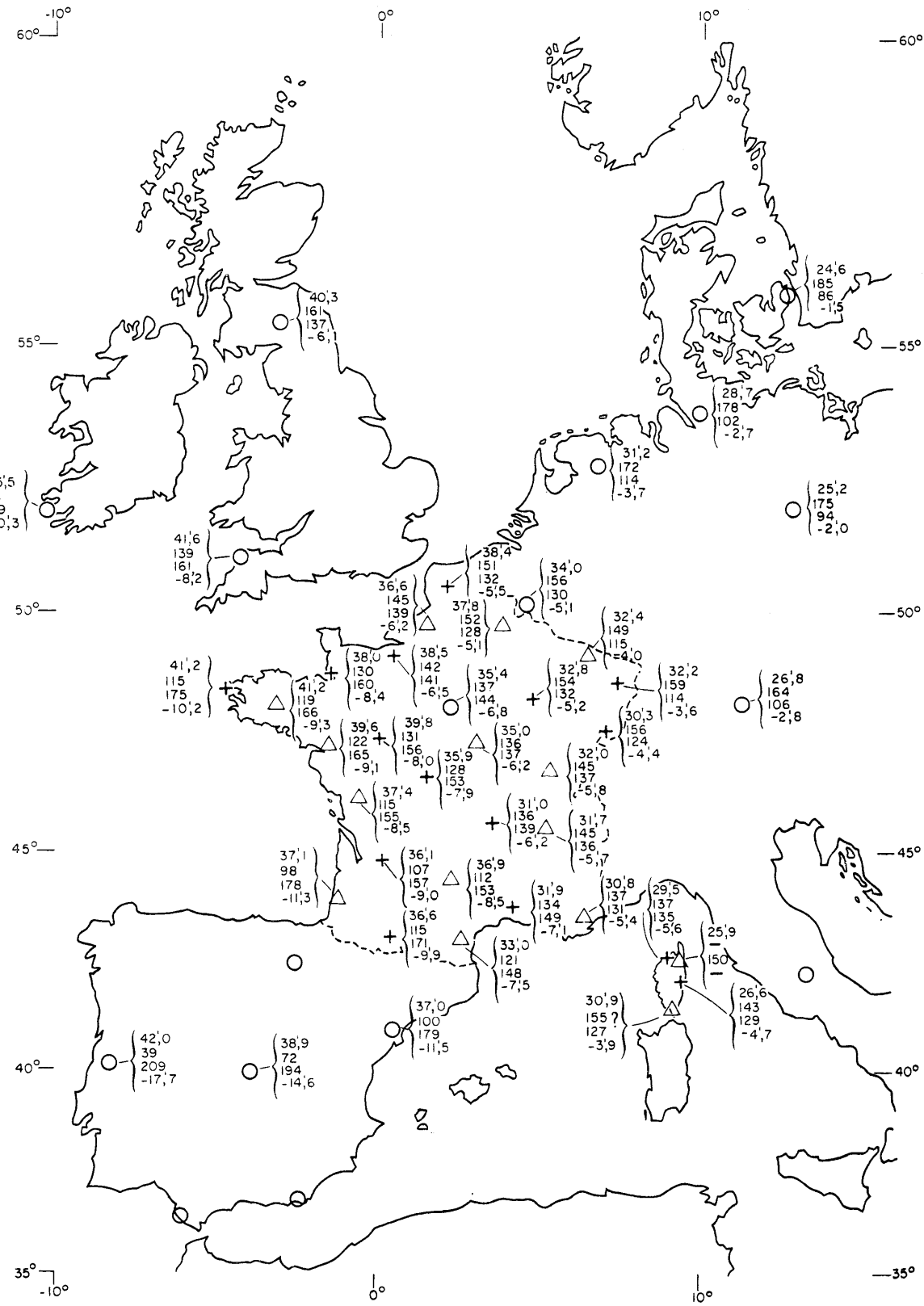
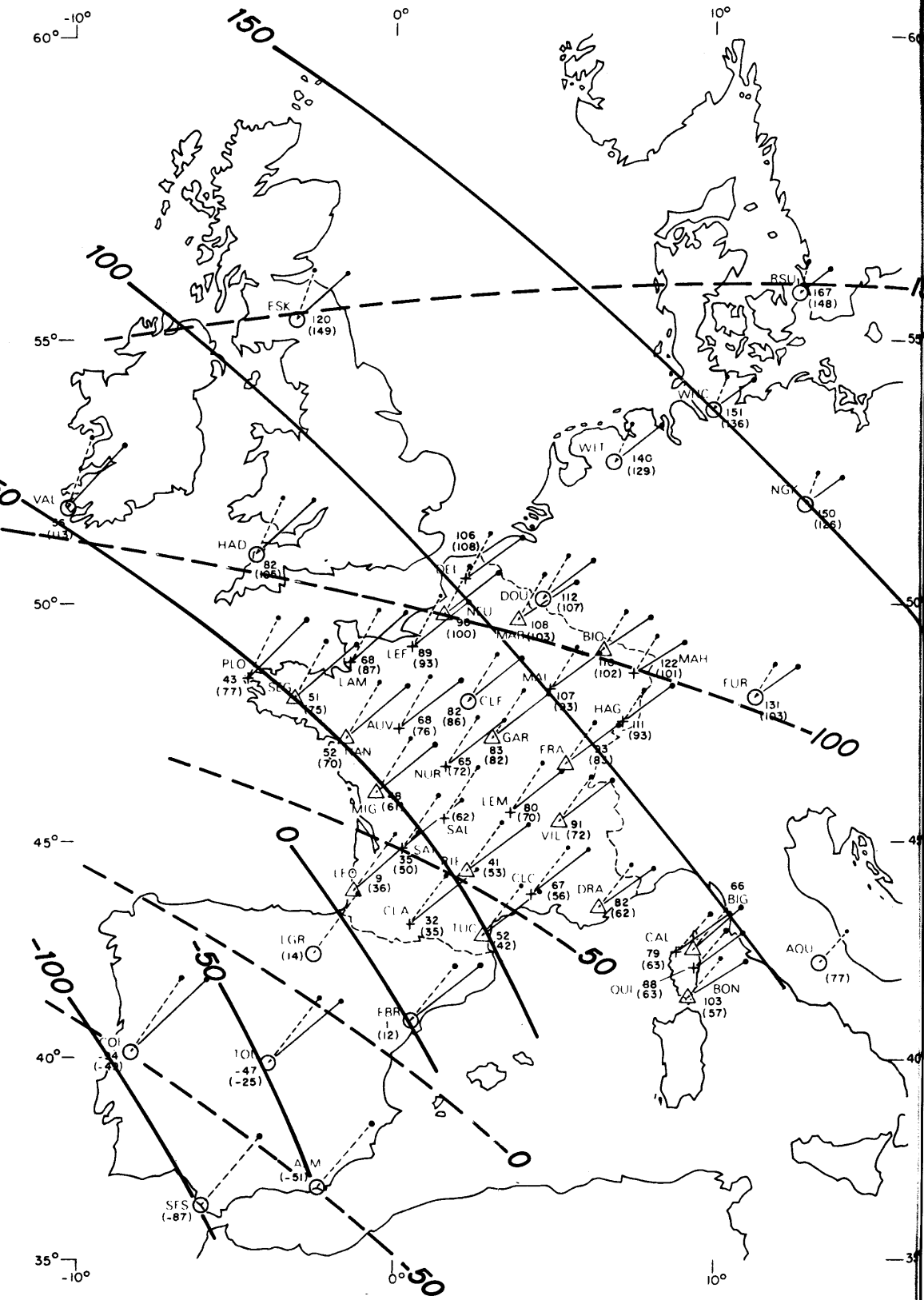


Figure 2a





phore) perturbait les mesures. Malgré la multiplication de ces mesures, l'incertitude est plus élevée que dans les autres stations. On peut l'estimer à 10 gammas sur $\bar{F}_{S,1977,5}$, 8 gammas sur $\bar{H}_{S,1977,5}$ et 3,5 minutes sur $\bar{D}_{S,1977,5}$.

Il n'est pas facile de vérifier ces estimations puisque les stations ont été occupées seulement pendant une journée ou deux, à cinq ans d'intervalle. Un contrôle est cependant possible, localement, lorsqu'on dispose d'un deuxième observatoire à proximité des stations de mesure : c'est le cas pour les stations du Nord de la France, Delettes, Marle et Bionville, qui sont peu éloignées de l'observatoire de Dourbes (Belgique). Compte tenu des incertitudes que nous avons évaluées, les variations séculaires relevées dans ces stations sont tout à fait compatibles avec celles que l'on déduit des données communiquées par Dourbes. Ceci nous amène à examiner d'une manière plus générale l'insertion des variations séculaires relevées en différents points du territoire français dans la distribution régionale de la variation séculaire déduite des données fournies par les observatoires environnants, comme cela avait été fait en 1972 (2).

IV LA VARIATION SEculaire DU CHAMP MAGNETIQUE TERRESTRE EN FRANCE ET DANS LE SUD OUEST DE L'EUROPE ENTRE LES EPOQUES 1972,5 ET 1977,5 .

Nous avons reporté sur deux figures la variation séculaire des sept éléments du champ magnétique terrestre relevée entre les époques 1972,5 et 1977,5 dans les stations du réseau français de répétition : D, F, H et I sur la figure 2, X, Y et Z sur la figure 3.

On voit sur ces cartes que la variation séculaire de H augmente régulièrement du Nord-Est (114 γ à Marlenheim) au Sud-Ouest (178 γ à Léon), tandis que la variation séculaire de Z diminue du Nord-Est (122 γ à Marlenheim) au Sud-Ouest (9 γ à Léon). Cette inversion dans les distributions respectives des variations séculaires de H et de Z fait que, si la distribution de la variation de F ressemble à celle que l'on observe pour Z, la différence entre le Nord-Est et le Sud-Ouest est relativement faible : 159 γ à Marlenheim, 98 γ à Léon.

La régularité de la distribution de la variation séculaire paraît moins nette pour D parce que l'incertitude relative sur la détermination de cette variation est plus importante : 4' sur une variation comprise entre

30' au Nord-Est et 41' à l'Ouest.

D'une manière générale, la régularité de la distribution de la variation séculaire sur le territoire français métropolitain apparaît bien sur la figure 3 où nous avons adopté la représentation conventionnelle : la variation séculaire de Z est traduite par des courbes d'égale variation, isopores de Z, et la variation séculaire dans le plan horizontal par des vecteurs $\overline{\Delta Z}$, $\overline{\Delta H} = (\Delta X, \Delta Y)$.

La figure 3 montre également que les variations séculaires que nous observons dans les stations de répétition s'insèrent très bien, comme lors des époques précédentes, dans la distribution générale de la variation séculaire que l'on déduit des données des observatoires. Cette variation séculaire apparaît régulièrement distribuée. Cependant, une anomalie de la variation séculaire de la composante Z, de faible amplitude (de l'ordre de $10 \gamma / \text{an}$), apparaît dans l'extrême Sud-Ouest de la France. Cette anomalie de variation séculaire sera étudiée dans une note séparée. On notera l'excellente cohérence, d'une station à l'autre, des estimations de la variation séculaire. L'examen attentif des figures 2 et 3 montre que les estimations d'incertitudes faites dans le paragraphe précédent sont effectivement surévaluées.

On peut également comparer les variations séculaires observées dans les stations de répétition aux variations séculaires indiquées sur les cartes des éléments magnétiques établies pour l'époque 1975,0 par le Defense Mapping Agency Hydrographic Center (USA). En ce qui concerne les isopores de Z, le Sud-Ouest de l'Europe se place entre un minimum ($- 200 \gamma / \text{an}$) situé sous le tropique du Cancer au milieu de l'Atlantique et un maximum ($+ 60 \gamma / \text{an}$) situé au Sud-Est du Groënland. Il en résulte que, dans nos régions, les isopores de Z ont une faible courbure et sont orientées grossièrement WNW-ESE. Sur la carte $Z_{1975,0}$, l'isopore $\Delta Z = 0$ passe un peu au Nord de Madrid tandis que l'isopore observée $\Delta Z = 0$ passe immédiatement au Sud-Est des Pyrénées. D'une manière générale, les isopores réelles sont décalées vers le Nord-Est par rapport aux isopores de la carte et ont une orientation NW-SE. En ce qui concerne les isopores de H, la carte $H_{1975,0}$ indique que le Sud-Ouest de l'Europe se place à l'Est d'un maximum ($+ 100 \gamma / \text{an}$) centré sur l'Atlantique Ouest (vers Halifax). Les isopores de H sont décalées vers l'Ouest par rapport aux isopores de la carte; la vitesse de variation de H sur le territoire français est inférieure à la vitesse indiquée par la carte. Les vitesses de variation de F et de I découlent bien sûr de celles de H et Z. La vitesse réelle de variation de F en France est un peu plus

faible que celle qui est indiquée sur la carte $F_{1975,0}$ tandis que la vitesse réelle de variation de I est peu différente de celle qui est indiquée sur la carte $I_{1975,0}$. Pour ce qui est des courbes isopores de D, l'azimut indiqué par la carte $D_{1975,0}$ est assez bon mais la valeur donnée est presque deux fois trop faible : 4' E en France en moyenne au lieu de 7' E en réalité. Cette accélération de la variation séculaire de la déclinaison en Europe depuis 1971 est importante et fera l'objet d'une note séparée.

Nous avons enfin comparé la variation séculaire observée à la variation séculaire prédite par l'IGRF (1975,0; référence 5) entre les époques 1972,5 et 1977,5. La figure 3 donne les variations ΔZ (entre parenthèses) et les vecteurs $\overline{\Delta Z}$ (en tireté) calculés pour chaque station et chaque observatoire. Nous avons aussi tracé (en tireté) les courbes isopores déduites de l'IGRF. On remarque que les courbes observées font un angle de plus de 30° avec les courbes calculées. En ce qui concerne la variation dans le plan horizontal, on remarque sur la figure 3 que le vecteur $\overline{\Delta H}$ calculé est systématiquement plus court que le vecteur observé et fait aussi avec lui un angle important (de l'ordre de 20°). Dans les deux cas les vecteurs $\overline{\Delta H}$ sont sensiblement perpendiculaires aux isopores de Z.

Le tableau V, dans lequel nous avons rassemblé les variations annuelles des éléments à Chambon pour l'époque 1975,0 donne une idée des différences, au centre de la France, entre les trois évaluations.

TABLEAU V Variations annuelles (1975) à Chambon-la-Forêt

	ΔZ	ΔH	ΔD	ΔF	ΔI
Variations observées	+ 16 γ	+ 29 γ	- 7'	+ 27 γ	- 1'4
Variations déduites des cartes 1975,0 de la DMAHC	+ 18 γ	+ 35 γ	- 4'	+ 32 γ	- 1'6
Variations déduites de l'IGRF	+ 17 γ	+ 33 γ	- 4'	+ 30 γ	- 1'6

Remarque : Les différences $\overline{E}_{1977,5} - \overline{E}_{1972,5}$ ne représentent pas la variation séculaire proprement dite, d'origine interne, de l'élément E entre les époques 1972,5 et 1977,5. Entre aussi dans ces différences, pour une part importante (de l'ordre de la vingtaine de γ pour H et Z), la variation de la

valeur moyenne annuelle du champ d'origine externe \vec{D}_{st} . Cette variation dont nous avons montré (6) qu'elle était corrélée aux variations de l'activité du Soleil, explique pour partie le flux et le reflux des isopores de Z observés depuis la création du réseau (voir aussi réf.1). On a proposé, dans l'espoir d'éliminer les composantes d'origine externe, de calculer les valeurs moyennes sur un intervalle d'au moins onze ans, durée moyenne d'un cycle d'activité solaire. On pourrait aussi songer à calculer les valeurs moyennes annuelles non pas à partir de toutes les valeurs horaires, mais à partir des seules valeurs de nuit, de manière à éliminer la variation solaire journalière qui n'est pas de moyenne nulle. Le tableau IV montre cependant que l'on ne doit pas s'attendre à de grandes différences (comparer ce tableau au tableau correspondant - p.15 - de la référence 2).

Nous sommes heureux de remercier ici les personnalités responsables des observatoires dont les données ont permis d'établir la carte des variations séculaires dans le Sud-Ouest de l'Europe. Nous remercions également pour leur aide pendant la campagne de mesures Michèle Courtillot, Joël Ducruix, Marie-Annick Le Mouél et Richard Scheib.

BIBLIOGRAPHIE

- (1) E. LE BORGNE, J.L.LE MOUEL et J.C. ROSSIGNOL, 1971, Réseau magnétique de répétition de la France - Campagne 1967, Observations magnétiques, IPG de Paris, fasc.5, 19 p.
- (2) E. LE BORGNE et J.L.LE MOUEL, 1974, Réseau magnétique de répétition de la France - Campagne 1972, Observations magnétiques, IPG de Paris, fasc.14, 21 p.
- (3) E. LE BORGNE et J.L.LE MOUEL, 1969, Les stations de la France métropolitaine pour le Levé Magnétique Mondial, Annales de l'IPG de Paris, XXXV, p.225.
- (4) E.H.VESTINE, 1961, Manuel d'opérations pour le Levé Magnétique Mondial, U.G.G.I. - I.A.G.A., Monographie N°11.
- (5) I.A.G.A. Division I Study Group, Geomagnetic reference fields, International Geomagnetic Reference Field 1975, Geophys.J.R. astr.Soc., 44, p.733.
- (6) V.COURTILLOT et J.L.LE MOUEL, 1976 a, On the long period variations of the Earth's magnetic field, J.Geophys.Res., vol.81, p.2941.
- (7) V.COURTILLOT et J.L.LE MOUEL, 1976 b, Time variations of the Earth's magnetic field with a period longer than two months, Phys. Earth Planet.Int., vol.12, p.237.
- (8) V.COURTILLOT et J.L.LE MOUEL, 1978, Secular variation in France in the last 25 years, EOS Trans.Am.Geophys.U., vol.59, p.268 ; V.COURTILLOT, J.DUCRUIX et J.L. LE MOUEL, 1978, Sur une accélération récente de la variation séculaire du champ magnétique terrestre, Comptes Rendus Acad. Sci. Paris.

<u>TABLE DES MATIERES .</u>	Page
<u>Résumé / Abstract</u>	i
I <u>Exécution des mesures</u>	1
A - Contrôle des appareils à l'Observatoire de Chambon-la-Forêt	1
B - Exécution des mesures sur le terrain	5
C - Etat du réseau . Création d'une nouvelle station.	5
D - Réduction des observations	7
II <u>Présentation des résultats</u>	9
A - Tableau II . Stations de répétition	10
B - Tableau III . Stations complémentaires	12
III <u>Discussion des résultats</u>	14
A - Incertitude liée au terme $(\Delta E_0 - \Delta E_S)$	14
B - Incertitude liée au terme $(E_{S,t} - E_{0,t})$	15
C - Incertitude liée au terme $\bar{E}_{0,1977,5}$	16
D - Conclusion	17
IV <u>La variation séculaire du champ magnétique terrestre en France et dans le Sud-Ouest de l'Europe entre les époques 1972,5 et 1977,5.</u>	20
<u>Bibliographie</u>	27
<u>Table des matières</u>	28