

**COMMISSION DES COMMUNAUTÉS
EUROPÉENNES**

C.C.E.

Direction générale de la recherche,
de la science et de l'éducation

200, rue de la Loi
B - 1049
Bruxelles

**DÉLÉGATION GÉNÉRALE A LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE**

D.G.R.S.T.

35, rue Saint-Dominique
75700 Paris

MINISTÈRE DE L'INDUSTRIE

97-99, rue de Grenelle
75007 Paris

PROSPECTION GÉOTHERMIQUE INTÉGRÉE DANS LE MASSIF DU MONT-DORE

SYNTHÈSE

par

J. VARET, L. STIELTJES, A. GÉRARD et C. FOUILLAC



BUREAU DE RECHERCHES GÉOLOGIQUES ET MINIÈRES

SERVICE GÉOLOGIQUE NATIONAL

Département géothermie

B.P. 6009 - 45060 Orléans Cédex - Tél.: (38) 63.80.01

80 SGN 150 GTH

Janvier 1980

Cette synthèse a été réalisée à partir des travaux de :

<i>Mlles</i> BATARD	- BRGM-Service Géologique Régional Auvergne
CAVENEL	- BRGM-Géophysique
CORON	- BGI
<i>MM.</i> BARBUT	- BRGM-Géothermie
BAUBRON	- BRGM-Minéralogie/Géochimie/Analyses
BAUDU	- BRGM-Géophysique
BEAU	- BRGM-Géophysique
BENDERITTER	- CRG/Garchy
BESSON	- Université de Clermont-Ferrand
BOSCH	- BRGM-Minéralogie/Géochimie/Analyses
BOURLIER	- BRGM-Géophysique
BROUSSE	- Faculté d'Orsay-Université de Paris XI
CANTAGREL	- Université de Clermont-Ferrand
DEGRANGES	- BRGM-Minéralogie/Géochimie/Analyses
DJARA	- BRGM-Géophysique
DUFFIELD	- USGS/Menlo Park
DUPIS	- CRG/Garchy
DUPONT	- BRGM-Géophysique
FERRANDES	- BRGM-Géophysique
FOUILLAC	- CNRS
FRAPPA	- LERGA/Bordeaux
HIRN	- IPG/Paris
HUGON	- CRG/Garchy
JEAMBRUN	- BRGM-Service Géologique Régional Auvergne
LALLIER	- BRGM-Géophysique
LELEU	- BRGM-Minéralogie/Géochimie/Analyses
LENAT	- Université de Clermont-Ferrand
LOPOUKHINE	- BRGM-Géothermie
MALERGUE	- BEICIP
MARIE	- CRG/Garchy
MENNECHET	- BRGM-Géophysique
MURAOUR	- LERGA/Bordeaux
NERCESSIAN	- IPG/Paris
OLTRA	- BRGM-Géophysique
PERAGALLO	- BRGM-Géophysique
PETIAU	- CRG/Garchy
PUVILLAND	- BRGM-Géophysique
RISLER	- BRGM-Service Géologique Régional Auvergne
ROUYER	- CNRS
STRAUB	- BRGM-Géophysique

Qu'ils en soient remerciés !

R E S U M E

Un important programme de prospection géothermique a été mené dans le massif du Mont Dore en 1979 sous la conduite du Département Géothermie du B.R.G.M., avec le soutien financier de la C.C.E. et de la D.G.R.S.T. et la collaboration de nombreuses équipes (BEICIP, SNEA, CNRS, CEA, Universités). Diverses méthodes géologiques, géochimiques et géophysiques ont été concentrées sur l'objectif, d'une dizaine de kilomètres de diamètre environ, que constitue la caldera du Mont Dore.

On a pu dégager ou confirmer les principaux éléments de l'histoire volcanologique du massif du Mont Dore qui s'est élaboré à partir de 4 m.a. avant J.C. en deux phases principales.

La plus ancienne s'étend de 4 m.a. à 1,8 m.a. et est marquée essentiellement par la formation d'une caldera suite à d'énormes éruptions de matériaux pyroclastiques.

La période récente (0,8 m.a. à 0,25 m.a.) est marquée par le volcanisme du Sancy qui est à l'origine de la plupart des dômes, coulées et couvertures pyroclastiques le long des flancs Est et Sud de la caldera.

L'étude des sources thermales a permis la mise en évidence par analyse chimique d'équilibres caractéristiques de températures assez élevées pour les eaux en profondeur. Une température de $140^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ peut être espérée dans la partie centrale de la caldera.

Les études géophysiques (gravimétrie, magnétisme, sismiques, électriques, magnétotelluriques, P.S.) ont guidé la sélection de deux zones d'intérêt.

La région retenue pour le forage est voisine du centre de la caldera près d'une grande fracture qui la traverse du sud-ouest au nord-est.

S O M M A I R E

	Page
INTRODUCTION GENERALE	1
I - GEOLOGIE	2
I.1 - Introduction	2
I.2 - Cadre physiographique et hydrogéologique	4
I.3 - Cadre géologique générale	6
I.4 - Contexte structural	7
I.5 - La caldera centrale et son remplissage	8
I.6 - Histoire volcanologique, géochronologique et magmatologique du Mont Dore	9
I.7 - Activité thermique actuelle et fossile	11
I.8 - Conclusions géothermiques sur la base de données géologiques	12
II - GEOCHIMIE	13
II.1 - Présentation des travaux	13
II.2 - Interprétations générales	14
II.2.1 - Origine des eaux de sources analysées	
II.2.2 - Origine du Carbone	
II.2.3 - Origine de l'Argon et de l'Azote	
II.2.4 - Origine du Soufre	
II.2.5 - Séparation des eaux en différents groupes	
II.3 - Interprétations par groupes	15
II.3.1 - Les eaux minérales froides	
II.3.2 - Les sources de la vallée de la Dordogne	
II.3.3 - Le Mont Dore	
II.3.4 - La vallée de Chaudefour	
II.3.5 - Sources sulfureuses du Sancy	
II.4 - Conclusions hydrogéothermales	18

	Page
III - GEOPHYSIQUE	19
III.1 - Présentation des travaux	19
III.1.1 - Etudes stragégiques	
III.1.2 - Etudes tactiques	
III.1.3 - Implantation des mesures	
III.2 - Détermination des limites de la caldera et étude du milieu encaissant	21
III.2.1 - Gravimétrie	
III.2.2 - Magnétométrie aéroportée	
III.2.3 - Variations de vitesses et absorptions d'ondes sismiques	
III.2.4 - Magnétotellurique rapide et électromagnétisme MELOS	
III.2.5 - Sondages électriques type SCHLUMBERGER	
III.2.6 - Sélection d'une zone d'études détaillées	
III.3 - Etude du fond et des structures internes à la caldera	25
III.3.1 - Construction d'une coupe synthétique	
III.3.1.1 - Sismique réfraction	
III.3.1.2 - Sismique réflexion	
III.3.1.3 - Magnétotellurique basses fréquences	
III.3.1.4 - Polarisation Spontanée	
III.3.1.5 - Corrélation P.S. - Gravimétrie, Magnétisme	
III.3.2 - Recherche de conducteurs profonds par magnétotellurique	
III.3.3 - Test de Polarisation spontanée	
III.4 - Conclusion géophysique et sélection de cibles de forage	28

	Page
IV - STRATEGIE D'EXPLORATION PAR FORAGE	29
IV.1 - Introduction	29
IV.2 - Stratégie de forage	29
IV.3 - Modèle de champ et choix d'implantation	30
IV.3.1 - Source de chaleur	
IV.3.2 - Les réservoirs	
IV.3.3 - Couverture	
IV.3.4 - Implantation	
IV.4 - Données techniques du forage	31
IV.5 - Production et utilisation attendues	32

LISTE DES FIGURES

- Figure 1 : Situation générale de l'étude
- Figure 2 : Hydrographie du massif du Mont Dore
- Figure 3 : Répartition dans le temps de l'activité tectonique et volcanique
- Figure 4 : Linéaments du socle cristallin
- Figure 5 : Tectonique et centres émissifs associés
- Figure 6 : Schéma volcanologique du strato-volcan du Mont Dore
- Figure 7 : Coupe synthétique du remplissage de la caldera centrale
- Figure 8 : Répartition des coulées basaltiques d'âge pre-caldera
- Figure 9 : Répartition des ponces rhyolitiques
- Figure 10 : Répartition des rhyolites et des pyroclastites post-caldera
- Figure 11 : Coulées basaltiques post-caldera
- Figure 12 : Phonolites post-caldera
- Figure 13 : Activité basaltique récente
- Figure 14 : Synthèse géologique
- Figure 15 : Schéma d'évolution magmatique du Mont Dore
- Figure 16 : Equilibres géochimiques

- Figure 17 : Plan de position 1 - mesures géophysiques
- Figure 18 : Plan de position 2 - mesures géophysiques
- Figure 19 : Carte gravimétrique générale
- Figure 20 : Carte gravimétrique de la caldera
- Figure 21 : Champ magnétique d'origine superficielle réduit au pôle
- Figure 22 : Champ magnétique d'origine profonde réduit au pôle
- Figure 23 : Modèle magnétique
- Figure 24 : Variations de vitesse des ondes sismiques
- Figure 25 : Interprétation combinée MT-MELOS-Gravimétrie
- Figure 26 : Sondages électriques
- Figure 27 : Magnétotellurique haute fréquence
- Figure 28 : Champ aéromagnétique sur caldera
- Figure 29 : Coupe synthétique suivant le profil de sismique réfraction
- Figure 30 : Magnétotellurique 5.EX : conductances
- Figure 31 : Magnétotellurique harmonique : interprétation
- Figure 32 : Polarisation spontanée
- Figure 33 : Coupe interprétative sud-ouest - nord-est (synthèse)
- Figure 34 : Permis de recherche

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Teneur en ion majeur exprimée en 10^{-3} Moles/litre

Tableau 2 : Teneurs en éléments traces

Tableau 3 : Gaz dissous en mole/litre

Tableau 4 : Compositions isotopiques

Tableau 5 : Répertoire des échantillons

Tableau 6 : Estimation des températures profondes pour les sources les plus représentatives de la vallée de la Dordogne

INTRODUCTION

La production d'électricité à partir de la vapeur d'origine géothermale a pris depuis plusieurs années un certain essor dans le monde. Dans ce domaine, la France accuse un certain retard dû, en partie, à l'absence de ressources "évidentes" en métropole.

Pourtant, le Massif Central Français est affecté par un volcanisme très récent (les dernières éruptions datent de quelques milliers d'années à peine), ce qui suppose la présence de sources de chaleur magmatique superficielles -élément essentiel d'un champ géothermique de haute énergie-.

Au cours d'une première évaluation des ressources potentielles du Massif Central, menée par le B.R.G.M. avec le soutien de la CCE, il a été montré que le Massif du Mont Dore constitue a priori la zone la plus à même de receler un champ géothermique.

Le développement d'une expérience dans le domaine de la géothermie haute énergie en France métropolitaine est important à plus d'un titre :

- tout d'abord, dans la situation de pénurie énergétique à laquelle nous devons faire face, toute source d'énergie doit être considérée, et son développement traité, au moins au titre de la recherche et de la démonstration,

- ensuite, si un champ géothermique de haute énergie existait en France, et que nous ne l'ayons pas recherché sinon découvert, notre génération serait coupable quand d'autres pays, même pourvus en ressources pétrolières, développent les recherches et les réalisations dans ce domaine (Mexique, Indonésie, Vénézuéla, etc),

- enfin, l'exportation de notre savoir faire et de notre industrie dans ce domaine ne prendra un réel essor que lorsque des réalisations françaises existeront dans ce domaine.

Des centaines de forages pétroliers ont été réalisés en France sans succès, et il n'est pas interdit de considérer que nous puissions nous permettre de rencontrer quelques échecs en forages géothermiques avant de renoncer à développer un programme de recherches géothermiques haute énergie.

I - GEOLOGIE

I.1 - INTRODUCTION

Bien que des études approfondies aient déjà été menées à bien sur le Mont Dore depuis plusieurs dizaines d'années, leur caractère marqué de recherche scientifique laissait un certain nombre d'inconnues quant aux données à caractère appliqué pour mener à bien une prospection de champ géothermique débouchant sur des opérations de forage profond. Ainsi, les notions de localisation, d'évolution dans le temps de l'activité liée à la source de chaleur profonde se devaient d'être précisées. De même, les aspects de structure interne du massif volcanique, à savoir sa caldera, la nature et l'épaisseur de son remplissage, la localisation des zones d'injection préférentielle du magma représentaient une approche fondamentale. D'autre part, la préparation d'une opération de forage profond nécessitait de disposer de coupes géologiques prévisionnelles rédigées dans l'esprit d'un montage technique d'une phase de forages. Enfin, une perception synthétique globale actualisée de la géologie de ce volcan central était nécessaire pour l'interprétation des résultats de la grande masse des études géophysiques entreprises dans le cadre de ce contrat.

Trois équipes ont donc été impliquées sur ce dossier "géologie", chacune disposant d'un contrat précis d'étude de la CCE.

L'Université d'Orsay (laboratoire de Pétrographie, dirigé par M. BROUSSE) a apporté sa connaissance antérieure sur la minéralogie et la pétrographie des séries volcaniques du Mont Dore, des mesures géochronologiques. Par ailleurs, des leviers géologiques de détail avaient été faits dans le cadre de la carte géologique de France, M. BROUSSE étant responsable de la coupure géologique 1/50 000e de la partie centrale et occidentale du massif (feuille de Bourg-Lastic). Une carte géologique thématique d'ensemble du massif a d'ailleurs été publiée en début d'étude, pour faire le point sur l'état des connaissances géologiques apportées par cette équipe avant les travaux ; elle a été cofinancée par chacun des trois contractants : Université d'Orsay, BEICIP et B.R.G.M.

L'Université d'Orsay a également contribué par des leviers géologiques de détail sur le ravin de Vendeix, le versant Sud du Puy de Sancy et un tronçon de la vallée de la Dordogne dans le secteur de Rigolet-Bas. Des mesures radiogéochronologiques ont été faites, ainsi qu'une étude des minéralisations hydrothermales secondaires anciennes.

L'Université de Clermont-Ferrand est intervenue contractuellement par son laboratoire associé CNRS de géochronologie pour réaliser des datations par la méthode du K/Ar sur les laves du Mont Dore (M. CANTAGREL). Toutefois, cette Université nous a fait bénéficier de ses connaissances sur la partie orientale du massif, Monsieur le Professeur VINCENT étant responsable des leviers de la carte géologique de France sur la coupure de l'est du massif (feuille de Veyre-Monton).

Le B.R.G.M. est intervenu pour les études de structures géologiques internes du massif (tectonique, volcanologie, problèmes de constitution et de remplissage de la caldera), de géochronologie (en liaison avec l'Université de Clermont-Ferrand), et a été chargé par la CCE d'assurer la coordination des travaux et réaliser la synthèse géologique et globale.

Les rapports de chacun des contractants et leurs divers appendices techniques feront donc l'objet d'annexes à la présente synthèse générale.

1.2 - CADRE PHYSIOGRAPHIQUE ET HYDROGEOLOGIQUE

Le Mont Dore est un vaste strato-volcan de forme elliptique, s'étalant sur une trentaine de kilomètres du Nord au Sud entre Saint Pierre-Roche et le plateau du Cézallier, et sur 25 kilomètres d'Ouest en Est entre Laqueuille et la région de Saint Nectaire, couvrant une superficie d'environ 500 km². Les produits volcaniques émis par ce strato-volcan représentent un volume d'environ 220 km³, compte tenu des 100 km³ enlevés par l'érosion glaciaire (R. BROUSSE 1971), ils s'étalent beaucoup plus longuement en direction du nord (tufs et cinérites) que vers le sud.

L'ensemble géologique ainsi formé s'imbrique avec les formations basaltiques du plateau du Cézallier au sud mais est recouvert partiellement du nord-est au sud-est par les émissions fissurales très récentes (moins de 35 000 ans) de la Chaîne des Puys.

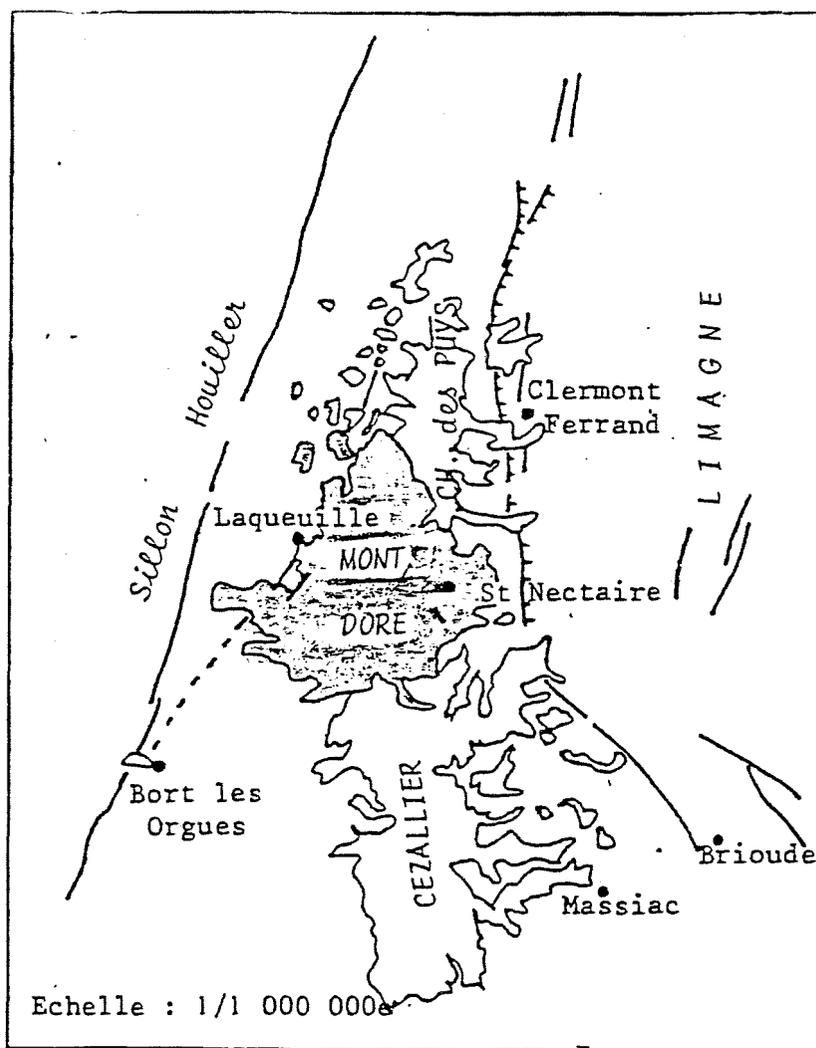


Figure 1

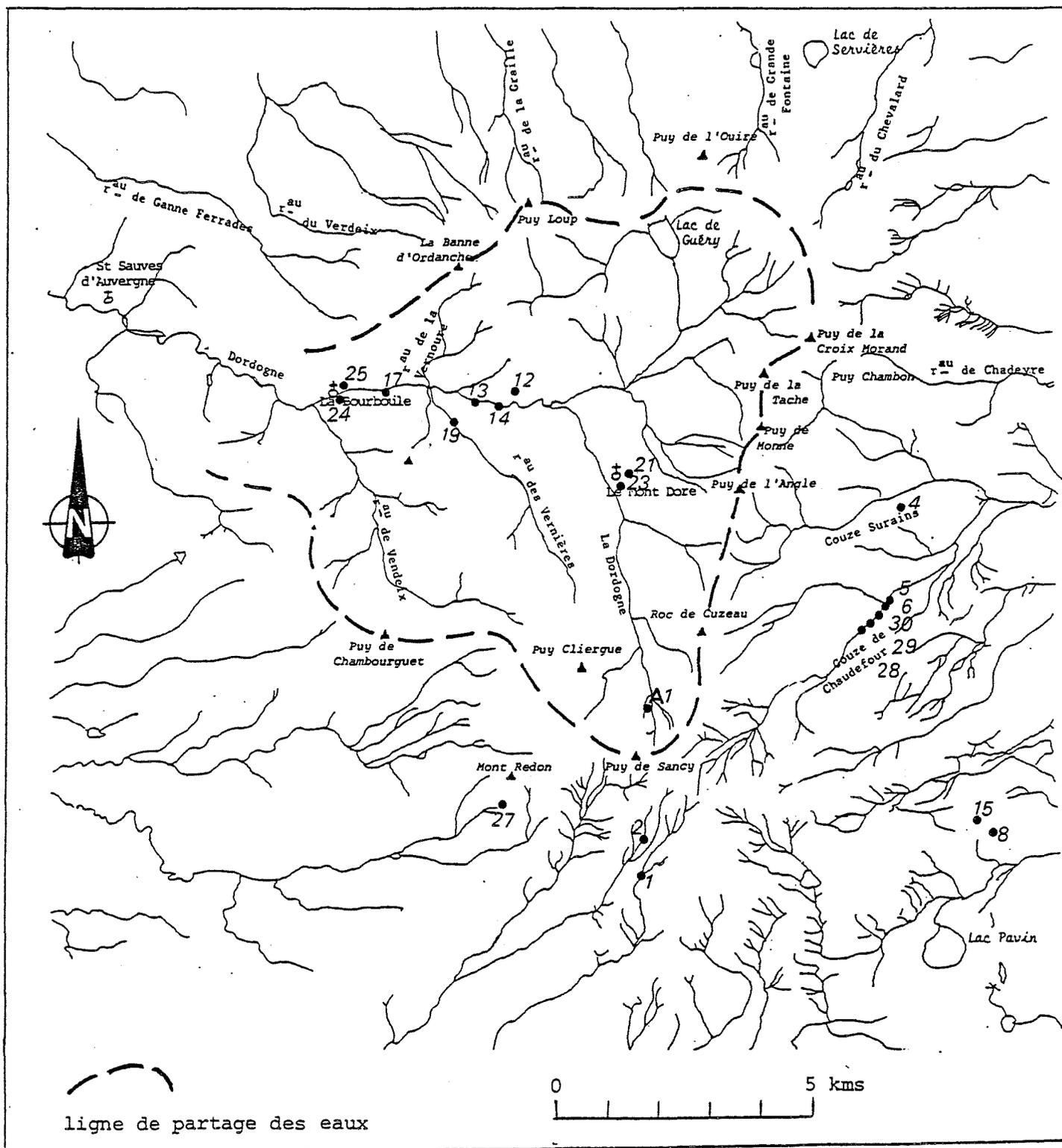


FIG. 2 : Hydrographie du massif du Mont Dore et ligne de partage des eaux du bassin de la Dordogne. Position des sources étudiées (cf. Géochimie).

La ligne de partage des eaux simule grossièrement les pourtours de la caldera centrale.

L'altitude moyenne du massif est comprise entre 1 000 et 1 500 m, les villes thermales de la Bourboule et du Mont Dore, situées au coeur de la fosse centrale du massif où coule la Dordogne sont à une altitude de 900 à 1 000 m. Le cours de cette rivière, qui prend sa source au Sancy, change 3 fois de direction dans sa traversée de la fosse, selon des directions majeures de fracturation du socle. Les crêtes volcaniques dominent la fosse centrale de 500 à 700 m sur les rebords nord et le rebord est, et culminent au sud au Puy de Sancy (1 886 m) avant de se réabaisser graduellement vers l'ouest où la fosse s'égueule et permet à la Dordogne de s'échapper (fig. 2).

L'altitude moyenne du socle à l'affleurement autour du massif est comprise entre 840 et 960 m, sauf dans la zone de horst N-S qui prend le volcan en écharpe sur sa crête orientale, où il culmine alors entre 1 040 et 1 140 m.

Le bassin versant de la fosse centrale du massif couvre 250 km² environ (fig. 2). Malheureusement, aucune étude hydrogéologique n'a été entreprise sur cette région centrale ; par ailleurs, les données de pluviométrie sont réduites à une seule station (au Mont Dore). Bien que cette région reçoive un impluvium notoire, aucune donnée sur les infiltrations n'est disponible.

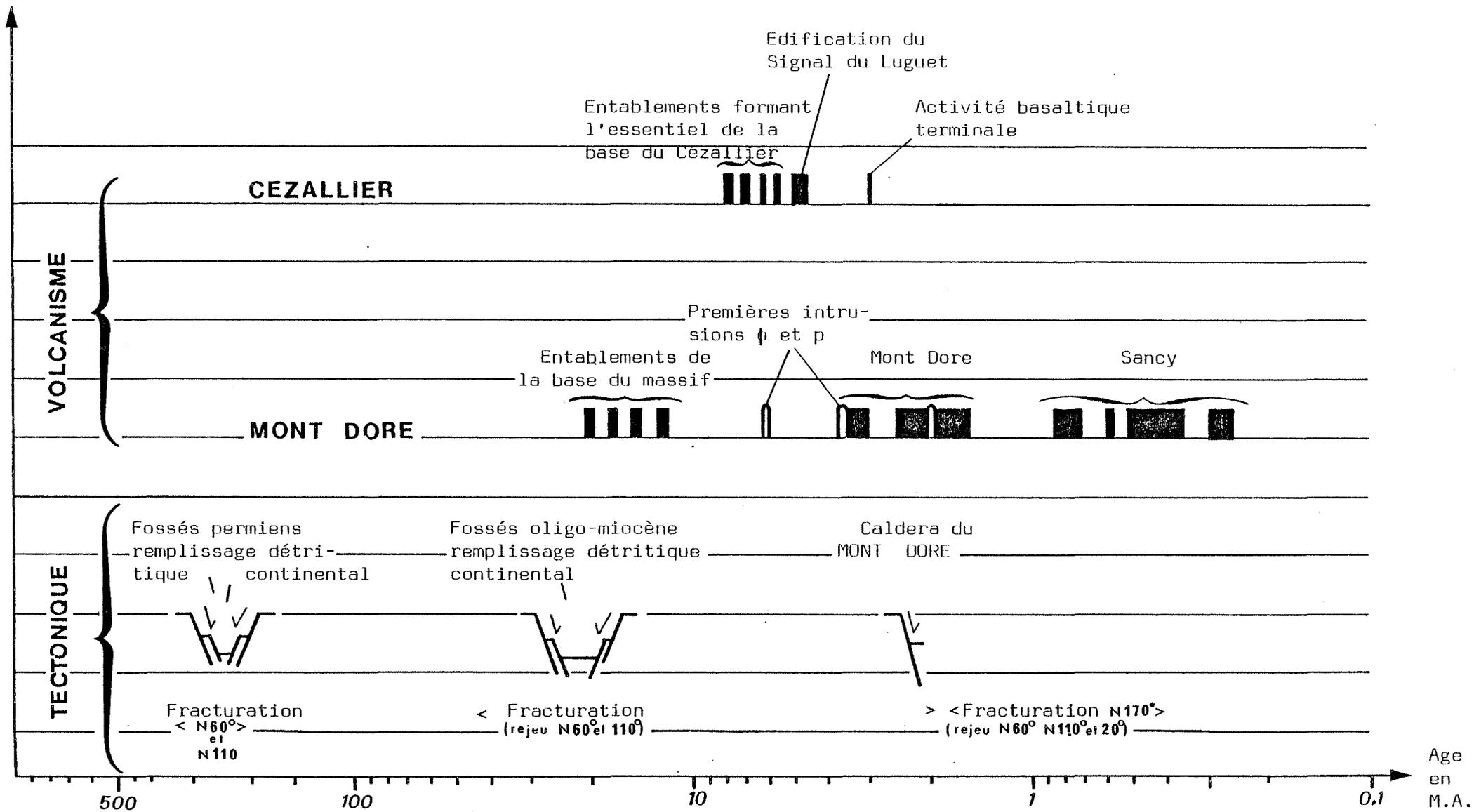


Fig. 3 - Répartition dans le temps de l'activité tectonique et volcanique de la région du Mont Dore

1.3 - CADRE GEOLOGIQUE GENERAL

Le massif volcanique du Mont Dore s'est édifié sur un socle cristallo-phyllien hercynien fracturé, granitique mais surtout gneissique et micachisteux au niveau du soubassement de la partie centrale du massif. Ce socle, fracturé à l'hercynien, à l'oligocène puis au pléistocène est découpé en un système de panneaux complexes jouant en touches de piano, créant des systèmes de horsts et graben.

Au Permien, des fossés d'effondrements étroits et profonds se sont individualisés à l'instar de celui de Sainte Sauve, immédiatement à l'ouest de la caldera. Ce bassin, large de 1 km au maximum, profond d'autant, s'étire sur plusieurs kilomètres selon un axe NE-SW. Il est rempli de sédiments continentaux cimentés provenant de l'érosion du socle grès, conglomérats...

L'Oligocène se marque dans le Massif Central par une succession de fossés d'effondrement que l'on retrouve sur toute la périphérie du Mont Dore. Comme pour le bassin permien de Sainte Sauve, ils sont sensiblement aussi profonds que larges (plusieurs centaines voire un millier de mètres), remplis de sédiments détritiques continentaux plus ou moins consolidés. De tels fossés, profonds et étroits, pourraient exister sous la caldera centrale du Mont Dore.

Les premiers épisodes du volcanisme se manifestent avec la fracturation oligocène, formant des entablements basaltiques de base du Mont Dore et du Cézallier (fig. 3). La reprise de la construction de l'édifice du Mont Dore se marque par une importante activité explosive produisant plus de 100 km³ de ponces et de cendres que l'on retrouve encore à plusieurs dizaines de kilomètres du centre sur de grandes épaisseurs ; leur vidange est à l'origine de l'effondrement de la caldera centrale qui s'emplit elle aussi de ces produits pyroclastiques et disparaît en partie sous ces produits. Les phases effusives qui vont suivre cachètent ces énormes dépôts friables et les protègent de l'érosion. Les phases tardives de l'activité du Mont Dore vont reprendre dans la région du Sancy de nouveau par une production importante de pyroclastites s'étalant largement sur tout le massif ; elles seront elles aussi recouvertes en partie par des coulées tardives. Mais l'érosion attaque rapidement ce nouveau relief, creuse les coulées et attaque le soubassement friable au possible : la Dordogne creuse ainsi très rapidement sa haute vallée dans les pyroclastites nouvelles et anciennes accumulées dans la caldera, reprenant l'ancienne morphologie de creusement déjà amorcée dans la fosse, et déjà conditionnée par les grandes lignes tectoniques hercyniennes et oligocènes.

Tout récemment, l'activité volcanique a repris tout le long de la bordure Est du Mont Dore par des petites émissions de basaltes fissuraux mais elle s'est essentiellement développée au nord de ce volcan, construisant la chaîne des Puys.

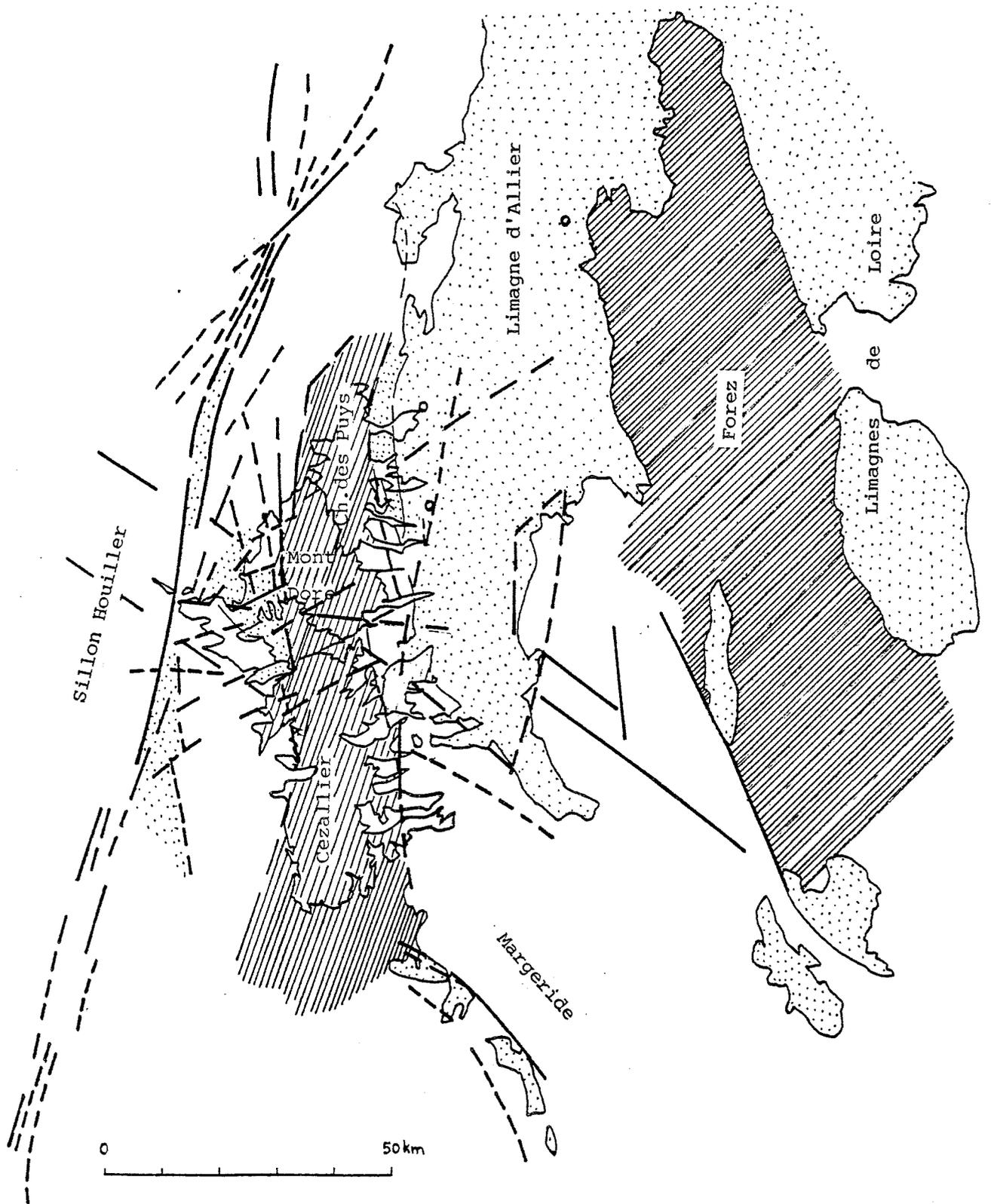
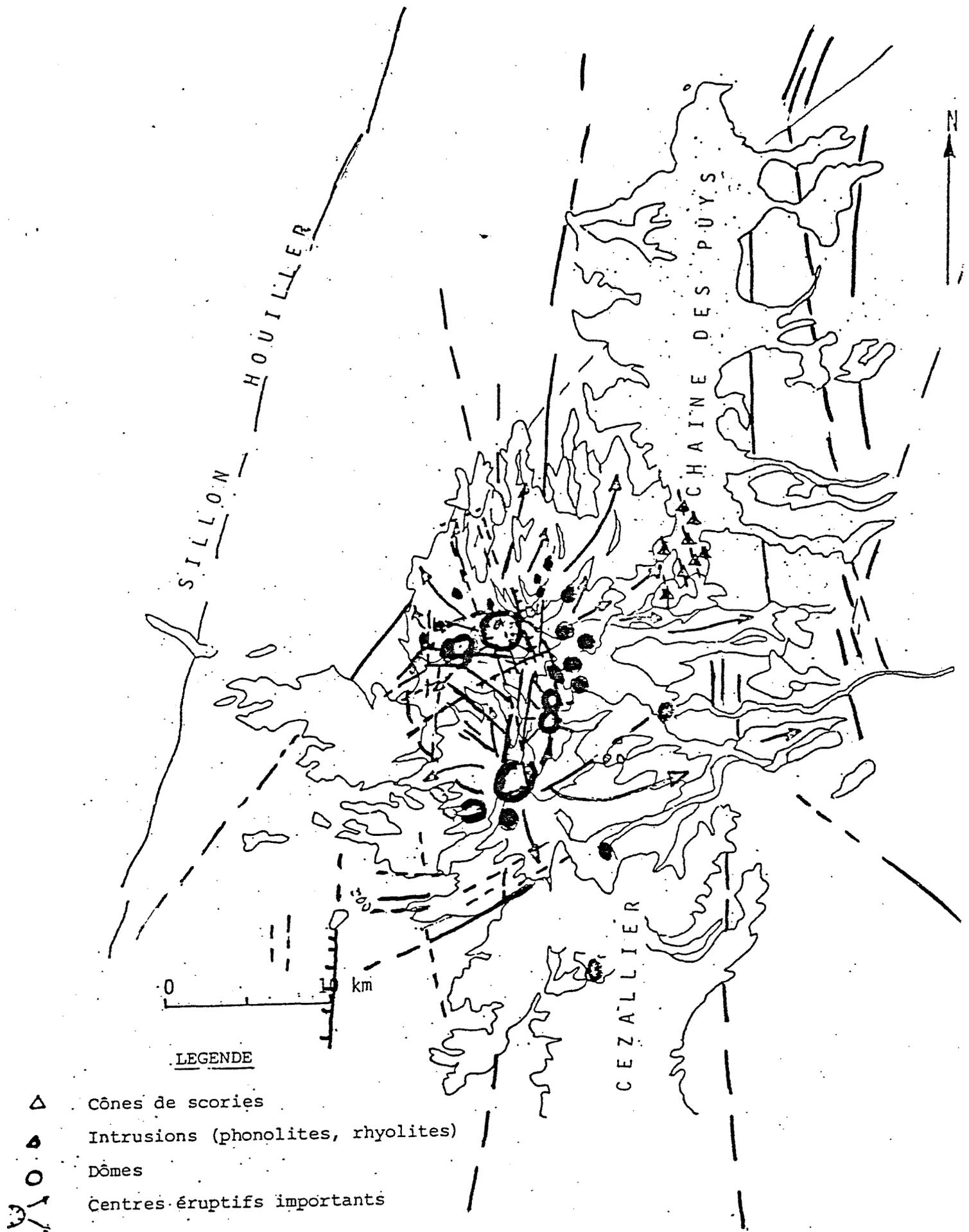


Fig. 4 LINEAMENTS DU SOCLE CRISTALLIN.

-  Zones de horsts
-  Zones effondrées



LEGENDE

- △ Cônes de scories
- Intrusions (phonolites, rhyolites)
- Dômes
- Centres éruptifs importants

fig. 5 - TECTONIQUE ET CENTRES EMISSIFS ASSOCIES DANS LE MASSIF DU MONT DORE

1.4. - CONTEXTE STRUCTURAL

Alors que l'on ne connaissait qu'extrêmement peu de choses sur la tectonique dans le Mont Dore, on a pu mettre en évidence la fracturation normale du socle en jeu complexe d'effondrements par panneaux, et faire la relation entre les phases du volcanisme et la fracturation.

Le massif volcanique du Mont Dore s'est édifié sur la bordure occidentale d'une grande zone en horst individualisée à l'oligocène qui commence sous la Chaîne des Puys au nord et se poursuit au sud sous le Cézallier. Ce horst est décalé par les anciennes failles hercyniennes qui ont rejoué sous l'effet des contraintes oligocènes et pléistocènes (fig. 4). Le volcanisme mont-dorien s'est mis en place souvent à l'intersection de ces grandes directions du socle où des magmas ont pu se piéger et évoluer, ce qui a conduit à l'édification en strato-volcan. L'effondrement central de la caldera reprend et combine généralement les directions hercyniennes et oligocène.

Quatre directions anciennes du socle ont été mises à jour dans le massif : les directions hercyniennes N 60° et N 110°, la direction oligocène N 20° et la pléistocène N 170° (fig. 5). Les deux directions paléozoïques affectent bien évidemment le socle ancien mais rejouent sous l'effet des tectoniques plus récentes : le volcanisme s'exprime parfois à leur intersection avec les directions plus récentes ; elles sont soulignées par des sources thermales ou minérales (thermes de la Bourboule, de Saint Nectaire). Les bassins permien s'installent sur les effondrements liés à ces failles.

La direction oligocène N 20° a joué en distension ; c'est elle qui conditionne principalement la tectonique régionale en horsts et grabens. Elle a guidé par ailleurs l'essentiel de la montée des premières phases du volcanisme du Mont Dore et les intrusions phonolitiques. L'effondrement central de la caldera a par ailleurs largement repris cette direction oligocène, en particulier sur son rebord est. Des sources minérales et thermales jalonnent ces directions (thermalisme du Mont Dore). Cette direction rejoue en cisaillement sous l'effet de la tectonique pléistocène.

La direction pléistocène N 170° joue en distension et est responsable de l'alimentation des phases tardives du volcanisme : massif du Sancy, volcanisme tardif de la bordure est de la caldera, Chaîne des Puys. Elle fait rejouer en cisaillement les failles hercyniennes et oligocène, et les réactive donc jusqu'à l'époque actuelle. Cela se manifeste par l'activité minérale et thermique le long de l'ensemble de ces directions cassantes.

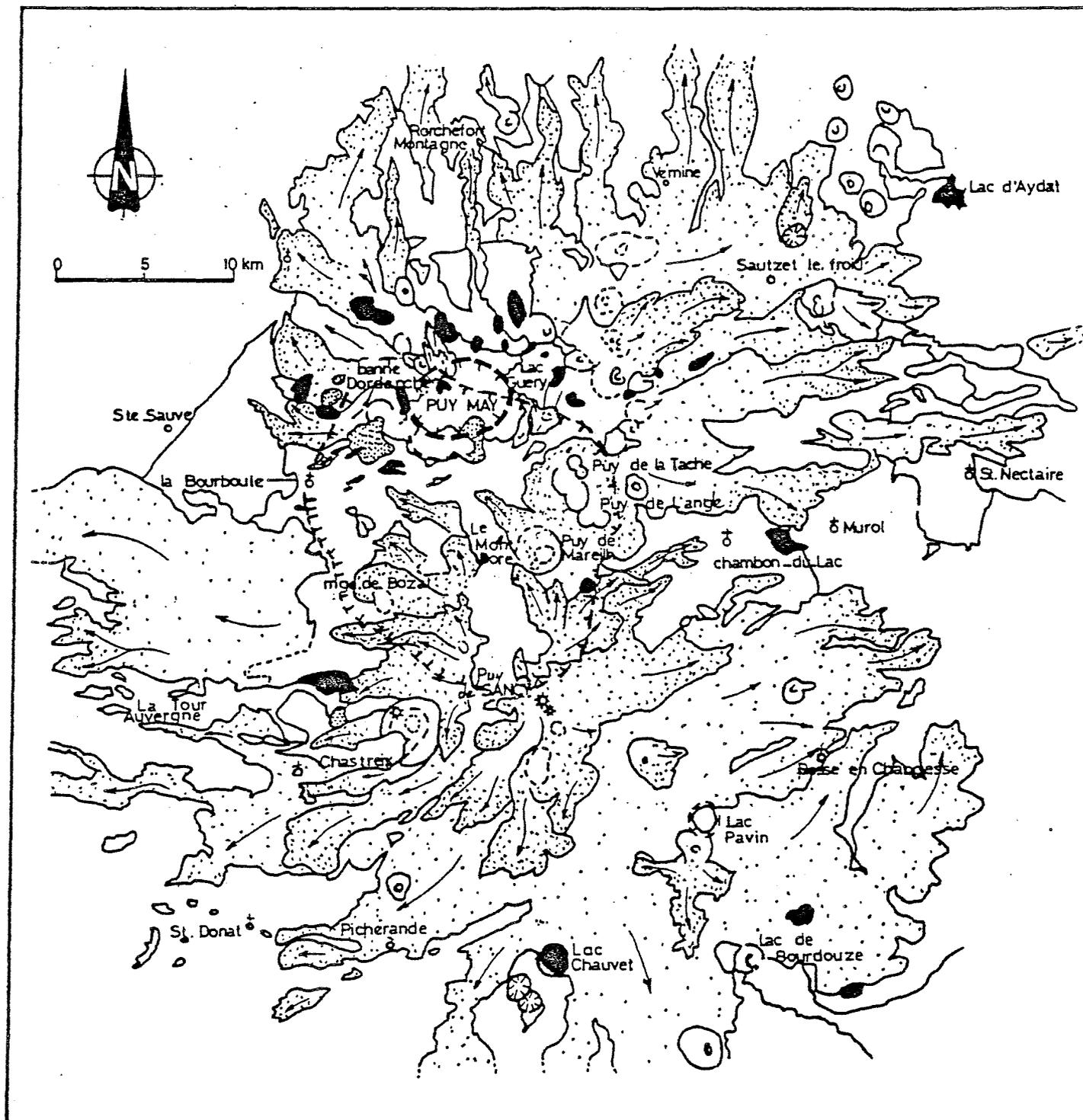


fig. 6 - Schéma volcanologique du strato-volcan du Mont Dore

Les centres émissifs anciens (2,1 à 1,7 MA) de la bordure N (Puy May,...) ainsi que celui du Sancy (0,8 à 0,2 MA) déversent des coulées à l'intérieur de la caldera déjà individualisée vers 2,2 MA.

1.5. - LA CALDERA CENTRALE ET SON REMPLISSAGE

Son existence a été suggérée par les études géologiques, qui ont démontré l'absence du socle à l'affleurement sous la couverture volcanique de la partie centrale, puis par des études électriques CGG (1960). Des mesures de gravimétrie (1962) ont permis d'en ébaucher les limites qui isolent une caldera d'environ 60 km².

L'effondrement de la caldera s'est effectué après la vidange rapide du sommet du réservoir magmatique par l'émission de ponces. Cet effondrement a essentiellement réutilisé les fractures préexistantes qui rejouent verticalement. On retrouve donc au centre du massif une fragmentation normale profonde extrêmement marqué avec des rejets allant jusqu'à plusieurs centaines de mètres, imbricant étroitement de façon complexe des panneaux découpés suivant des fragments des directions hercyniennes N 60° et N 110° et de la direction oligocène N 20°.

Les contours de la caldera peuvent être dessinés au moyen de divers critères :

- géographique tout d'abord, car la ligne de crête limitant la haute vallée de la Dordogne (ligne de partage des eaux, fig. 2) correspond aux reliefs volcaniques mis en place dans l'histoire récente du massif volcanique ;

- volcanique ensuite, car les centres émissifs les plus récents ont été mis en place le long des failles bordières de la caldera. Les dômes phonolitiques en particulier, marquent bien la bordure Nord, tandis que les centres d'émissions trachy-andésitiques marquent la bordure Est et Sud ;

- l'observation directe de ses failles bordières est toutefois impossible, sauf côté Ouest, car elle s'est individualisée tôt dans l'édification du massif (vers 2,2 MA) après l'émission d'un très grand volume de ponces que l'on retrouve sur la périphérie du massif et probablement dans le fond de la fosse. Les coulées des centres volcaniques de la bordure Nord et celles du Sancy s'y déversent, ainsi que le montre l'étude volcanologique (fig. 6).

Le remplissage volcanique est donc assuré par la première génération de ponces dont l'extension a suscité l'effondrement, puis par les coulées et intrusions de la phase 2,5-1,5 MA avec leur cortège de pyroclastites qui affleurent dans la fosse, recouvertes partiellement par les coulées du Sancy. Ce remplissage se superpose aux formations antérieures constituées par les entablements basaltiques des phases précoces oligomiocène qui s'épanchent sur le socle et sur les bassins oligocènes et éventuellement permien, profonds de plusieurs centaines de mètres au millier de mètres, remplis par des sédiments détritiques continentaux.

La coupe synthétique schématique illustre ce remplissage (fig. 7).

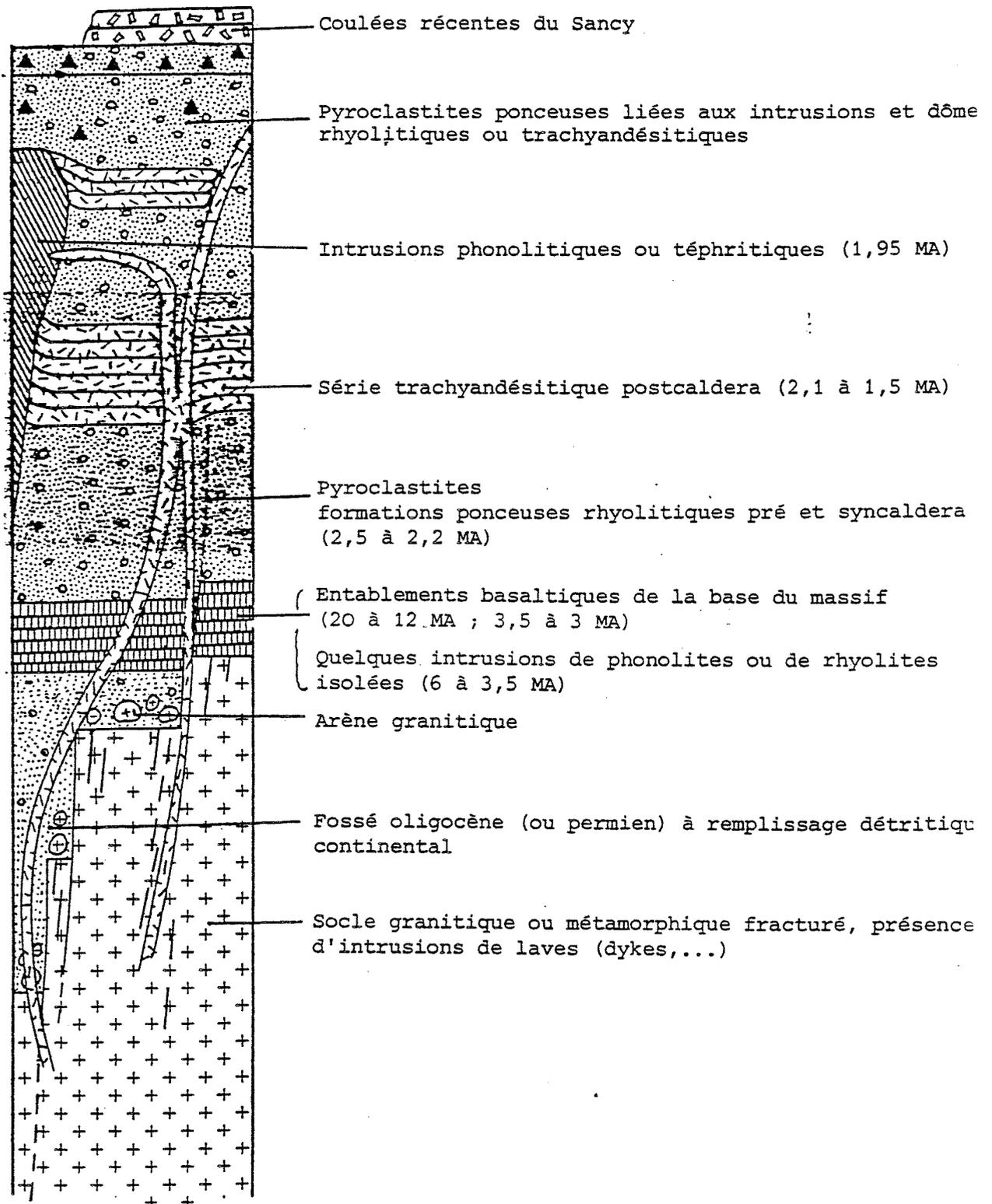


fig. 7 - Coupe synthétique du remplissage de la caldera centrale du strato-volcan du Mont Dore

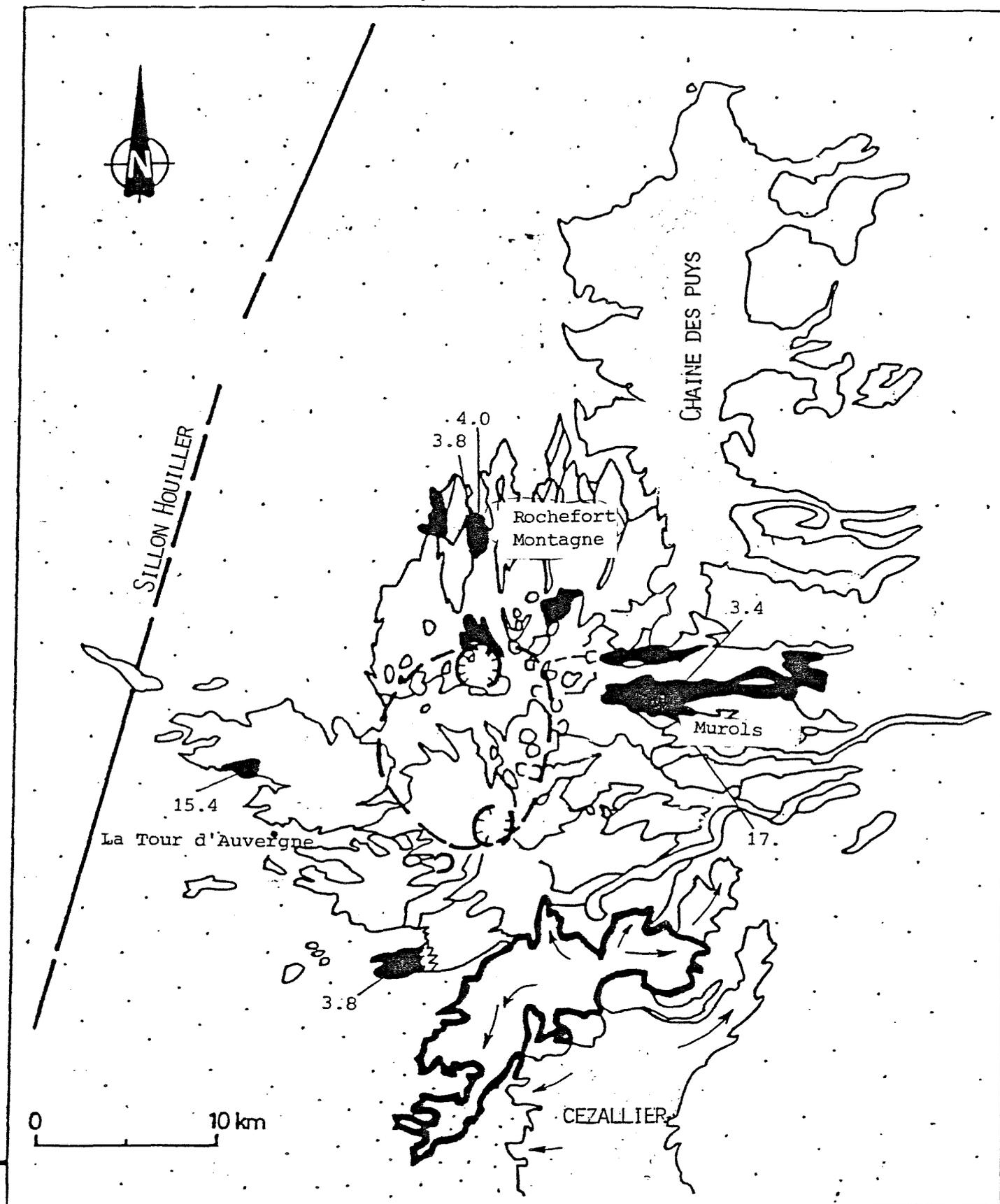


fig. 8 REPARTITION DES COULEES BASALTIQUES
DU MONT-DORE D'AGE PRE-CALDERA (> 3,0 MA)

3.8 : age K/Ar

 Coulées pré-caldera

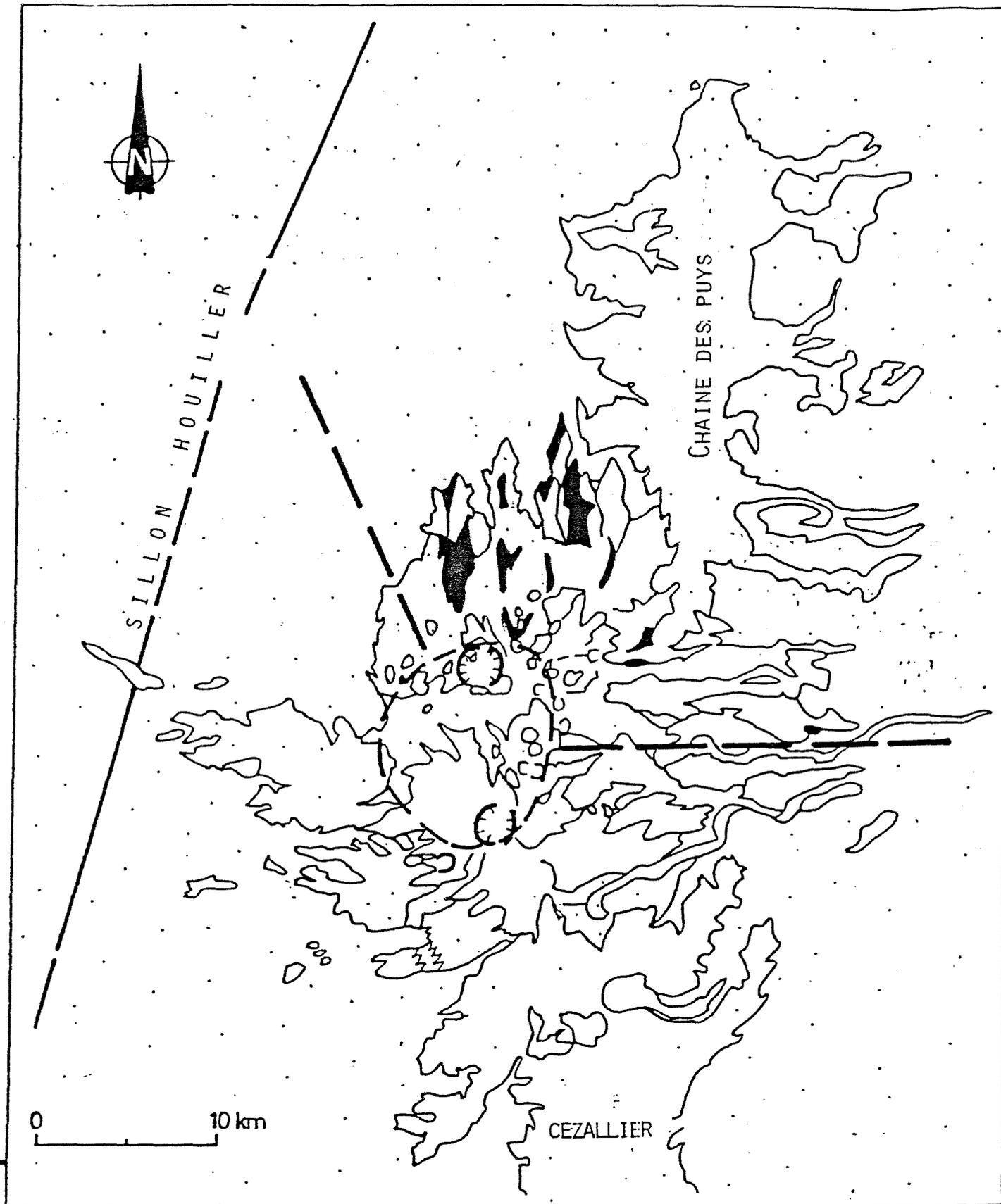


fig.9 REPARTITION DES PONCES RHYOLITIQUES (2,5 à 2,2 MA, estimé)

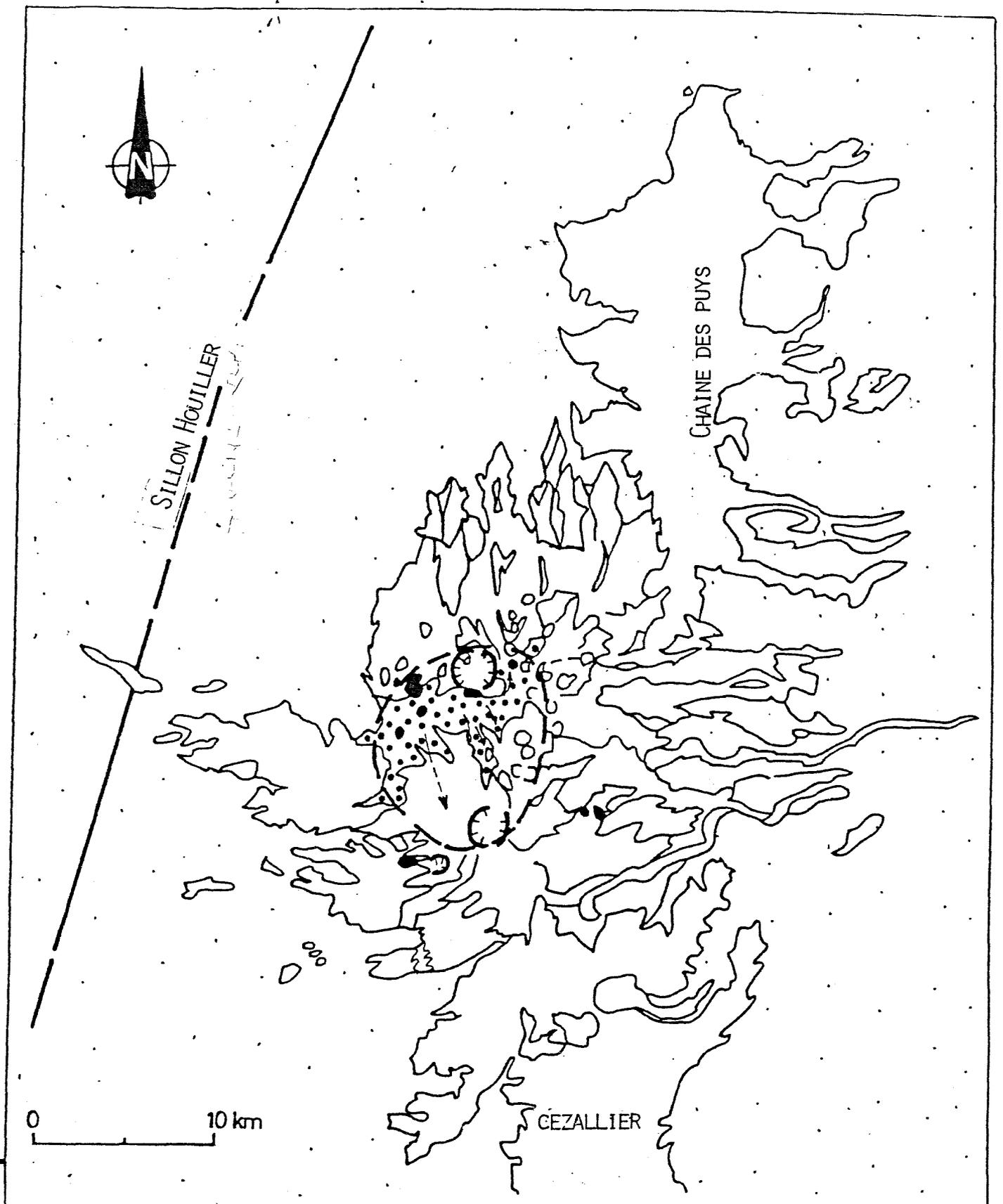


Fig. 10 REPARTITION DES RHYOLITES ET DES PYROCLASTITES DIVERSES POST-CALDERA ($< 2,2$ MA)
Celles-ci sont essentiellement cantonnées à l'intérieur de la fosse .

-  : Limite de la fosse.  : Pointement rhyolitique
-  : Ponces et cendres rhyolitiques.



DE :



Contours caldera



2.1

Coulées affleurant et age

Extension supposée des coulées recouvertes par le volcanisme plus récent.

fig.11 COULEES BASALTIQUES POST-CALDERA ENTRE 2,1 & 1,4 MA

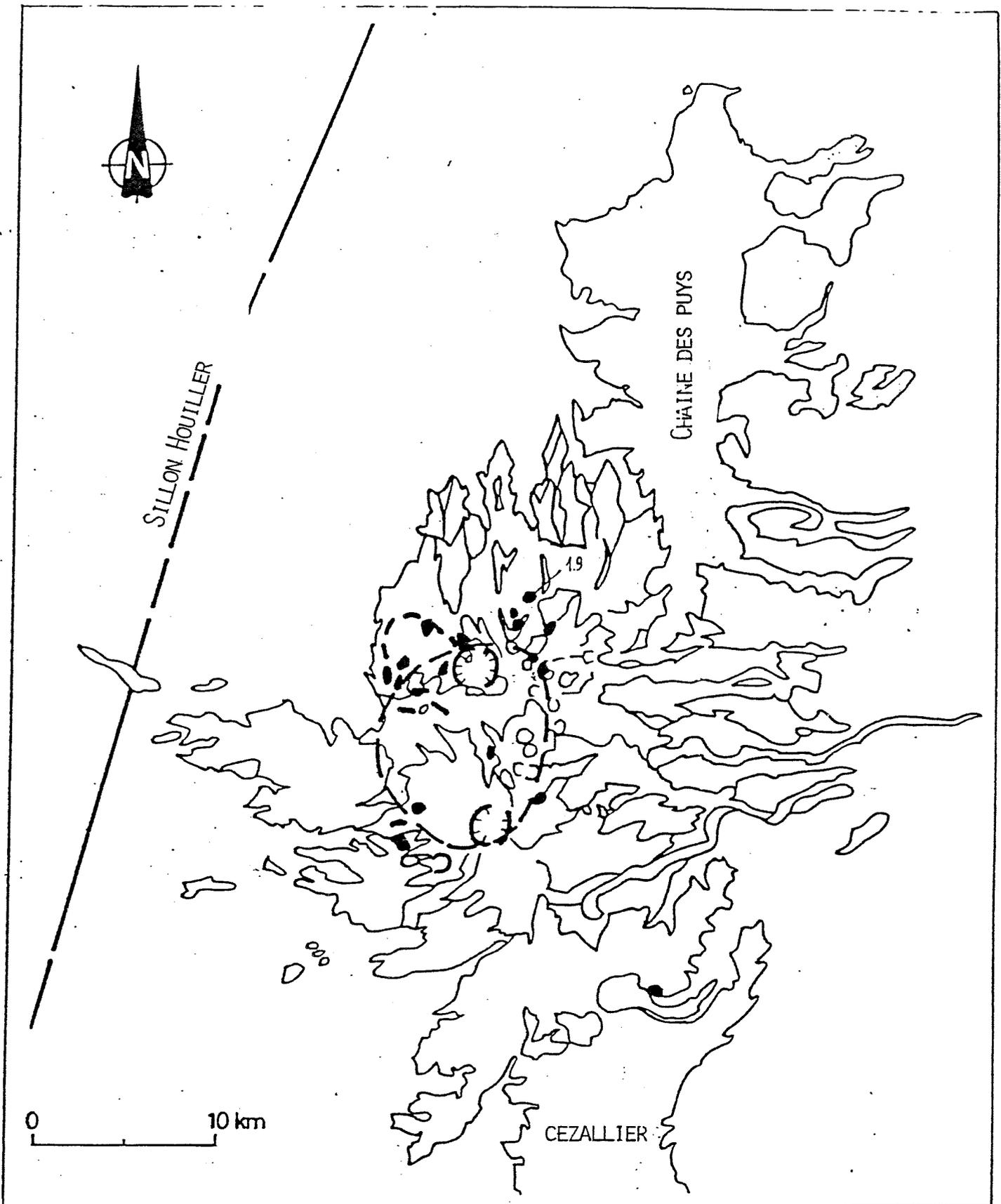


Fig : 12

REPARTITION DES PHONOLITES D'AGE POST-CALDERA (env. 1,9 MA).

Ces phonolites criblent une bande Nord-Sud du massif traversant la fosse, elles affleurent aussi bien dans le socle granitique à l'extérieur de la fosse qu'à travers l'épais remplissage de celle-ci. Leur nombre, beaucoup plus important au Nord qu'au Sud, semble plutôt lié au non-recouvrement par les épisodes volcaniques ultérieurs.

Légende :

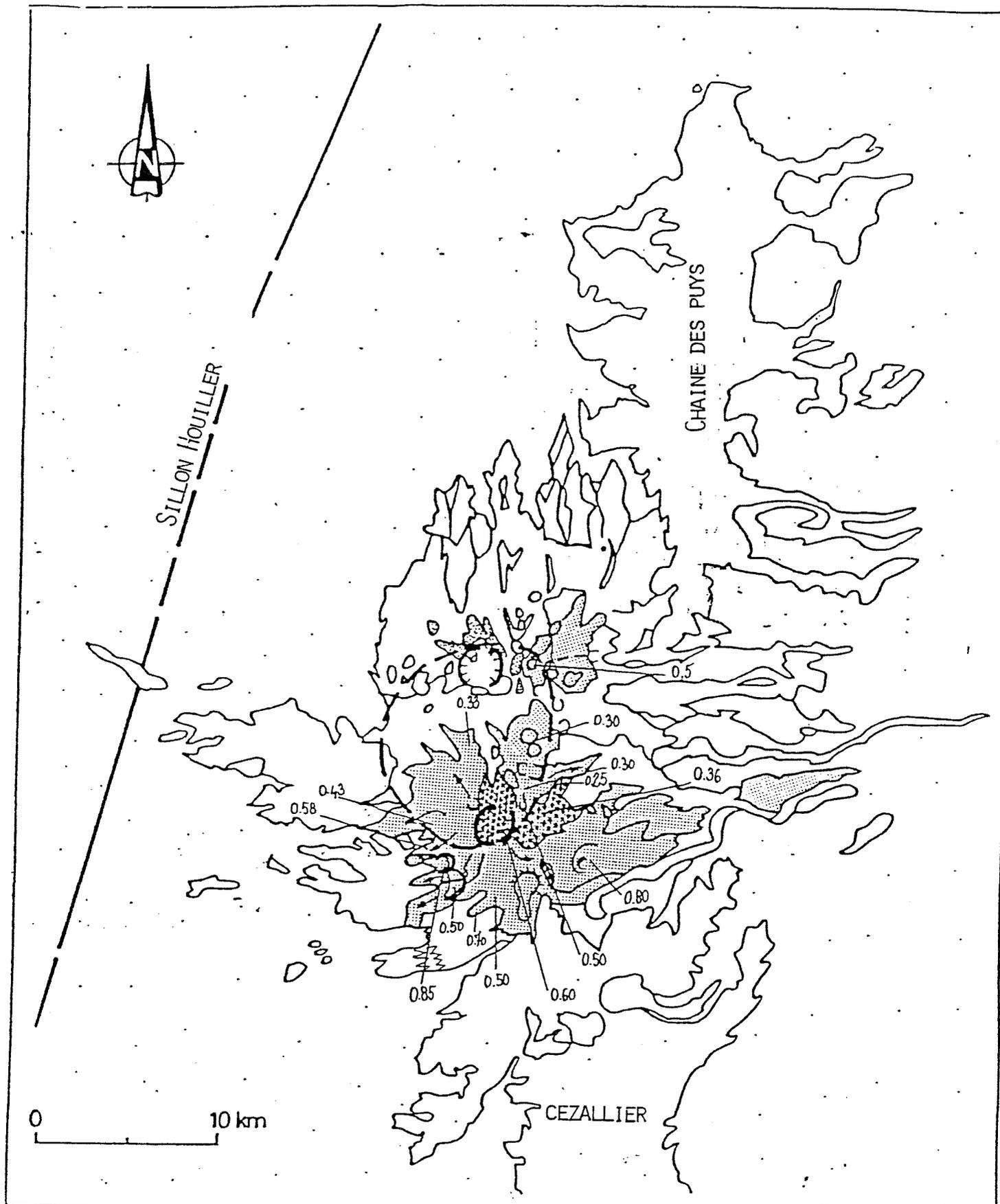


Contours de la fosse

19



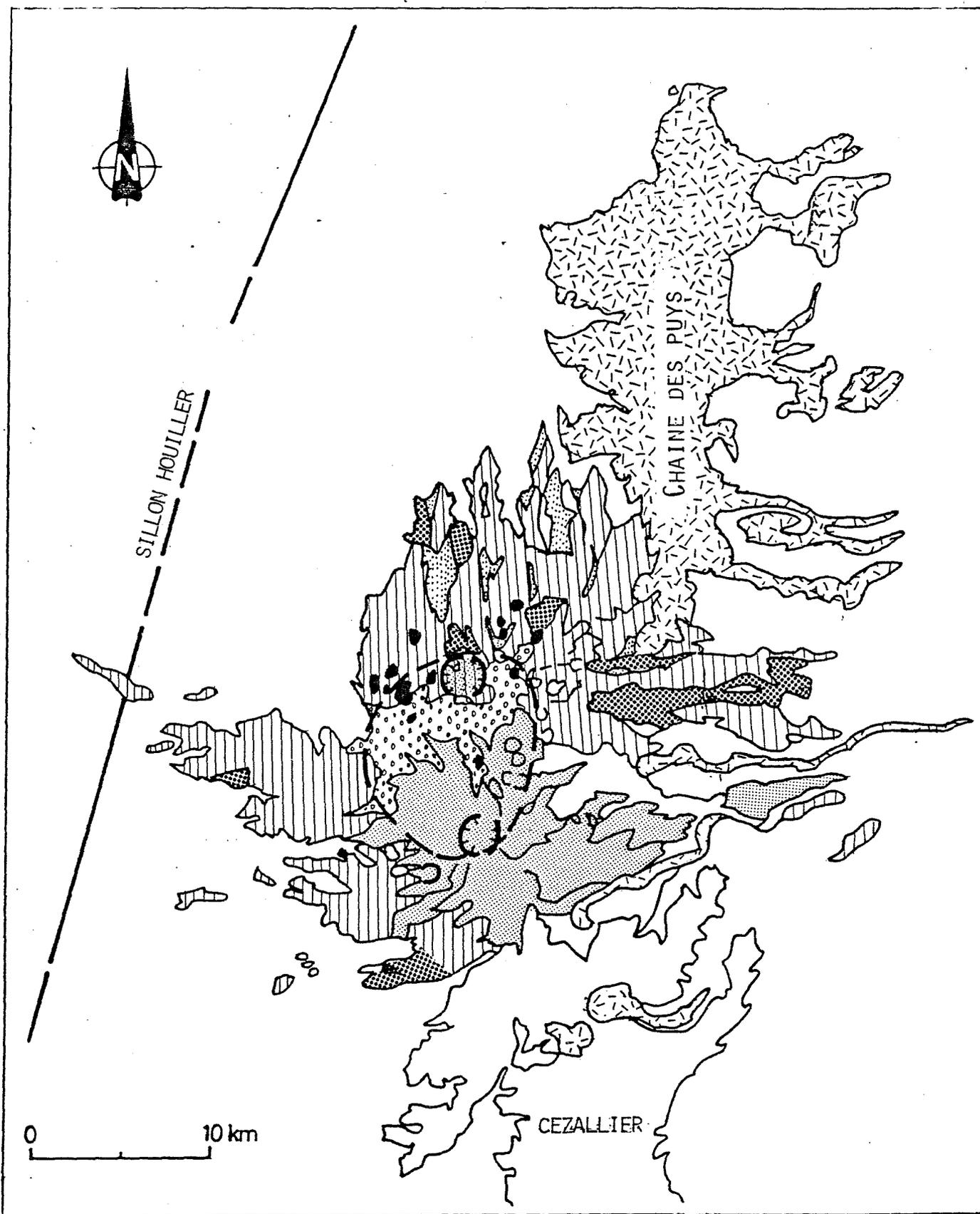
Phonolite et âge



LEGENDE: 0.35 : Volcanisme du Sancy et age. : Centre éruptif
 ☼ : Dome

fig. 13 ACTIVITE BASALTIQUE RECENTE (< 0,85 MA) LOCALISE AU MASSIF DU SANCY .

Les centres émissifs se situent autour du Puy de Sancy et sur des crêtes de part et d'autre de la vallée de la Dordogne .



Synthèse des fig. 8 à 13 - (voir détail de ces figures à la fin du texte)

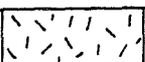
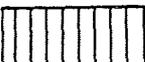
- | | | | |
|---|---|--|-------------------------------------|
|  | Volcanisme subactuel de la Chaîne des Puys (< 0,01 MA). |  | Volcanisme du Sancy (< 0,85 M.A.) |
|  | Dômes, coulées post-caldéra (2,1 à 1,4 M.A.) |  | Intrusions } post-caldéra
Ponces |
|  | Ponces syncaldéra (entre 2,5 et 2,2 M.A.) |  | Coulées pré-caldéra. (> 3 MA). |

Fig. 14

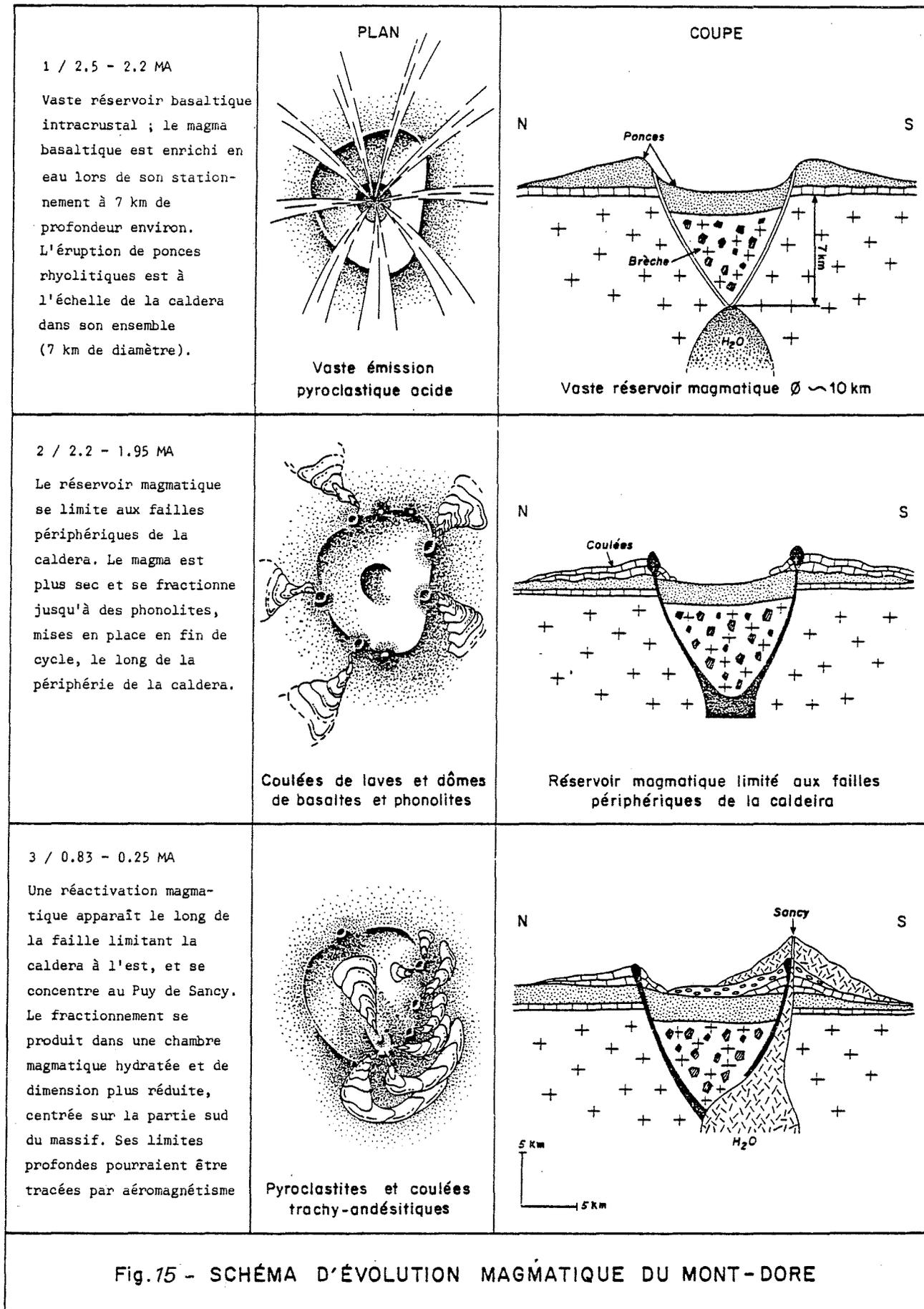


Fig.15 - SCHÉMA D'ÉVOLUTION MAGMATIQUE DU MONT-DORE

1.6 - HISTOIRE VOLCANOLOGIQUE, GEOCHRONOLOGIQUE ET MAGMATOLOGIQUE DU

MONT DORE

Le massif du Mont Dore n'est pas un strato-volcan central simple, mais a suivi toute une évolution allant d'émissions fissurales vers l'organisation d'ensembles évoluant indépendamment dans l'espace et dans le temps en fonction du contexte volcano-tectonique. On trouve donc une superposition d'ensembles bien distincts en âge, en nature magmatique en contexte géographique.

L'histoire volcanologique et géochronologique est résumée dans la succession des événements présentée dans les figures 8 à 13 :

1) coulées basaltiques et basanitiques fissurales, formant les entablements du massif. Une première génération se met en place au miocène entre 20 et 12 MA, en liaison avec les contrecoups de la fracturation oligocène. Une seconde génération marque une reprise d'activité tectonique et les prémices du volcan du Mont Dore entre 3,5 et 3 MA. Entre ces deux générations, une évolution magmatique profonde a permis la remontée de quelques phonolites et rhyolites, entre 6 et 3,5 MA.

2) explosions de ponces rhyolitiques entre 2,5 et 2,2 MA qui s'étaient en vastes nappes sur une dizaine de km autour du centre du massif. Une caldera se forme alors ; des rhyolites, magma originel des ponces, viennent en intrusions sur les bordures de la caldera.

3) coulées de basaltes et produits différenciés très variés de la série alcaline allant jusqu'à des benmoreites (ordanchites) et des trachytes, elles affleurent essentiellement au nord du massif, et ont été mises en place entre 2,3 et 1,5 MA. Un épisode bien net se marque par la sortie d'intrusions téphritiques et phonolitiques vers 1,95 MA, sans doute lié à une phase de compression sous pression d'eau. L'essentiel de ces formations est émis à partir de centres situés à la périphérie de la caldera.

4) le volcan du Sancy, centré sur le sud du massif débute à 0,83 MA et terminera son activité vers 0,25 MA. Les premières phases produisent essentiellement des pyroclastites à partir du centre du Sancy ou des centres adventifs de la bordure est et nord : cendres, coulées de ponces, nuées ardentes. Les phases terminales sont essentiellement effusives (coulées, dômes) produisant des termes pétrographiques différenciés distincts de ceux de la bordure nord allant jusqu'aux hawaïtes et benmoreïtes (doréites, sancyites). On trouve des termes porphyriques à plagioclases ou sanidines (sancyites) passant en continu à des termes aphyriques (doréites).

La diversité des produits pétrographiques dans le Mont Dore est étonnante. Tout se passe comme si l'on avait une grande variété de lignées de différenciation indépendantes. Pour expliquer cette diversité, deux hypothèses avaient été avancées, l'une faisant intervenir le mélange de deux magmas, l'un basaltique subcrustal, l'autre rhyolitique crustal (L. GLANGEAUD), l'autre hypothèse faisant intervenir deux magmas distincts subcrustaux se différenciant indépendamment, l'un évoluant jusqu'à des rhyolites, l'autre jusqu'à des phonolites (R. BROUSSE). Ce mécanisme double était compliqué par une troisième série d'anatexie crustale fournissant le matériel aux nappes de ponces (R. BROUSSE et LE FEVRE).

En fait, les données plus récentes (MERVOYER, MAURY et VARET, MAURY) ont montré que l'ensemble des produits volcaniques du Mont Dore pouvait provenir d'une même source de magma basaltique alcalin unique par cristallisation fractionnée sous différentes conditions de pression partielle d'eau. Ainsi, un fractionnement sous forte pression d'eau (avec séparation d'amphibole en particulier) produit des magmas saturés (rhyolitiques), alors qu'un fractionnement à sec produit des liquides résiduels sous-saturés (phonolitiques).

On peut donc imaginer un vaste réservoir magmatique, se diverticulant en de nombreuses poches indépendantes dans les fractures des panneaux profonds du socle, évoluant indépendamment en fonction des contraintes tectoniques locales et des pressions d'eau locales. Ceci expliquerait la grande diversité des produits même dans un même cycle magmatique. Par ailleurs, on conçoit que chaque époque éruptive soit caractérisée par des modes de fractionnement différents, sous pression totale et pression d'eau variable, d'un magma basaltique alcalin d'origine subcrustale et expliquer le déplacement géographique dans le temps des centres émissifs comme résultant d'une progressive diminution de l'activité magmatique, paroxysmale et centrale autour de 2,5 MA, puis limitée aux failles périphériques de la caldera autour de 2 MA, puis finalement centrée dans l'angle Sud de la caldera entre 0,8 et 0,25 MA.

1.7 - L'ACTIVITE THERMALE ACTUELLE ET FOSSILE

L'activité thermique actuelle se réduit à quelques émergences situées à l'intérieur et à l'extérieur de la caldera, le long de fractures anciennes ou récentes : la Bourboule, le Mont Dore, Chaudesfour, Saint-Nectaire. L'ensemble de la fracturation est donc réactivé par les mouvements distensifs actuels et permet la circulation de fluides. Les systèmes de fractures sont complexes et les familles d'eaux profondes ont généralement des circuits indépendants ainsi que le montre la géochimie des sources. On peut donc considérer que chaque groupe de sources de la caldera (la Bourboule, vallée de la Dordogne, Mont Dore) correspond à un système sans relation directe avec les autres. On remarque en outre qu'ils émergent à la faveur de directions de failles distinctes (hercynienne N-60° à la Bourboule ; intersection hercynienne N-60° et N-110° dans la vallée de la Dordogne ; oligocène N-20° au Mont Dore).

L'activité thermique ou fumerolienne ancienne se marque par des dépôts de minéralisations secondaires de type zéolites ou aluns qui indiquent des anciens niveaux de circulation superficielle à des températures élevées (150°C au moins). Certains se situent à l'extérieur de la caldera au contact du socle. Nombre de ces dépôts ont été lessivés ou érodés, si bien qu'ils ne nous fournissent qu'une indication partielle de l'activité ancienne, sans toujours une indication de l'âge de cette activité.

1.8 - CONCLUSIONS GEOTHERMIQUES SUR LA BASE DES DONNEES GEOLOGIQUES

Le Mont Dore a été sélectionné comme le site a priori le plus favorable pour un développement de la géothermie haute énergie dans le Massif Central Français, car il était supposé doté d'une source de chaleur récente importante et d'une caldera contenant des formations susceptibles de constituer un réservoir géothermique.

L'étude géologique a permis :

- de limiter cette caldera, et de préciser la nature possible de son remplissage : socle cristallophyllien fracturé, formations sédimentaires volcaniques anciennes faillées, formation pyroclastique contemporaine du paroxysme ponceux, tufs et volcano-sédimentaire récent.

- de déterminer les principales phases de l'évolution magmatique, permettant de mieux connaître l'évolution de la source de chaleur : paroxysme central autour de 3 millions d'années, limitation de l'activité à la périphérie aux alentours de 2 millions d'années, reprise de l'activité sur la bordure Est puis l'angle Sud de la caldera (Puy de Sancy) il y a 250.000 ans.

- de dessiner les principales directions structurales conditionnant les fractures qui assurent probablement la perméabilité actuelle des réservoirs profonds.

- de préciser les caractéristiques du système hydrothermal convectif, qui est contrôlé par les fractures et les failles bordières de la caldera.

L'étude géologique ne permet pas à elle seule de déterminer le site le plus favorable pour un forage profond.

Elle permet de préciser que celui-ci doit être implanté à l'intérieur de la caldera au voisinage d'un réseau de fractures, et de préférence sur les parties Sud ou Est. Seul l'usage de méthodes géophysiques permet de caractériser la structure profonde de la caldera, et de fixer en définitive, l'implantation du forage.

La géologie nous fournit des indications qui conditionnent la stratégie de l'étape suivante : la complexité lithologique du remplissage, l'absence des fractures et des circulations hydrothermales rendrait tout forage de gradient d'une interprétation délicate, voire dangereuse, avant de passer au forage profond.

Seul un forage visant à atteindre les zones profondes, brechiques ou fracturées de la zone centrale et profonde de la caldera devrait permettre d'atteindre un objectif d'intérêt géothermique industriel (température supérieure à 150°C).

2. - GEOCHIMIE

2.1. - PRESENTATION DES TRAVAUX

24 sources minérales chaudes ou froides du massif ont été étudiées en détail. Cette étude avait pour but d'obtenir le maximum de données concrètes pouvant être utilisées pour une prospection aboutissant à une stratégie de forage, c'est-à-dire, répartition dans l'espace des réservoirs, circuits des fluides, mélanges, température des eaux en profondeur.

A cette étude menée par le B.R.G.M. s'ajoutent des données obtenues par le laboratoire de géochimie des eaux de PARIS VI (Thèse FOUILLAC, 1980) et par le laboratoire du C.E.A.

Cette étude a été menée en trois phases principales :

- sur le terrain, la température, le pH de la réserve alcaline ont été mesurés. On a ainsi réalisé des prélèvements pour l'analyse des ions majeurs et traces, des prélèvements pour l'analyse des gaz et les dosages isotopiques.

- dans un laboratoire temporaire situé à proximité des sources on a dosé la silice dissoute.

- les dosages d'éléments conservatifs ont été réalisés dans les trois mois qui ont suivi le prélèvement, soit à Orléans (MGA-BRGM), soit à Paris (Laboratoire de géochimie des Eaux Paris VII)

On a ainsi dosé sur chaque échantillon

Li, Na, K, Ca, Mg, Mn, Fe, Sr

par absorption atomique de flamme

F^- Cl^- $SO_4^{=}$

par potentiométrie

Rb^+ Cs^+ Al Ba

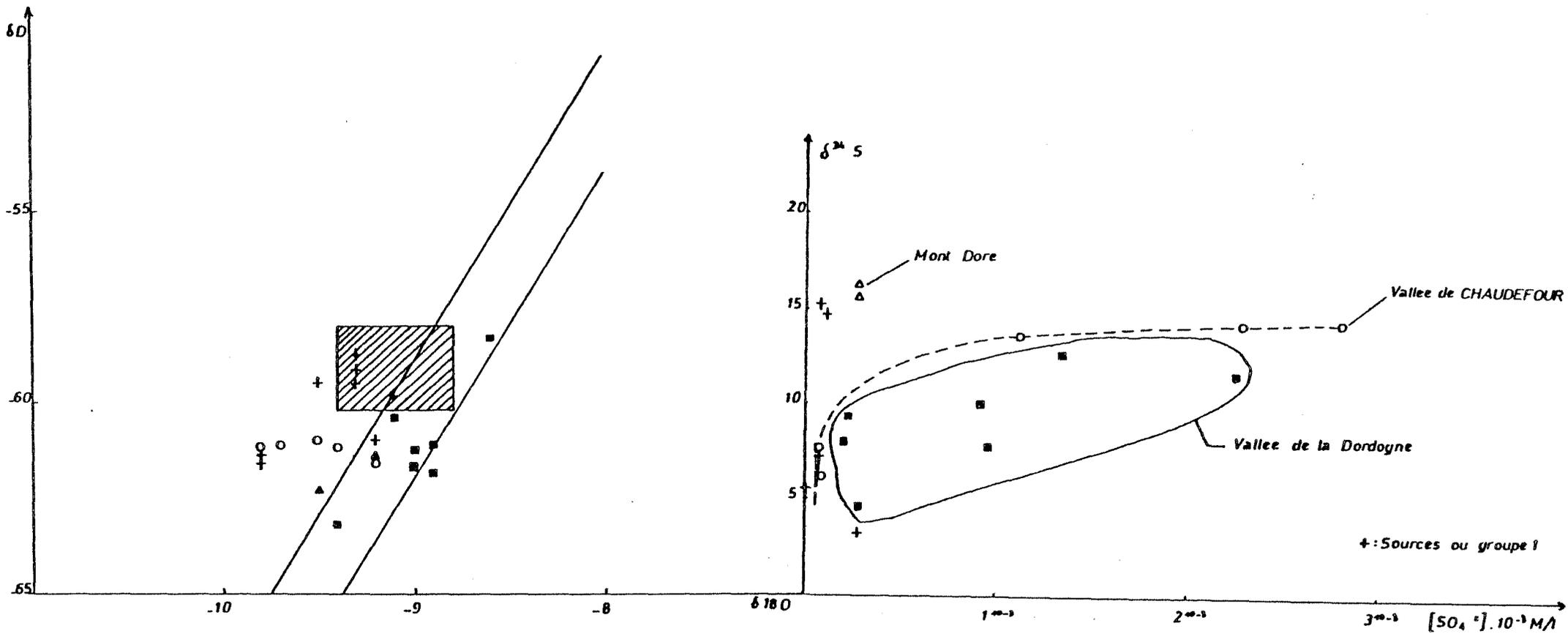
par absorption atomique sans flamme

Br^- a été mesuré par activation neutronique (Laboratoire Pierre Sue Saclay).

Les gaz CO_2 N_2 O_2 CH_4 He Ar ont été mesurés par C.P.V. (MGA/BRGM et CEA)

Les rapports isotopiques δD $\delta^{18}O$ de l'eau, $\delta^{13}C$ des différentes espèces du Carbone $\delta^{34}S$ des sulfates ont été mesurés (Section isotope du MGA).

Les résultats obtenus sont regroupés dans les tableaux 1, 2, 3, 4 ; les eaux numérotées de 1 à 24 correspondent aux appellations du tableau 5



- † Sources ou groupe 1
- Vallee de chaufour et sulfureuse du Sancy(A1)
- △ Mont Dore
- Vallee de la Dordogne
- ▨ Eaux superficielles de la region

Fig. 16

2.2. INTERPRETATIONS GENERALES

2.2.1. ORIGINE DES EAUX DE SOURCES ANALYSEES

Dans un diagramme δD , $\delta^{18}O$ (fig. 16), les échantillons d'eau thermales ne montrent aucun effet isotopique. Ceci peut sembler assez conforme aux températures assez basses que nous estimons par la suite ($t \approx 150^\circ$). Il peut aussi s'agir de systèmes en grande vitesse de circulation, ou d'un déplacement du à un échange isotopique avec l'oxygène du CO_2 .

2.2.2. ORIGINE DU CARBONE

En tenant compte de toutes les espèces du carbone, de leurs teneurs dans les fluides et de leur rapport isotopiques, on peut calculer les valeurs isotopiques du carbone total. Celles-ci sont comprises entre -4 et +1 à une exception près. De telles valeurs assez peu dispersées pour de telles études peuvent indiquer une origine commune. L'identification de l'origine, magmatique ou non, pose le problème de l'état du carbone en profondeur, gazeux ou dissous. A l'heure actuelle, nous ne pouvons pas répondre à cette question.

2.2.3. ORIGINE DE L'ARGON ET DE L'AZOTE

Ce problème a été discuté en détail

LELEU, DESGRANGE Note au C.R.A.S.

On peut retenir l'origine atmosphérique de l'argon et de l'azote.

2.2.4. ORIGINE DU SOUFRE

Dans un diagramme $\delta^{34}S$, $(SO_4^{=})$ (fig. 16) on peut distinguer indiscutablement le Mont Dore des autres sources de la vallée de la Dordogne. La vallée de Chaudefour est également à part, les autres sources sont très variables. Le seul fait indiscutable qui se dégage de ces valeurs isotopiques, est que le soufre des eaux du Mont Dore a une origine différente de celle des eaux de la vallée de la Dordogne. On a vraisemblablement des roches réservoirs différentes.

2.2.5. SEPARATION DES EAUX EN DIFFERENTS GROUPES

Les compositions chimiques et les propriétés physiques des eaux analysées sont très variables. Les disparités permettent néanmoins de classer les eaux en 5 groupes relativement homogènes. Pour chacun d'entre eux, une discussion détaillée sera présentée. On peut distinguer :

- des eaux minérales froides très dispersées géographiquement
- des eaux de la vallée de la Dordogne (Mont Dore exclu)
- le Mont Dore
- la vallée de Chaudefour
- la source sulfureuse du Sancy

2.3. - INTERPRETATIONS PAR GROUPES

2.3.1. LES EAUX MINERALES FROIDES

Ce qui comprend les échantillons suivants :

- MDS1	Paladiroux
- MDS2	Merdançon
- MDS4	Fontpique
- MDS7	Le Vernet
- MDS8	Goyon
- MDS15	Le Bouteix
- MDS26	Collange
- MDS27	Reboisson

Les températures sont basses ($t. < 12^\circ$), la minéralisation et les débits sont faibles. Il peut s'agir :

- soit de mélanges entre des eaux profondes et des quantités importantes d'eaux superficielles froides. Dans ce cas, l'importance du mélange fait craindre que la composition chimique initiale ait été très perturbée.

- soit d'eaux froides superficielles dont la minéralisation aurait été acquise par dissolution irréversible de roches, l'acidification des nappes pourrait être due à du gaz carbonique d'origine profonde.

Cette dernière hypothèse nous paraît plus vraisemblable car tous ces échantillons présentent indiscutablement des caractéristiques de basse température :

Un bas rapport Na/Ca ($\text{Na/Ca} < 1$ ou ≈ 1)

Un très bas rapport $\text{Cl}/\Sigma \text{CO}_2 < 10$

avec $\Sigma \text{CO}_2 = \text{HCO}_3 + \text{H}_2\text{CH}_3$

Il est à noter que pour tous ces échantillons la silice dissoute est très proche de l'équilibre avec la silice amorphe. Dans ces conditions, aucune estimation de température n'est possible.

Tout au plus ces échantillons peuvent ils être interprétés comme signalant l'existence d'un flux important de CO_2 sur une surface assez étendue.

2.3.2. LES SOURCES DE LA VALLEE DE LA DORDOGNE

La situation est nettement meilleure ici d'un point de vue thermométrique. Pour certaines sources (Choussy, Croizat), la silice dissoute est sous-saturée par rapport à la silice amorphe. On peut alors utiliser les différents thermomètres.



Les résultats sont donnés dans le tableau 6, on voit que l'on a une assez bonne coïncidence pour le Na/K et le Na/Li, et le quartz.

On peut alors donner une valeur moyenne à $140^{\circ} \pm 10^{\circ}\text{C}$.

A l'intérieur de ce groupe, avec les traces en Rb, Cs, As, on peut déterminer les échantillons les moins modifiés, il s'agit de Choussy Croizat, Moneyron et Felix qui présentent des caractéristiques d'eau très peu modifiée ($\text{Rb/Cs} < 2$). Ceci nous assure une assez bonne confiance dans les déterminations de température.

Pour déterminer à l'intérieur de ce groupe la zone la plus favorable pour un éventuel gazage, on peut utiliser les teneurs absolues en chlorures et les valeurs du rapport $\text{Cl}^-/\Sigma\text{CO}_2$ Mahon (1970) Fournier et Truesdell (1974) plus ces valeurs sont élevées, et plus les sources risquent d'être connectées avec les zones les plus profondes (et donc les plus chaudes). Dans cet ordre d'idée la source Croizat est la plus intéressante.

2.3.3. LE MONT DORE

Il s'agit d'échantillons MDS21 et MDS23.

Malgré leur très haute teneur en silice, et un rapport Na/K "chaud", cette région ne nous semble pas présenter des garanties suffisantes pour en faire une zone prioritaire.

En effet, la silice est très proche de la saturation avec la silice amorphe. De plus on peut montrer à l'aide de programmes de calculs que les teneurs en calcium et magnésium sont incompatibles avec les hautes températures déduites de la silice ou du rapport Na/K (respt. 180° et 220°C). Ces redissolutions lors du refroidissement, ont pu modifier toute la chimie des eaux (y compris silice et rapport Na/K). Il est à noter que les températures Na/Li conduisent à des estimations plus basses ($\approx 150^{\circ}\text{C}$).

D'autre part, il est impossible de faire dériver les eaux du Mont Dore de celles de la vallée de la Dordogne par une simple dilution. Il semble bien que l'on ait affaire à un réservoir séparé. Ceci rejoint les raisonnements sur les isotopes du soufre. Il est intéressant de noter la différence constatée sur les valeurs de tritium obtenue sur la source Saint Jean (MDS21) entre l'année 1977 (Juin) et la campagne de 1978 (Nov.).

Echantillon	Date de prélèvement	Teneur tritium
MDS21	Juin 1977	0,6 uT
MDS21	Nov. 1978	8 uT

pendant cette période, la chimie est restée constante. Ceci peut signifier l'apparition des eaux tritiées et peut conduire à admettre un temps de circulation très bref pour le Mont Dore (≈ 25 ans), sachant que la teneur de l'atmosphère en tritium a brutalement augmenté entre 1952 et 1956 à la suite d'explosions nucléaires en très haute atmosphère.

2.3.4. LA VALLEE DE CHAUDEFOUR

Les sources répertoriées MDS5 - MDS6 - MDS30 - MDS28 - MDS29 - ont été dénommées respectivement Chaufefour 1, 2, 3, 4, 5. Elles présentent des particularités très intéressantes.

- un pH très bas $5,02 < \text{pH} < 5,74$
 - une teneur en chlorure basse relativement aux sulfates
- $$0,1 < \text{Cl}/\text{So}_4 < 1$$

Ces deux propriétés nous font penser que l'on est ici en présence d'eaux du type sulfaté acide fréquentes dans les champs géothermiques actifs. Il reste alors à expliquer les relations obtenues entre les compositions chimiques des diverses sources du groupe.

- La première explication des températures et teneurs variables peut être recherchée dans un mélange entre une eau profonde sulfatée et les eaux superficielles locales. Cette explication est difficile à admettre car on n'obtient aucune corrélation entre le tritium et les différentes espèces dissoutes.

- On a suggéré la dissolution plus ou moins importante d'alunite (prof. BROUSSE) mais on n'observe pas les corrélatons qui devraient en résulter entre Sulfate et Potassium d'une part, Fer et Aluminium d'autre part.

- On peut également imaginer que les sources correspondent à des nappes superficielles (plus ou moins) traversées par des venues gazeuses (So_2 ou H_2S , CO_2). Ceci produirait effectivement l'acidification observée et occasionnerait des dissolutions, le soufre réduit peut alors être oxydé ou immobilisé sous forme de sulfure de fer par le Fe^+ des roches dissoutes.

Quel que soit le modèle, mélange à partir d'une nappe acide sulfatée, ou venues gazeuses individuelles, on a ici un système qui traduit des venues gazeuses importantes. Ceci est confirmé par l'étude de As et Br, connus pour leur comportement volatil. Les rapports Cl/As et Cl/Br que l'on peut calculer pour l'eau la plus représentative du système Chaufefour sont effectivement beaucoup plus bas que dans le reste du Massif.

	Chaufefour	Reste du Massif
Cl/As	≈ 100	400 - 2 000
Cl/Br	≈ 400	800 ⁺ 50

Thermométriquement parlant, la silice est saturée par rapport à la silice amorphe ; le rapport Na/K inutilisable, mais le rapport Na/Li donne des températures groupées entre 90 et 100° pour 4 des sources, 50° pour la cinquième.

eau	t	pH	SiO2	Ca	Mg	Na	K	SO4	Cl	HCO3
1	8.5	5.38	1.600	1.257	1.456	0.674	0.243	0.001	0.096	7.060
2	7.2	5.28	1.267	1.213	0.921	0.970	0.325	0.001	0.082	5.468
3	10.5	6.16	1.700	2.874	3.353	5.870	1.309	0.104	0.203	19.218
4	10.3	5.02	1.600	0.524	0.210	0.657	0.212	0.094	0.102	2.523
5	11.5	5.08	1.550	0.519	0.202	0.678	0.207	0.073	0.065	2.623
6	10.0	5.30	1.267	0.699	0.926	0.965	0.212	0.031	0.068	3.815
7	7.0	5.80	1.100	2.016	1.802	0.600	0.212	0.115	0.102	8.461
8	15.0	5.86	1.467	2.390	1.234	66.957	1.790	0.916	58.082	14.788
9	30.4	6.32	2.067	2.725	2.081	64.696	2.271	0.958	45.049	27.570
10	39.0	6.52	1.733	3.678	1.304	113.913	3.836	2.249	85.614	33.687
11	8.5	5.86	1.700	0.783	0.831	0.513	0.115	0.281	0.056	3.707
12	18.0	5.87	1.683	2.096	1.296	37.217	2.077	0.999	25.642	17.026
13	12.5	5.64	1.750	1.262	0.967	35.739	1.749	1.083	16.220	22.056
14	40.5	6.18	3.000	2.071	1.473	14.870	1.138	0.375	6.121	15.252
15	44.2	6.18	3.033	2.056	1.440	14.696	1.105	0.375	5.698	14.989
16	51.5	6.48	1.917	0.873	0.362	76.174	2.476	1.333	48.575	27.295
17	18.0	6.36	1.267	0.155	0.177	4.761	0.317	0.250	2.652	3.114
18	12.2	6.00	1.667	2.535	5.471	7.913	1.161	0.001	0.209	24.263
19	11.0	7.20	1.367	1.038	2.065	7.961	1.141	0.052	0.409	16.452
20	23.5	5.62	1.967	3.553	1.423	10.478	0.818	2.290	0.296	16.074
21	16.0	5.36	1.817	2.490	1.308	5.370	0.627	1.124	0.243	11.583
22	22.5	5.74	2.033	4.137	1.650	12.391	0.928	2.811	0.296	18.356
23	5.5	6.34	0.425	0.135	0.082	0.213	0.051	0.042	0.062	4.474
24	0.0	0.00	1.000	0.793	0.518	0.865	0.146	2.394	0.846	0.000

Tableau 1 - TENEUR EN ION MAJEUR, EXPRIMEE EN 10^{-3} MOLES/LITRE

eau	E	F	Al	Li	Pb	Cs	Ba	Sr	Fe	Mn	As
	*	*	**	*	**	**	**	*	*	*	**
1	0.0	0.00	1.22	0.00	0.92	0.00	0.16	0.90	0.86	0.03	0.16
2	0.00	0.00	4.41	0.01	0.00	1.30	0.44	0.00	0.10	0.05	0.44
3	0.04	0.02	1.58	0.12	5.00	50.80	0.00	0.01	0.23	0.01	0.05
4	0.00	0.02	24.60	0.00	0.25	2.50	0.85	0.00	0.37	0.03	0.05
5	0.00	0.02	26.40	0.00	0.26	3.00	0.79	0.00	0.32	0.03	0.14
6	0.00	0.01	2.56	0.01	0.00	1.00	0.59	0.00	0.49	0.01	1.38
7	0.00	0.00	0.57	0.02	0.29	1.00	1.89	0.00	0.17	0.03	0.06
8	0.92	0.01	0.09	0.89	8.17	49.00	0.13	0.06	1.59	0.07	20.90
9	0.83	0.04	0.01	0.79	7.10	68.00	1.37	0.04	0.03	0.00	30.60
10	1.29	0.09	0.00	1.80	22.60	1640.00	2.21	0.09	0.01	0.01	134.00
11	0.00	0.00	5.04	0.00	0.25	0.00	0.86	0.00	0.27	0.01	0.00
12	0.37	0.04	1.14	0.36	3.94	8.00	1.92	0.03	0.11	0.02	28.10
13	0.41	0.03	0.23	0.40	3.42	17.00	1.10	0.01	0.04	0.00	34.80
14	0.18	0.03	0.20	0.17	0.00	62.40	2.36	0.01	0.05	0.01	5.10
15	0.18	0.03	0.24	0.17	3.00	64.20	2.51	0.01	0.08	0.01	9.00
16	0.92	0.27	0.19	0.84	15.75	1010.00	4.95	0.04	0.01	0.00	74.30
17	0.07	0.05	0.08	0.06	0.92	9.40	0.17	0.00	0.08	0.02	6.60
18	0.00	0.02	2.07	0.18	2.20	14.70	13.00	0.01	1.58	0.01	0.30
19	0.00	0.03	2.08	0.13	2.31	3.00	0.00	0.00	0.67	0.00	0.90
20	0.00	0.01	0.15	0.05	1.49	40.00	0.80	0.04	0.17	0.02	2.80
21	0.00	0.01	2.40	0.02	1.10	23.80	0.92	0.02	0.35	0.04	0.84
22	0.00	0.01	0.10	0.05	1.71	40.00	0.56	0.05	0.07	0.01	2.18
23	0.00	0.01	113.00	0.00	0.00	40.00	0.00	0.00	0.09	0.01	0.00
24	0.00	0.03	0.00	0.01	0.26	16.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.87

Tableau :Analyse des elements traces, en 10^{-6} moles/litre (**); (*) 10^{-3} moles/litre

Tableau 2 : TENEURS EN ELEMENTS TRACES

eau	CO2	CH4	Ar	O2	N2
1	4.84E-02	3.20E-06	4.31E-06	0.00E 00	2.26E-04
2	4.96E-02	2.56E-05	3.08E-06	4.80E-05	1.92E-04
3	2.47E-02	1.27E-05	7.99E-06	1.20E-04	3.32E-04
4	4.50E-02	3.41E-05	1.14E-05	1.77E-04	7.86E-04
5	4.56E-02	1.21E-05	3.20E-06	5.50E-07	1.73E-04
6	5.12E-02	1.21E-05	2.47E-06	1.43E-04	1.16E-04
7	3.82E-02	1.64E-05	4.83E-06	1.23E-04	2.19E-04
8	1.71E-02	2.01E-06	9.93E-06	5.06E-03	3.95E-04
9	3.13E-02	3.51E-06	2.15E-06	1.51E-05	1.27E-04
10	1.21E-02	1.03E-05	5.51E-06	8.35E-06	2.95E-04
11	5.10E-02	9.02E-06	2.58E-06	5.83E-06	1.49E-04
12	3.41E-02	5.70E-05	1.03E-05	0.00E 00	4.61E-04
13	2.92E-02	9.77E-07	9.63E-06	5.14E-04	3.59E-04
14	1.92E-02	6.43E-06	1.65E-06	0.00E 00	9.70E-05
15	1.98E-02	1.91E-06	1.53E-06	5.81E-06	7.89E-05
16	1.49E-02	6.13E-05	1.04E-05	1.53E-04	7.03E-04
17	2.23E-03	1.92E-05	1.95E-05	3.07E-05	8.78E-04
18	3.28E-02	1.44E-05	4.67E-06	1.19E-04	2.35E-04
19	4.08E-02	2.50E-05	4.08E-06	6.23E-04	1.88E-04
20	0.00E 00				
21	2.67E-02	6.68E-07	7.29E-06	1.20E-04	4.69E-04
22	2.27E-02	5.60E-07	2.72E-06	7.89E-05	1.38E-04
23	0.00E 00				
24	0.00E 00				

tableau 3 : gaz dissous en mole/litre

eau	3H	δD	$\delta^{18}O$	$\delta^{34}S$	$\delta^{13}C.HO_3$	$\delta^{13}C.CO_2$	$\delta^{13}C.CH_4$
1	8.00	-59.50	-9.30	4.50	6.00	-4.00	-34.60
2	23.00	-58.80	-9.30	8.90	6.40	-4.30	-27.00
3	5.00	-61.60	-9.80	14.80	6.00	-4.70	-26.00
4	50.00	-61.00	-9.50	6.20	5.60	-4.10	0.00
5	48.00	-61.60	-9.20	7.80	5.80	-4.20	-26.30
6	0.00	-59.90	-9.10	0.00	6.00	-4.80	0.00
7	19.00	-59.50	-9.50	7.20	5.60	-5.00	-28.10
8	2.00	-61.10	-8.90	10.00	5.70	-4.30	-28.00
9	3.00	-63.20	-9.40	7.70	4.20	-6.00	-25.00
10	6.00	-61.80	-8.90	11.70	3.40	-6.80	-27.70
11	6.00	-61.00	-9.20	3.20	0.00	-3.60	-25.70
12	3.00	-60.40	-9.10	8.00	4.70	-6.50	-26.30
13	0.00	-61.70	-9.40	9.40	-1.80	-6.00	-27.40
14	8.00	-62.30	-9.50	16.30	4.90	-6.10	-26.20
15	13.00	-62.40	-9.20	15.60	4.80	-6.20	-19.20
16	0.00	-61.20	-9.00	12.70	-0.10	-8.30	-29.50
17	33.00	-58.30	-9.60	4.70	-7.60	-12.90	0.00
18	4.00	-59.20	-9.30	0.00	6.20	-5.00	-29.50
19	13.00	-62.30	-9.80	15.00	4.30	-6.20	-23.60
20	6.00	-61.10	-9.70	14.20	4.40	-5.40	-18.80
21	3.00	-61.10	-9.70	13.60	5.90	-5.10	-24.90
22	6.00	-61.10	-9.80	14.40	4.90	-5.60	-26.80
23	53.00	-59.80	-9.40	2.40	5.80	0.00	0.00
24	21.00	-61.20	-9.00	-13.20	-14.90	0.00	0.00

Tableau 4 : compositions isotopiques

$\delta C.CO_2 - \delta C.CH_4$ → portent sur les espèces gazeuses
 Les autres données concernent les espèces dissoutes
 0.00 signifie non analysées

TABLEAU 5

N° ECHANTILLON	REFERENCE	NOM
1	MDS.1	Paiadiroux
2	MDS.2	Merdaçon
3	MDS.4	Fontpique
4	MDS.5	Chaudefour 1
5	MDS.6	Chaudefour 2
6	MDS.7	Le Vernet
7	MDS.8	Goyon
8	MDS.12	Moneyron
9	MDS.13	Félix
10	MDS.14	Croizat
11	MDS.15	Le Bouteix
12	MDS.17	Clémence
13	MDS.19	La Verniere
14	MDS.21	Saint-Jean
15	MDS.23	Chanteurs
16	MDS.24	Choussy
17	MDS.25	Fenestre
18	MDS.26	Collange
19	MDS.27	Reboisson
20	MDS.28	Chaudefour 4
21	MDS.29	Chaudefour 5
22	MDS.30	Chaudefour 3
23	MDS.31	Couze Chaudefour
24	A.1	Sulfureuse Sancy

TABLEAU 6

ESTIMATION DES TEMPERATURES PROFONDES POUR LES SOURCES
LES PLUS REPRESENTATIVES DE LA VALLEE DE LA DORDOGNE*(Températures en degrés Celsius)*

REFERENCE	NOM	t quartz	t Na - K	t Na-Li °C
MDS.12	Moneyron	131	122	170
MDS.13	Félix	150	143	163
MDS.14	Le Croizat	140	140	185
MDS.24	Chaussy	146	137	155

2.3.5. SOURCE SULFUREUSE DU SANCY

Cette source a été échantillonnée dans de mauvaises conditions climatiques. On a là aussi une source sulfaté acide avec Soufre réduit ce qui renforce les implications qualitatives déduites des analyses de la vallée de Chaudefour.

CONCLUSIONS HYDROGÉOTHERMIQUES

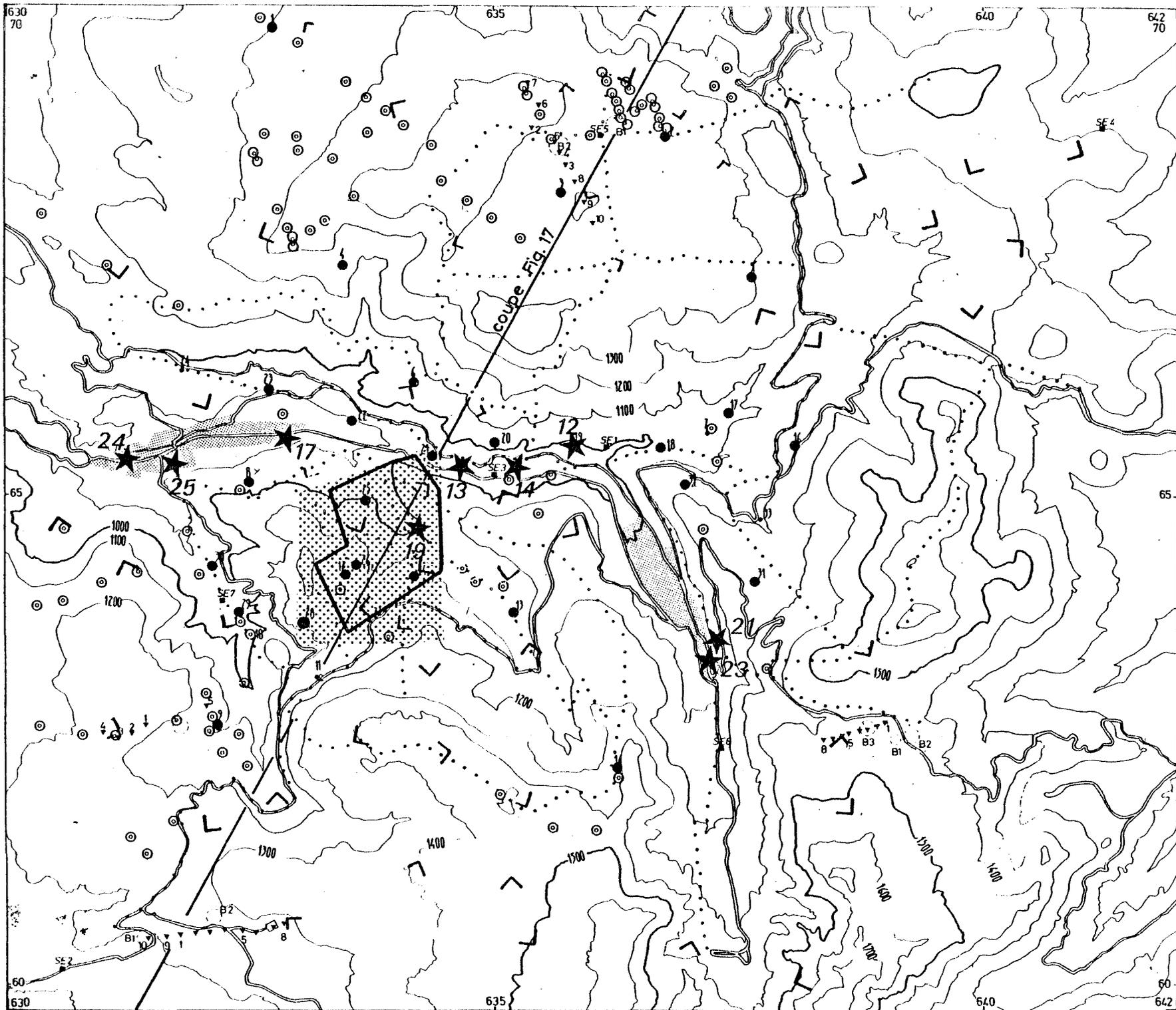
Dans le Massif du Mont Dore on détecte les indices qualitatifs accompagnant un champ géothermique actif :

- flux de Co_2
- système sulfaté acide
- nappes chlorurées

Sur ces dernières, des déterminations de température profondes sont possibles et donnent $140^\circ \pm 10^\circ$. La zone la plus proche des nappes les plus profondes est au voisinage de la source Croizat.

Le Mont Dore au sens strict a vraisemblablement aussi une température proche de 150° .

Le système de la vallée de Chaudefour fournit une température très peu différente de 100° , de tels systèmes sont en général décrits comme périphériques dans les champs géothermiques (Mahon, 1970). Des indices de venues gazeuses profondes, également marquées par des anomalies en "volatils" (As, Br) caractérisent cette partie du champ.



PLAN DE POSITION

I

- ⊙ Sondages MT hautes fréquences
- Mesures MT Harmonique
- Sondages électriques Schlumberger
- ▽ Sondages Mélos et position boucle
- ∨ Sondages MT 5 EX
- ... Profils P.S
- ★ source étudiée



FIG. 17

3. - GÉOPHYSIQUE

3.1. - PRESENTATION DES TRAVAUX

L'ensemble des mesures géophysiques s'est déroulé au cours des années 1978 et 1979, nécessitant l'intervention de nombreuses équipes spécialisées. Tous ces groupes ont travaillé avec l'aide de contrats C.E.E. parfois appuyés de financements D.G.R.S.T.

Pour la commodité de l'exposé, nous distinguerons les travaux d'approche stratégique des levés à finalité tactique mais sans marquer de séparation trop nette entre méthodes à priori opérationnelles et études méthodologiques puisque l'on pourra vérifier ci-après que des méthodes "traditionnelles" ont parfois rencontré des difficultés locales telles que les résultats obtenus se sont avérés de moindre intérêt que ceux qu'ont fourni des techniques réputées plus expérimentales.

3.1.1. ETUDES STRATEGIQUES

Il s'agissait, pour l'essentiel de prouver l'existence ou l'absence d'une éventuelle structure de type caldera dans la région du Mont Dore puis dans le cas favorable, d'en cartographier les limites horizontales, et de situer la structure dans son contexte géologique profond.

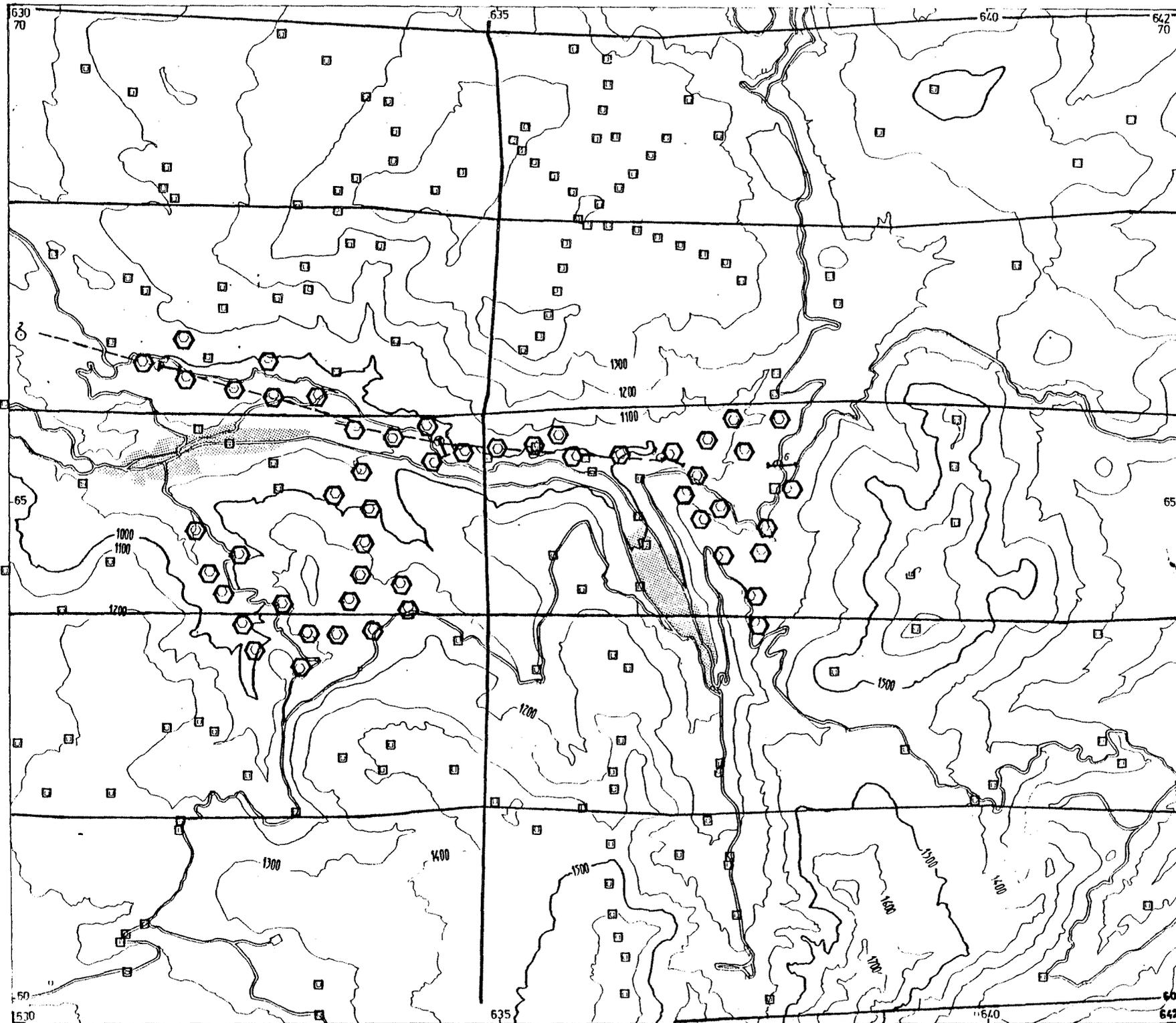
Pour ce faire, s'appuyant sur les données géologiques de surface, on a supposé que la caldera recherchée pouvait être remplie de matériaux pyroclastiques donc plus légers (→ études gravimétriques) plus poreux et moins compacts que l'encaissant (études de propagation d'ondes sismiques). Par ailleurs, les failles de bordure pouvaient constituer des zones de faiblesse à la faveur desquelles auraient pu se mettre en place des injections basiques (→ études magnétiques).

3.1.2. ETUDES TACTIQUES

A l'intérieur de la caldera préalablement mise en évidence, il a fallu ensuite préciser les points suivants :

- a) Epaisseur du remplissage pyroclastique
- b) Présence éventuelle d'une formation intermédiaire entre les pyroclastites et le fond granitique supposé sain et profondeur éventuelle de ce dernier.
- c) Fracturation interne
- d) Présence éventuelle de structures dont les paramètres physiques, conductance, profondeur, épaisseur, P.S., peuvent se rapprocher de ce que l'on a observé sur des réservoirs géothermiques connus.

Pour mener à bien cette seconde phase des travaux, on a d'abord procédé à une étude par sismique réfraction destinée à répondre aux points a) et b) le long d'un profil est-ouest suivant approximativement le flanc nord de la vallée de la Dordogne, seul itinéraire accessible à la méthode. Ayant pu constater que la première couche conductrice mise en évidence par magnétotellurique présentait une forte corrélation avec la première interface sismique, on a pu estimer que les sondages magnétotelluriques dépouillés en méthode harmonique apportent une réponse suffisante au point a) sur l'ensemble de la caldera.



PLAN DE POSITION
II

- Mesures gravimétriques
- Sismique réfraction point de tir
- Sismique réflexion
- Station d'écoute sismique
- Profils aéromagnétiques

0 1 km

FIG. 18

Ce sont essentiellement les corrélations souvent très fortes entre les orientations des anomalies mises en évidence aux mêmes endroits par méthodes différentes (gravimétrie, magnétométrie, magnétotellurique, polarisation spontanée) qui ont guidé l'étude de la fracturation interne puis c'est la coexistence d'anomalies internes de résistivité et de polarisation spontanée attribuables à des sources suffisamment profondes au voisinage de fractures importantes qui a été recherchée pour la sélection de zones favorables. Notons que des études de bruits sismique ont été également entreprises à cette fin.

3.1.3. IMPLANTATION DES MESURES

A l'exception des mesures gravimétriques, magnétiques et d'absorption sismiques, pour lesquelles on pourra se référer aux annexes, les autres méthodes ont été implantées en quasi totalité sur la seule zone centrale qui fait l'objet des plans de position des figures 17 et 18.

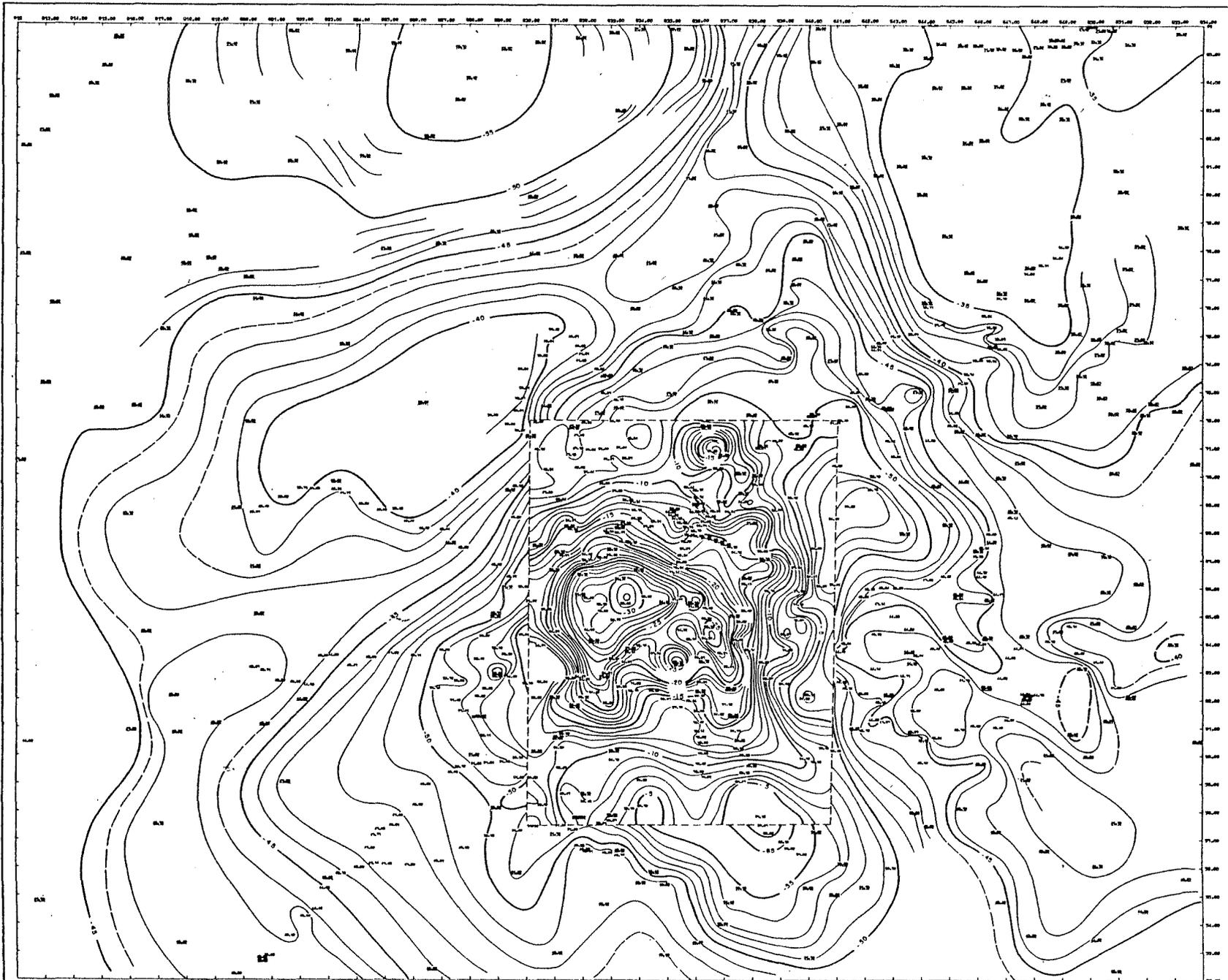


Fig. 19

MONT DORE - ANOMALIE DE BOUGUER $d=2,7$ et $1,8$

MESURES REPTÉES EN DENSITÉ 2,7
 ZONE CENTRALE TRAITÉE EN DENSITÉ 1,8
 LES VALEURS NUMÉRIQUES PAR GROUPE S'ADONNENT À 1000 (1100 PARMI)
 TOUTES LES VALEURS SONT NÉGATIVES

3.2. - DETERMINATION DES LIMITES DE LA CALDERA ET ETUDE DU MILIEU

ENCAISSANT

3.2.1. GRAVIMETRIE

La campagne gravimétrique a été conduite par le B.R.G.M. (cf. annexe). Après une cartographie préliminaire, suivie de 400 mesures complémentaires, une première compilation de l'anomalie de Bouguer, réalisée en densité 2.7 a montré une vaste anomalie négative dont on voit les contours extérieurs sur la figure 19. Une telle anomalie implique que les roches constituant le relief de la région sont probablement plus légères que la densité adoptée, ce qui se vérifie aisément par une très grande corrélation entre points hauts du relief et anomalies négatives. Pour supprimer toute corrélation entre relief et anomalie de Bouguer, en l'absence de variations de densité évidentes des roches constituant le relief plusieurs essais de correction ont été faits en utilisant des densités décroissantes. Nous avons dû descendre jusqu'à une densité de 1.8 sur la région du massif du Mont Dore, incluant la caldera et les massifs avoisinants.

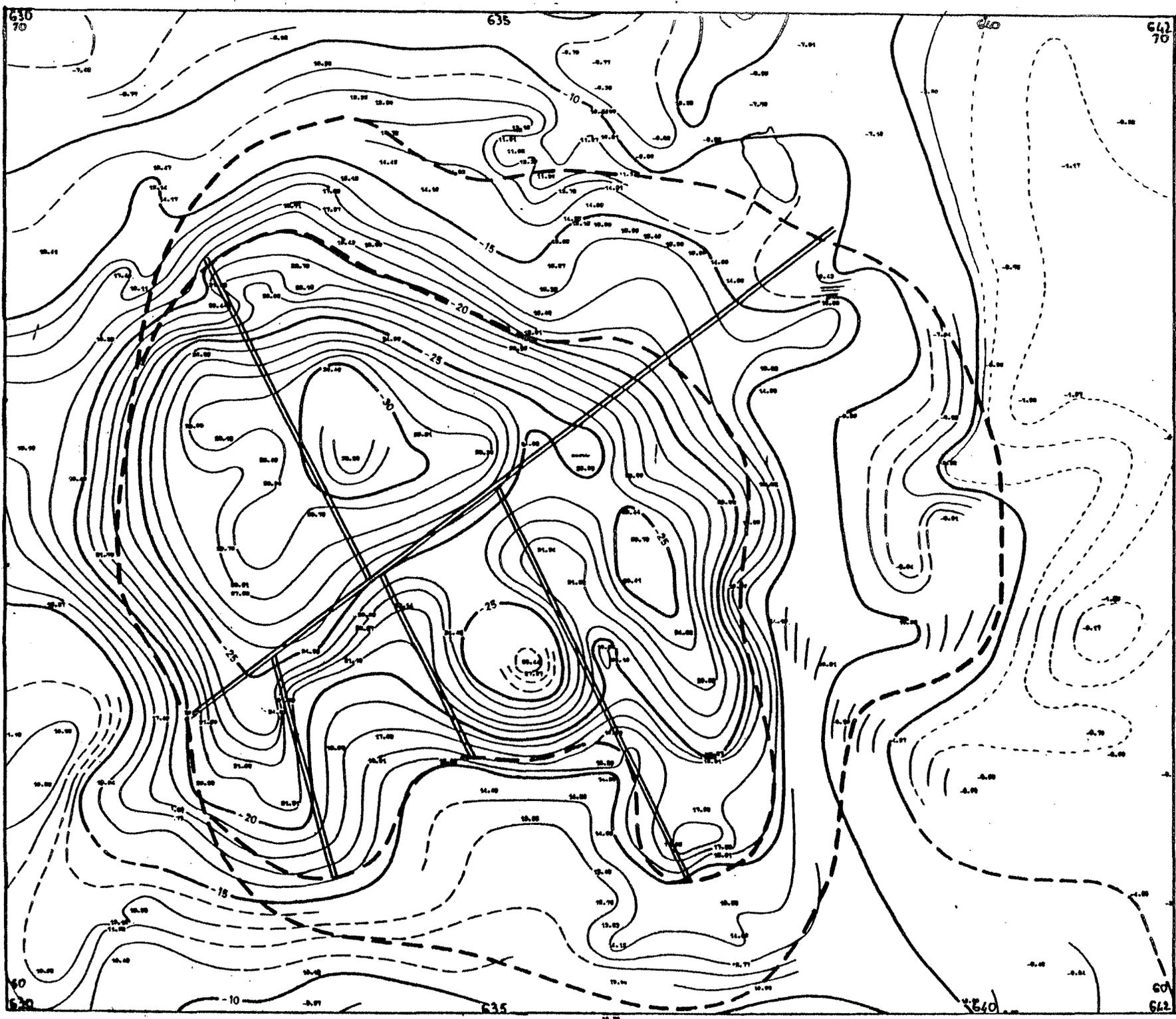
Le choix d'une aussi faible densité de correction (qui indique un contraste de densité de l'ordre de 0.9 entre la densité moyenne des formations volcaniques du Mont Dore et le socle environnant) nous suggère que les reliefs sont vraisemblablement formés de manière prédominante par des accumulations de matériaux légers du genre ponces, cendres, protégés de l'érosion par les coulées de laves.

Les observations géologiques, sont loin de s'opposer à l'interprétation faite. Elles confirment l'abondance des formations pyroclastiques intercalées avec les coulées de lave post-caldera, en particulier dans le volcan du Sancy. De plus, les nappes de ponces contemporaines de la formation de la caldera, si elles affleurent au centre de la caldera et sur la périphérie du volcan, sont logiquement présentes sous ces émissions post-caldera.

La faiblesse de la densité finale retenue suggère que peu de coulées de basaltes et hawaïtes caractéristiques de cette activité tardive se trouvent dans la masse des matériaux pyroclastiques emplissant la caldera à moins qu'elles ne soient très minces.

Nous avons reporté sur la figure 20 les limites extérieures de la caldera telles qu'elles ressortent de l'interprétation qualitative de la gravimétrie en suivant les lignes de "gradient horizontal" maximum.

On notera la coïncidence entre minima de l'anomalie et affleurements de ponces ou cendres ainsi que la grande discontinuité qui traverse la caldera du sud-ouest au nord-est limitant au sud un fort minimum de l'anomalie de Bouguer.



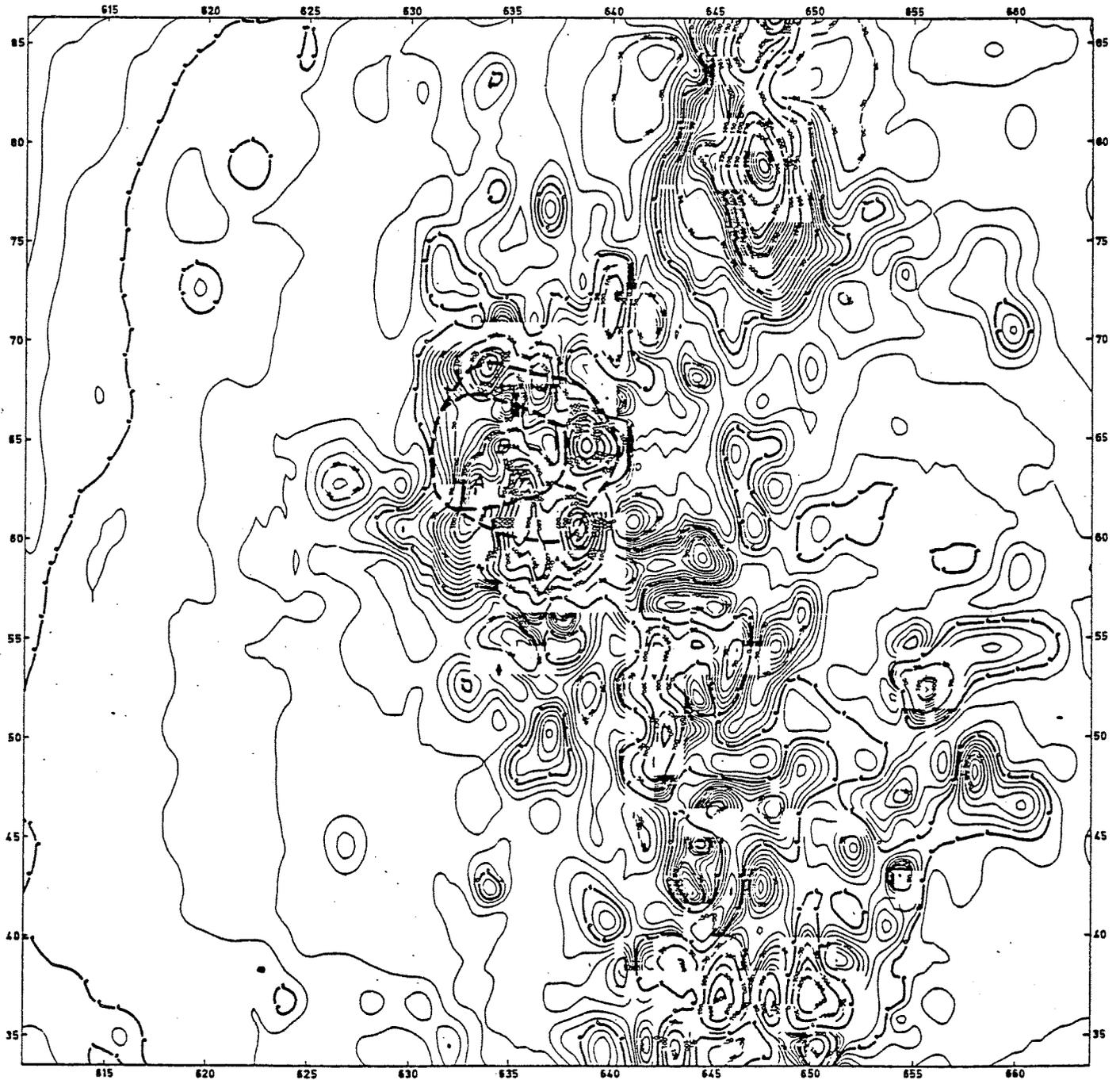
MONT DORE

ANOMALIE DE BOUGUER $\delta=1.8$



FIG. 20

Figure : 21

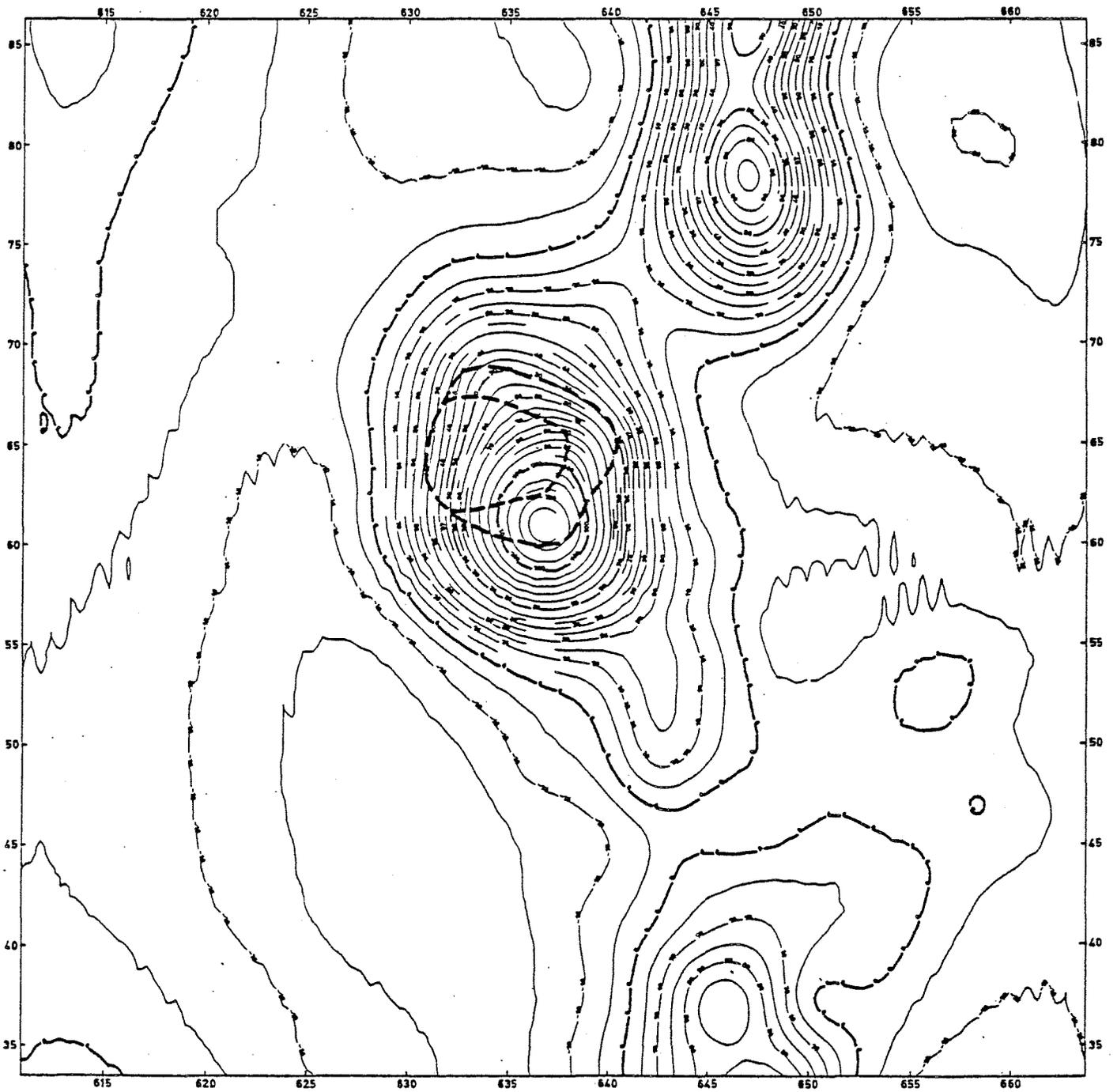


MAGNETISME MONT DORE
Champ d'origine superficielle réduit au pôle

— Limite caldera (gravimétrie)

0 5 10 15 km

Figure: 22



MAGNETISME MONT DORE
Champ d'origine profonde réduit au pôle

--- Limite caldera (gravimétrie)

0 5 10 15 km

On remarquera au sud de cette limite une série de discontinuités transversales moins marquées, bien visibles dans la topographie et très probablement liées aux limites des coulées. On notera au passage que par exemple, si l'on attribue à la coulée formant la Montagne de Bozat et le Rocher de l'Aigle une épaisseur d'environ 150 m cela suffit pour expliquer l'anomalie positive d'environ 5 milligals qui marque cette région.

L'absence d'anomalies évidentes de ce type attribuables à des formations sans affleurements confirme notre première impression relative à la rareté ou la minceur des coulées dans la masse des matériaux pyroclastiques du moins dans la région centrale de la zone étudiée.

Par ailleurs, certaines incertitudes apparaissant dans la carte des anomalies de Bouguer, en particulier sur les côtés sud et est, pourraient être localement diminuées en prenant en considération les coulées post-caldera de forte densité qui sont visibles à l'affleurement dans ces secteurs du massif.

3.2.2. MAGNETOMETRIE AEROPORTEE

Les données obtenues lors du levé INAG-BRGM de 1972 ont été traitées sur la région du Mont Dore par le B.R.G.M. en collaboration avec l'I.P.G. Clermont-Ferrand (cf. annexes) et par le Centre Géologique et Géophysique de Montpellier (cf. annexe).

On se référera à la figure 21, où après transformation des données nous avons représenté le champ magnétique au pôle lié aux structures aimantées superficielles, on remarquera surtout la série d'anomalies de faible extension horizontale mais très intenses qui jalonnent le pourtour de la caldera. Elles sont attribuables aux principales sources de coulées basiques.

Notons que leur faible extension entraîne une imprécision d'environ \pm 1 km nord-sud sur leur position exacte puisque le lever aéromagnétique a été réalisé au moyen de lignes de vol orientées est-ouest et distantes de 2 km. Les allongements de part et d'autre des "apex" anomaliés peuvent traduire des dykes intrusifs moins aimantés ou plus profonds que les "cheminées" principales à moins qu'il ne s'agisse que de coulées de très fortes épaisseurs associées à des altitudes importantes.

Au centre de la caldera, on notera une quasi totale disparition des sources magnétiques à l'exception (A et B) de celles qui sont attribuables à des coulées géologiquement évidentes.

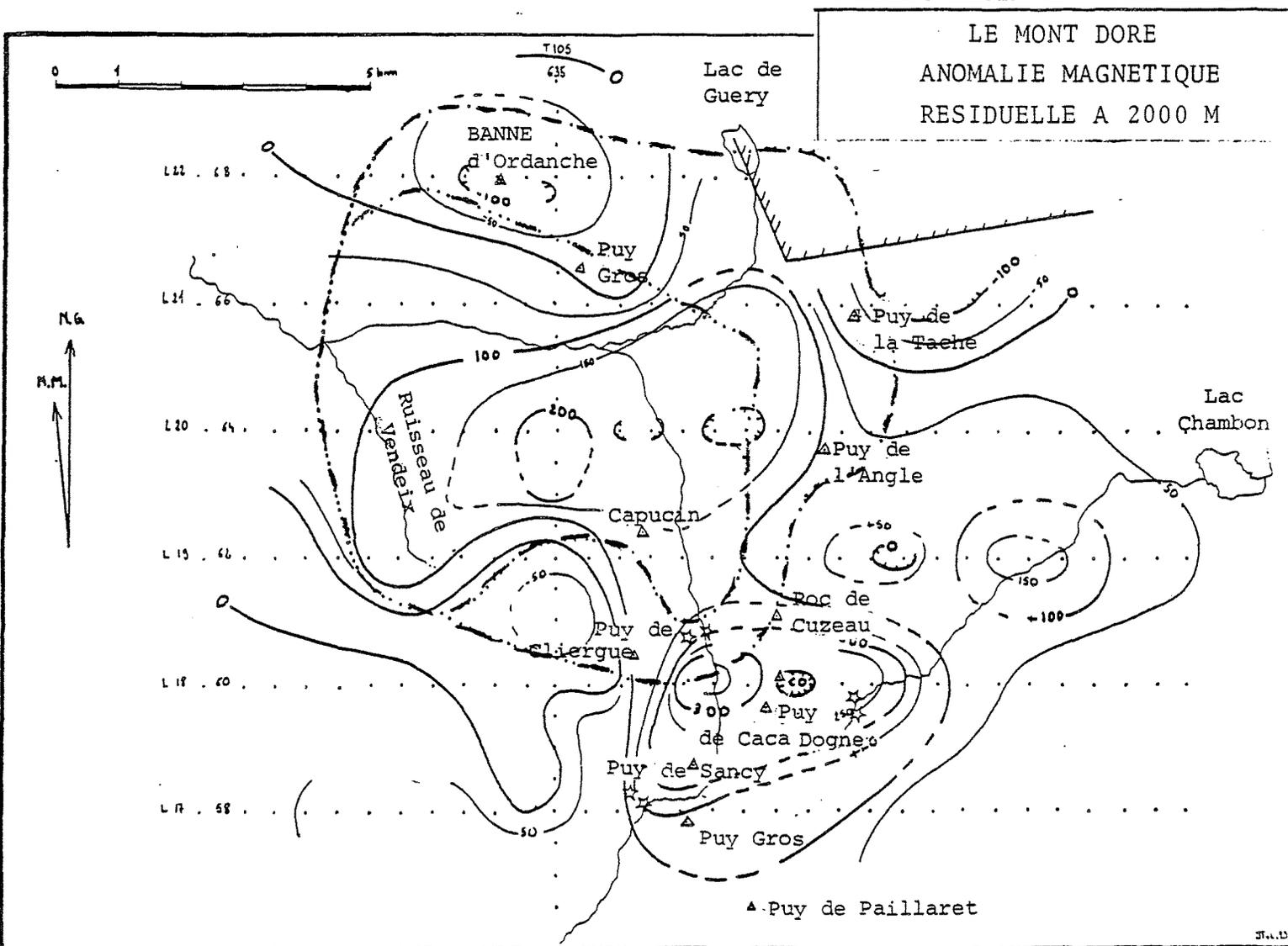
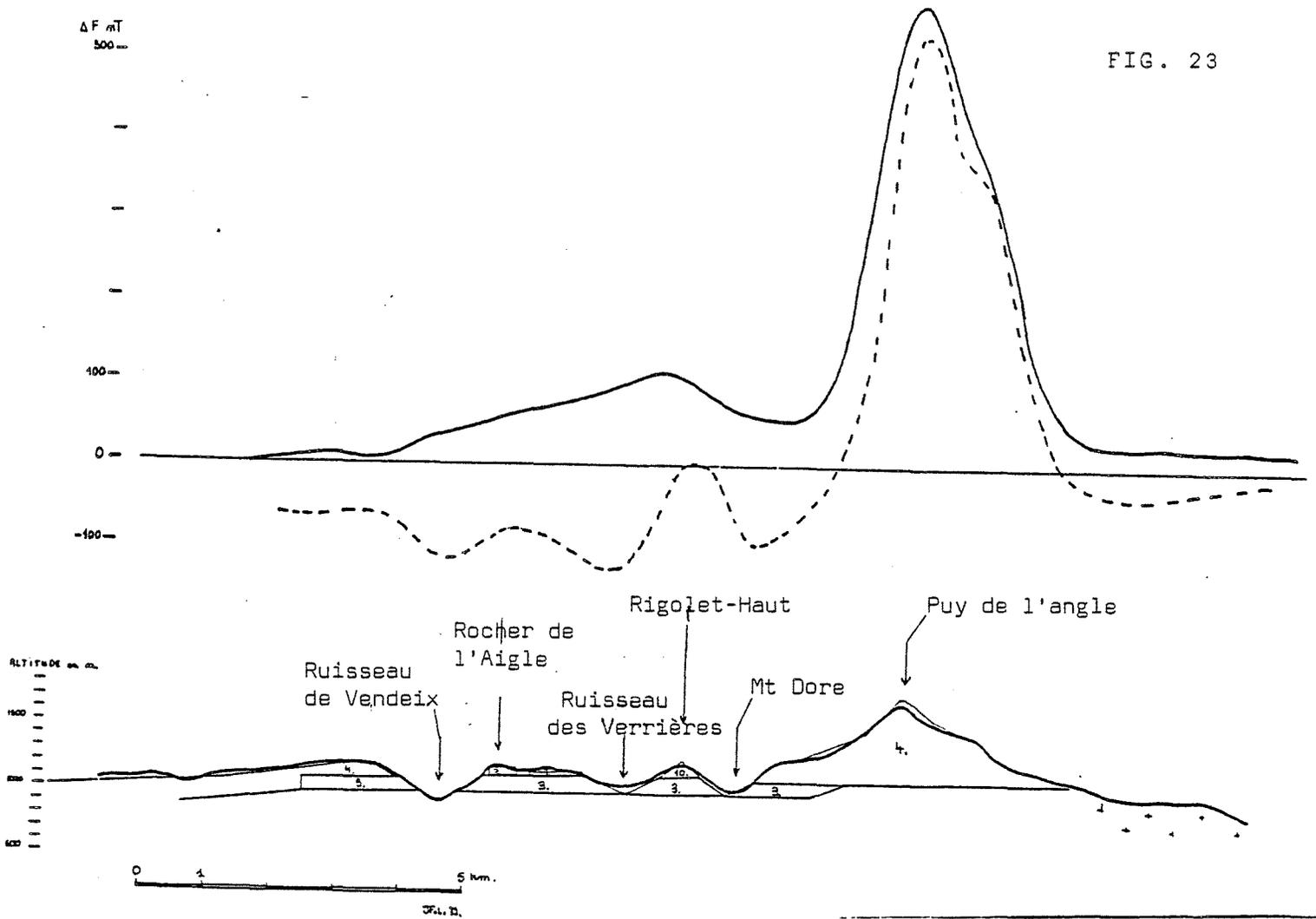
Sur la figure 22, on a cartographié le champ magnétique attribuable à des sources d'origine profonde et l'on constate que la caldera se situe légèrement au nord-ouest du sommet d'une large structure aimantée centrée sous le massif du Sancy. Au nord-est, la chaîne des Puys semble présenter le même type de racines.

Une approche complémentaire * des travaux précédents a été tentée pour interpréter les anomalies magnétiques à partir des coulées et reliefs

* (cf. annexe)

ΔF mT
500

FIG. 23



observés. La figure 23 montre les résultats obtenus et l'on peut constater qu'en effet, nous sommes ici en présence d'un champ d'origine superficielle attribuable au modèle présenté et d'un champ d'origine probablement plus profonde (obtenu par soustraction entre le champ du modèle superficiel et le champ observé) avec le maximum déjà décelé (fig. 22) sous le massif du Sancy, et dont la réduction au pôle fournirait probablement une image un peu plus "contrastée" mais très voisine de celle de la figure 22.

Une interprétation plus quantitative des structures profondes a été tentée et les premiers résultats sont décrits en annexe (cf. annexe).

3.2.3. VARIATIONS DE VITESSE ET ABSORPTIONS D'ONDES SISMIQUES

Les travaux ont été accomplis par une équipe de sismologie de l'I.P.G. Paris dans le cadre d'un contrat C.E.E. spécifique (cf. annexe).

Les résultats présentés ne constituent que la première étape d'un travail plus important faisant appel à un nombre de stations plus élevé et ils sont donc fortement sujets à révision.

La figure 24 montre les variations de vitesse des ondes longitudinales traversant verticalement la croûte terrestre, dans les 2 000 premiers mètres puis les 2 000 mètres suivants.

On remarquera que la caldera (dont les limites sur la figure ont été estimées par d'autres méthodes) se marque très clairement dans les 2 000 premiers mètres par une zone à faible vitesse des ondes longitudinales. Cette anomalie peut s'expliquer par l'influence du remplissage pyroclastique et son maximum implique soit un remplissage plus épais soit une fissuration sous jacente intense.

Le niveau inférieur est plus complexe mais on remarquera que le flanc est de la caldera est marqué par une bande nord-sud à vitesse affaiblie pouvant suggérer une zone broyée en profondeur.

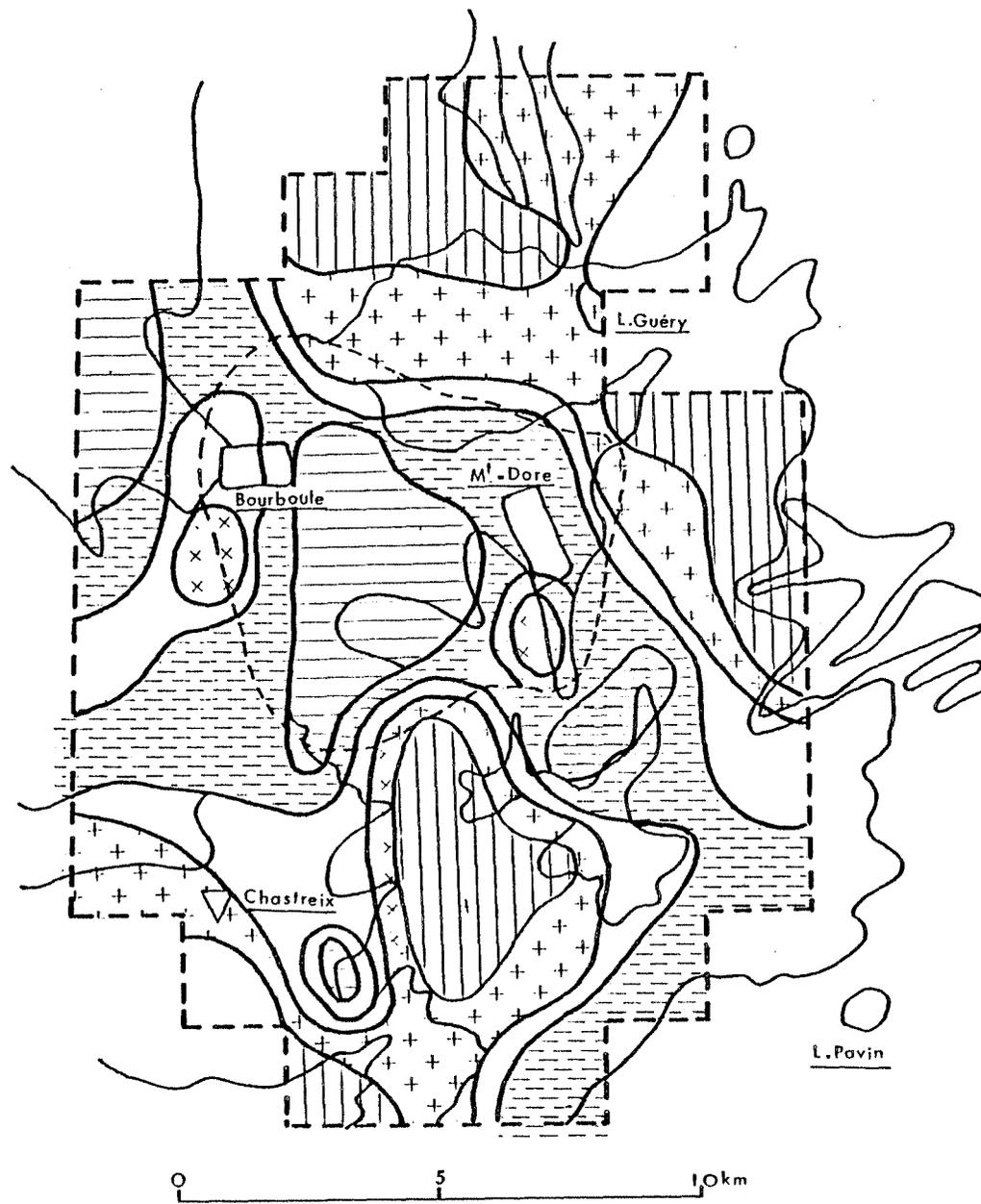
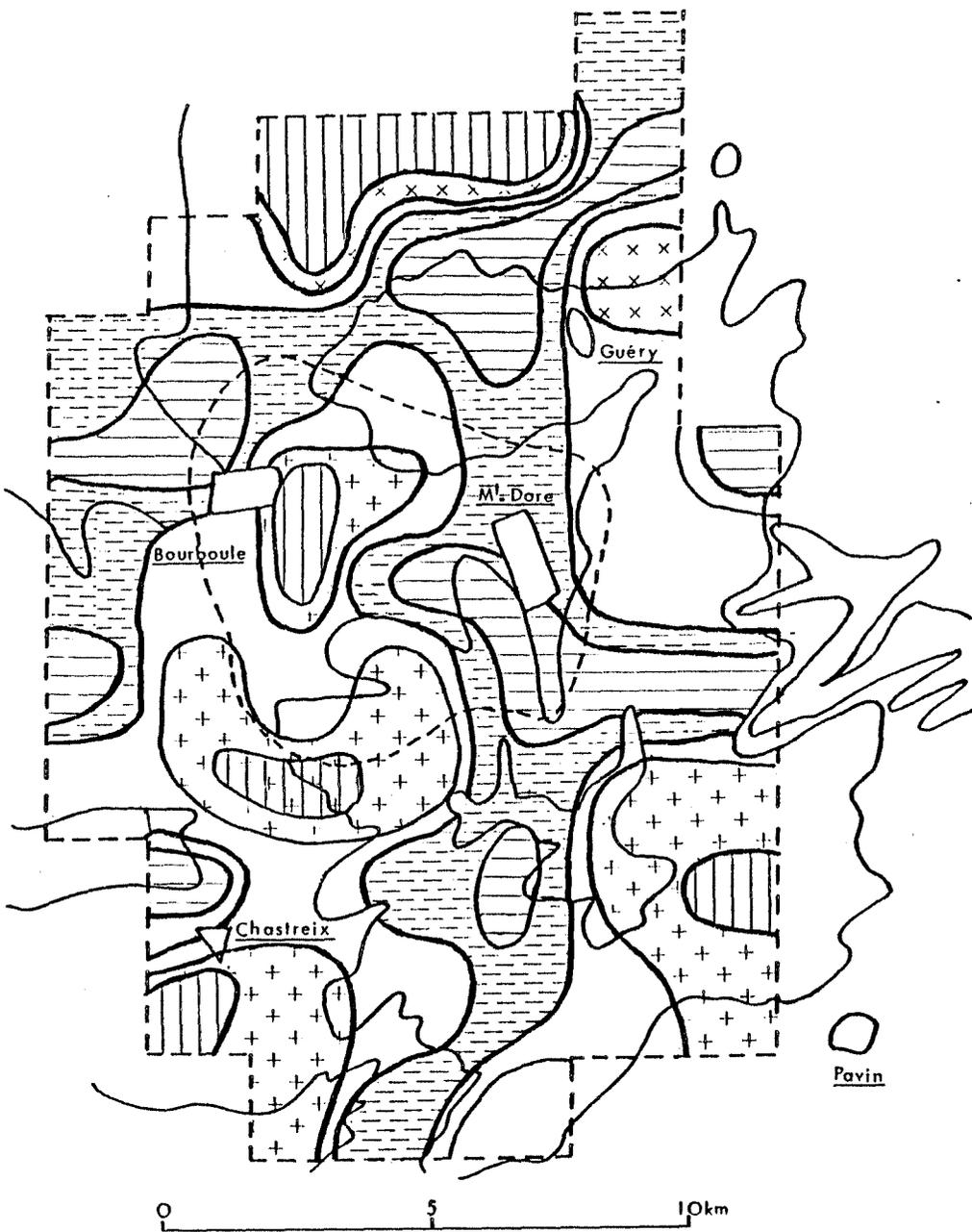
3.2.4. MAGNETOTELLURIQUE RAPIDE ET ELECTROMAGNETISME MELOS

(cf. annexes)

La magnétotellurique a été mise en oeuvre par le CRG (Garchy) et le MELOS par le B.R.G.M. Ces deux techniques utilisent les rapports d'intensité existant entre composantes horizontales des champs électriques et magnétiques mesurées à la surface du sol dans diverses fréquences, pour en déduire une distribution possible des résistivités électriques du sous-sol expliquant les effets observés.

La magnétotellurique rapide et l'électromagnétisme MELOS utilisent des gammes de fréquence voisines (du Kilohertz à quelques Hertz), la différence est liée aux sources, qui sont les champs naturels en magnétotellurique rapide et le champ magnétique créé par un courant injecté dans une boucle dans le cas du MELOS.

Fig. 24 : CARTES DES VARIATIONS DE VITESSE DES ONDES P



$\Delta V > 0$		$\Delta V < 0$		+0,5 km , -1,5 km
$\Delta V \gg 0$		$\Delta V \ll 0$		

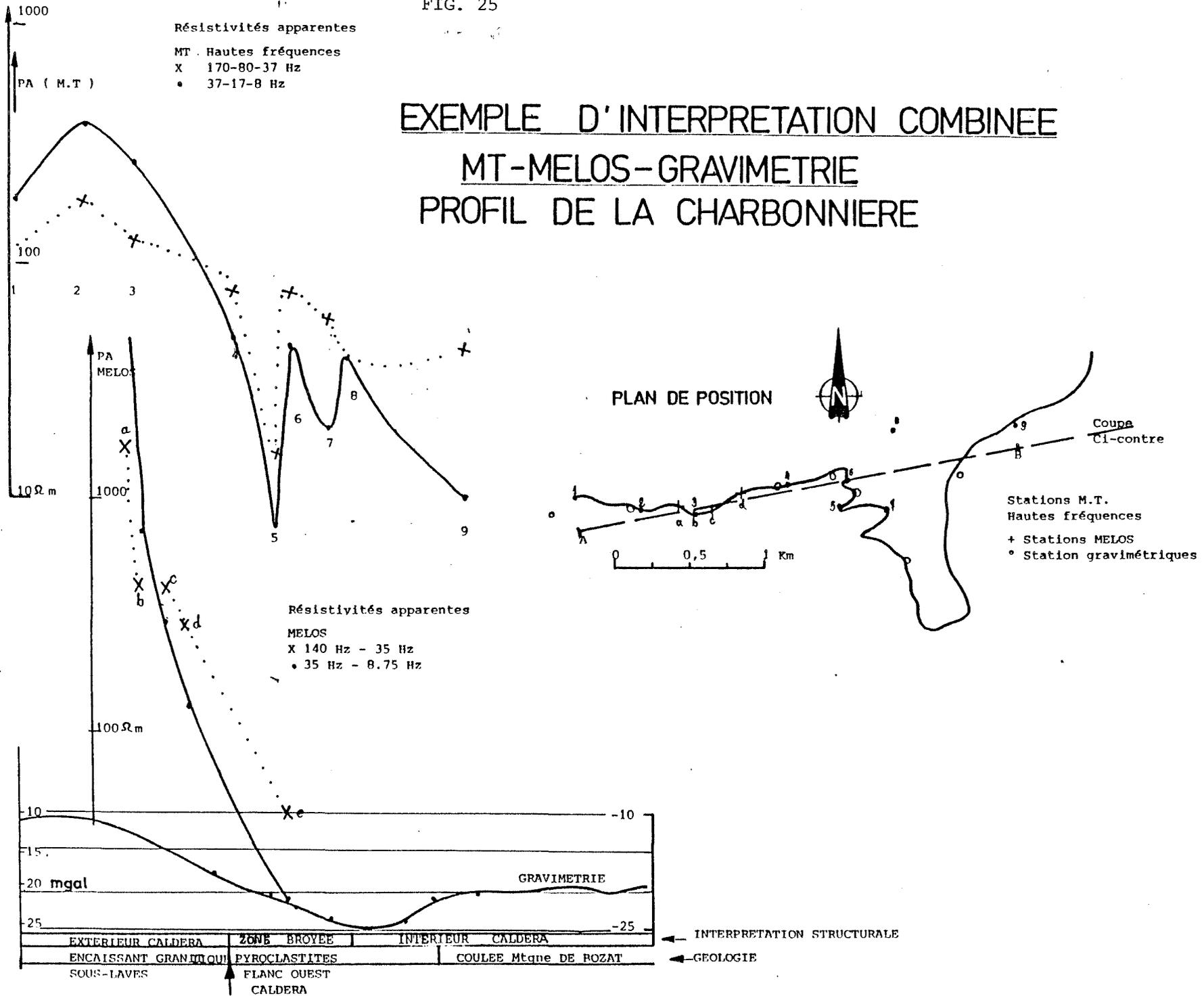
$\Delta V > 0$		$\Delta V < 0$		-1,5 km , -3,5 km
$\Delta V \gg 0$		$\Delta V \ll 0$		

FIG. 25

EXEMPLE D'INTERPRETATION COMBINEE

MT-MELOS-GRAVIMETRIE

PROFIL DE LA CHARBONNIERE



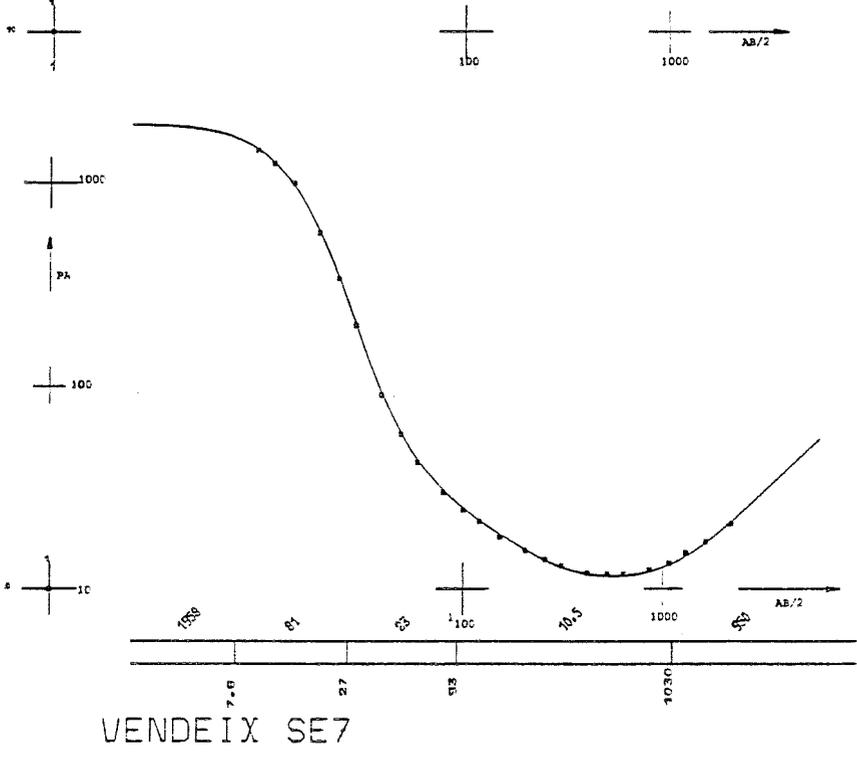
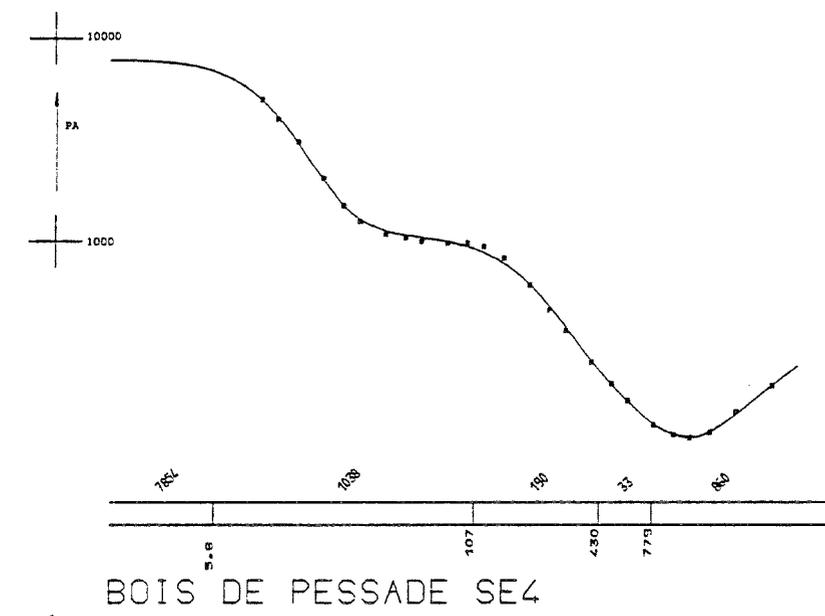
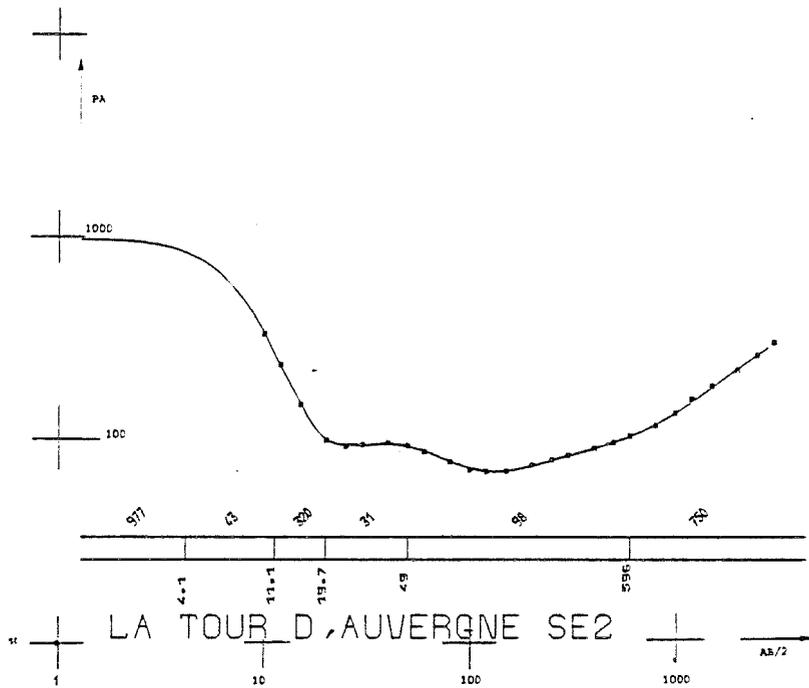


FIG. 26

Nous n'examinerons pas en détail tous les sondages réalisés qui, pour leur majorité, quelle que soit la méthode, montrent que l'on passe d'un niveau résistant superficiel mince à un niveau sous-jacent plus conducteur.

Les principaux résultats acquis se présentent sous forme de positions de limites séparant des terrains résistants de terrains plus conducteurs, dans la tranche d'investigation de ces méthodes qui ne dépasse guère 500 à 750 mètres d'épaisseur.

Il existe une très bonne coïncidence entre toutes ces limites et les contours "gravimétriques" de la caldera à l'exception d'une limite résistant-conducteur au sud-ouest.

La figure 25 illustre la précision avec laquelle on peut placer les limites externes de la caldera par une interprétation simultanée des résultats magnétotelluriques, Mélos, gravimétriques.

3.2.5. SONDAGES ELECTRIQUES TYPE SCHLUMBERGER (cf. annexe)

En ce qui concerne les sondages électriques réalisés par le B.R.G.M. au nombre de 7, nous avons été conduits à ne considérer actuellement comme réellement significatifs que les sondages 2 et 7. Le sondage 4, implanté en région topographiquement très difficile nécessite des contrôles et les autres sondages se sont avérés soit inexploitable, soit placés trop près d'importantes discontinuités latérales et souvent très perturbés au niveau même de la courbe de sondage.

Après traitement par ordinateur (fig. 26), les résultats principaux indiquent une épaisseur d'environ 1 000 mètres de terrain conducteur au centre de la caldera (SE 7), épaisseur qui tombe à moins de 600 mètres à l'extérieur (SE 2) et un socle résistant qui s'approfondit d'environ 600 mètres lorsque l'on passe de l'extérieur vers l'intérieur de la caldera.

3.2.6. SELECTION D'UNE ZONE D'ETUDES DETAILLEES

Sur la figure 20, on a reporté les limites de la caldera et ce qui semble être les principales fractures internes sur fonds d'anomalie gravimétrique. C'est la région cartographiée sur ce document que nous avons ensuite considérée comme la zone d'études tactiques à l'intérieur de laquelle nous allons concentrer les travaux de reconnaissance plus détaillés.

La figure 27, outre les détails des résultats obtenus par magnétotellurique montre comment on a précisé l'ensemble des contours extérieurs de la caldera.

Les principales intrusions volcaniques jalonnant les bords de la caldera et les coulées superficielles formant des reliefs internes comme la montagne de Bozat sont particulièrement évidentes sur la carte magnétique de la figure 28.

630

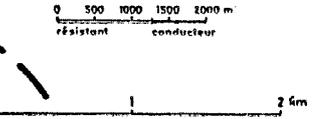
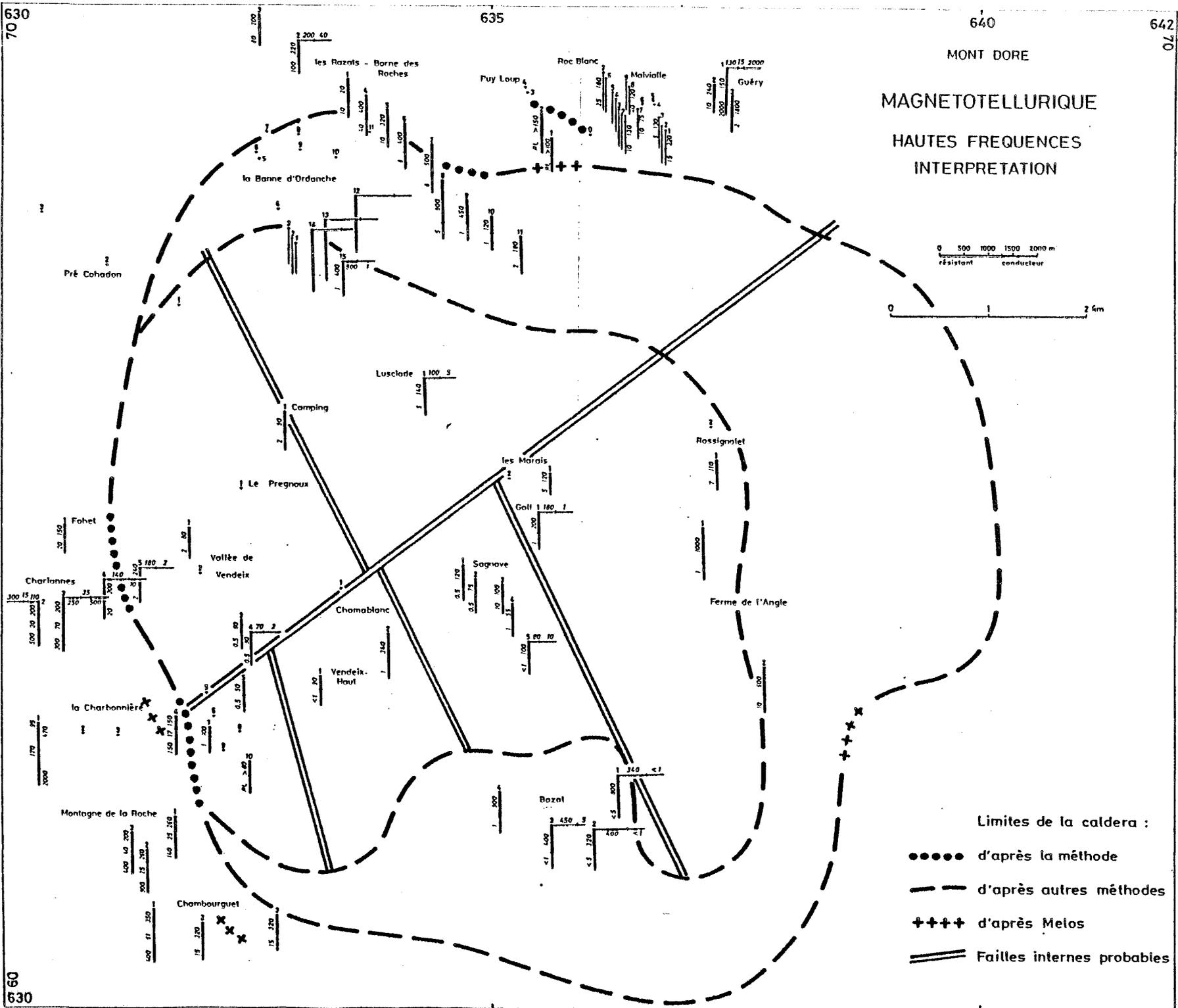
635

640

642

MONT DORE

MAGNETOTELLURIQUE HAUTES FREQUENCES INTERPRETATION



Limites de la caldera :

- d'après la méthode
- - - d'après autres méthodes
- ++++ d'après Meios
- ==== Failles internes probables

FIG. 27

630



MONT-DORE

CHAMP MAGNETIQUE
D'ORIGINE
SUPERFICIELLE
REDUIT AU POLE



Limites de la
caldera d'après
gravimétrie et
autres méthodes

FIG. 28

COUPE SYNTHETIQUE LE LONG DU PROFIL DE SISMIQUE REFRACTION

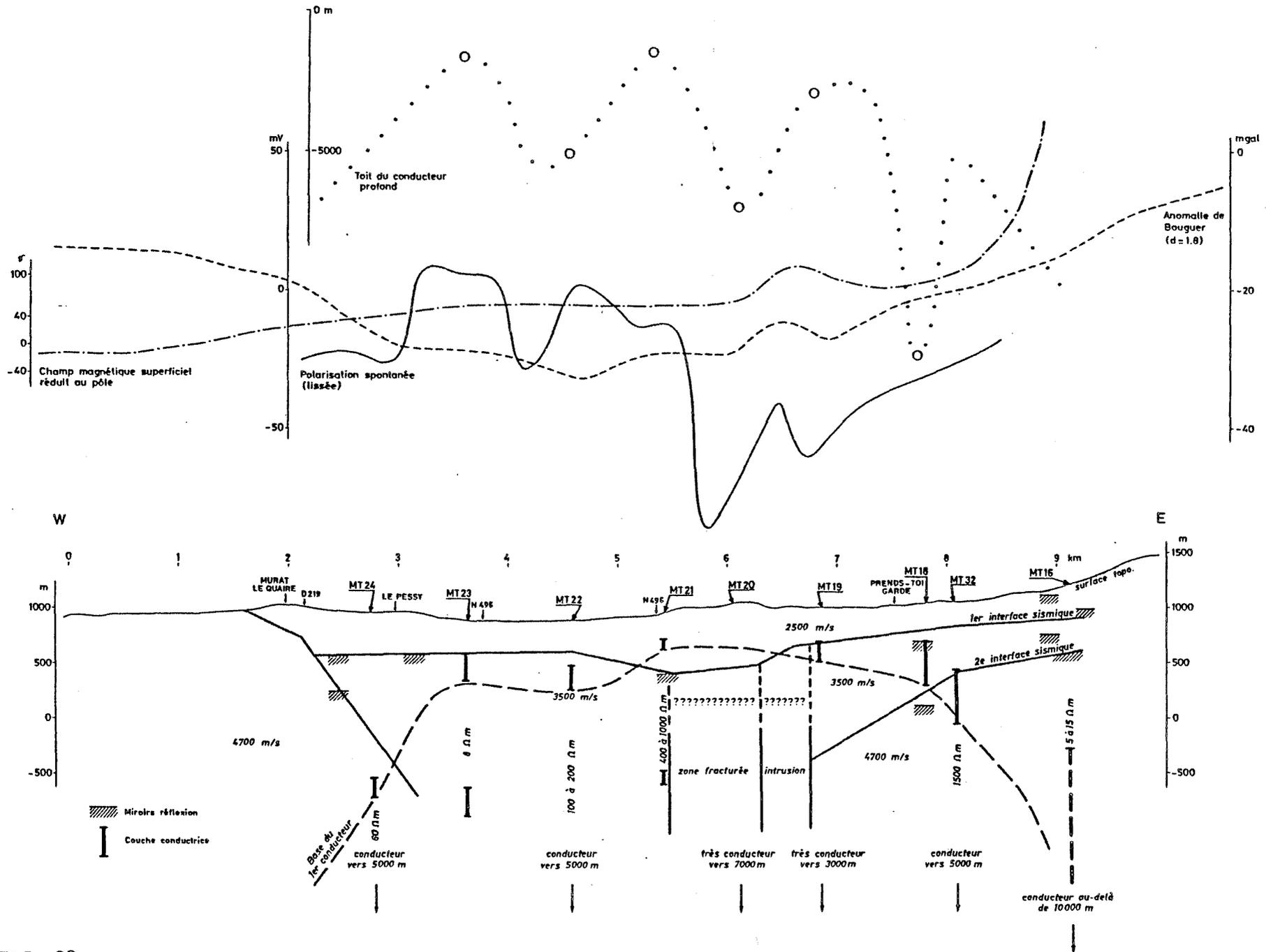


FIG. 29

3.3. - ETUDE DU FOND ET DES STRUCTURES INTERNES A LA CALDERA

3.3.1. CONSTRUCTION D'UNE COUPE SYNTHETIQUE (fig. 29)

3.3.1.1. Sismique réfraction

Réalisée par le B.R.G.M. (cf. annexe) cette étude se présente sous forme d'un profil de plus de 7 km de long au flanc nord de la vallée de la Dordogne. Les résultats ont montré que le remplissage de la caldera était pour l'essentiel formé par deux couches à vitesse de propagation sonique peu élevée surmontant un fond peut-être granitique.

Les caractéristiques en sont les suivantes :

- 1ère couche : vitesse de propagation du son voisine de 2 500 m/s
Le terrain est constitué vraisemblablement de pyroclastites plus ou moins tassées.
Épaisseur variable de 250 mètres à plus de 500 mètres.
- 2ème couche : vitesse de propagation du son voisine de 3 500 m/s. Nature géologique inconnue. Elle constituerait l'essentiel des formations internes à la caldera et son épaisseur pourrait dépasser 1 000 mètres.
Seuls, ses flancs ont pu être estimés avec quelque précision, le fond est resté hors de portée en raison du dispositif utilisé mais on peut penser qu'il est en moyenne à plus de 1 400 mètres de la surface du sol.
- Milieu encaissant de la caldera : probablement granitique, il se caractérise par une vitesse de propagation des ondes sismiques de l'ordre de 4 700 m/s.

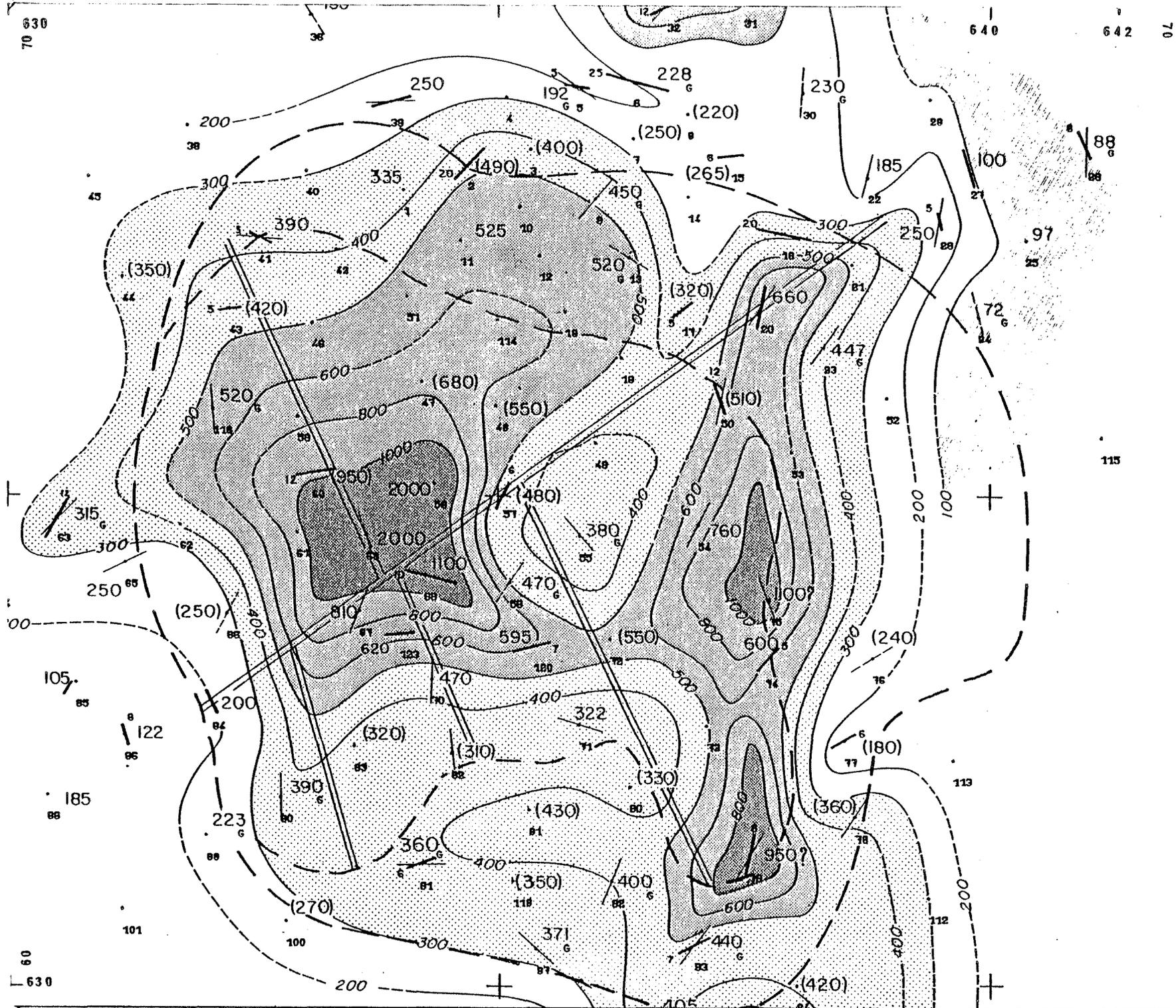
3.3.1.2. Sismique réflexion (cf. annexe)

Accompagnant les tirs exécutés pour la campagne de sismique réfraction, quelques sondages de sismique réflexion ont été exécutés par le L.E.R.G.A. (Université de Bordeaux) sur demande du B.R.G.M.

Les résultats confirment les interfaces mises en évidence par sismique réfraction sans prouver l'existence de miroirs intermédiaires ce qui suggère que les couches précédemment décrites ne comportent pas de formations interstratifiées importantes.

3.3.1.3. Magnétotellurique basses fréquences (cf. annexe)

Le long du profil étudié le C.R.G. (Garchy) a mis en place une série de sondages magnétotelluriques utilisant des signaux de fréquence compris entre 70 et 0.02 Hertz.



MONT-DORE
 MAGNETOTELLURIQUE
 5.EX
 CONDUCTANCES
 (mhos)

--- Limites de la caldera
 == Failles internes probables

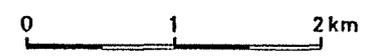


FIG. 30

Après interprétation (en coopération CRG-B.R.G.M.), les résultats montrent la présence de deux couches conductrices. La base de la plus superficielle suit approximativement la première interface sismique et surtout plonge très brutalement dès que l'on atteint les bords de la caldera.

La couche profonde présente un toit de profondeur variable allant de 1 500 mètres à plus de 7 000 mètres sous la surface du sol. On verra plus loin que cette variance est tout à fait normale en raison de la position très latérale du profil étudié vis-à-vis du conducteur magnétotellurique profond qui domine dans la caldera.

3.3.1.4. Polarisation spontanée (cf. annexe)

Un profil test de polarisation spontanée montre une très forte anomalie négative juste à l'aplomb de ce qui semble être la limite est du fond de la caldera. Ceci suggère à cet endroit une forte fracturation qui favoriserait d'importantes circulations d'eaux.

3.3.1.5. Corrélation P.S. - Gravimétrie, Magnétisme

Outre une très bonne corrélation entre la courbe de l'anomalie de Bouguer et la seconde interface sismique, on notera une petite anomalie positive commune aux profils P.S., gravimétrique et magnétique faisant penser à une intrusion possible à moins qu'il ne s'agisse que d'une coïncidence.

3.3.2. RECHERCHE DE CONDUCTEURS PROFONDS PAR MAGNETOTELLURIQUE

(cf. annexes)

La recherche de conducteurs profonds est actuellement l'une des méthodes de mise en évidence directe des sites d'intérêt géothermique. Il est en effet connu qu'à minéralisation constante, la résistivité d'un électrolyte (ici l'eau contenue dans les roches) décroît selon une loi que décrit la courbe ci-après (d'après G. KELLER).

C'est pourquoi le BEICIP d'une part, le CRG d'autre part ont exécuté de nombreux sondages magnétotelluriques ayant pour but la détection d'une éventuelle formation conductrice profonde.

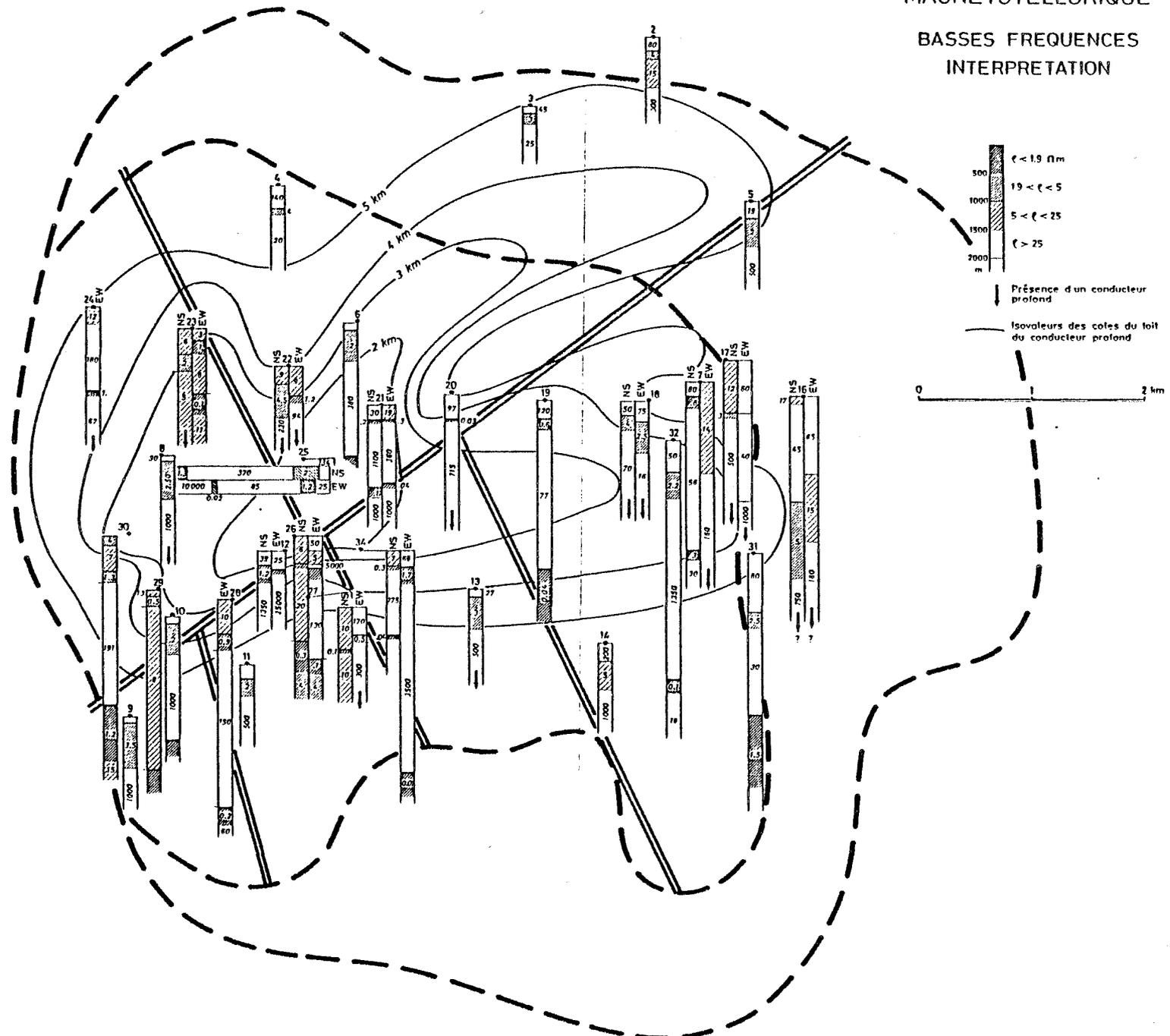
Le BEICIP a utilisé la méthode dite M.T. 5 EX fournissant un ordre de grandeur de la conductance (exprimée en mhos) des couches que l'on peut espérer profondes en raison des très basses fréquences utilisées.

Les résultats sont présentés sur la figure 30 où l'on peut constater la présence d'une vaste anomalie générale qui occupe l'ensemble de la caldera, avec un axe paroxysmal le long du flanc et qui peut traduire des eaux circulant en profondeur. Mais l'intérêt principal du document réside dans la très forte anomalie (conductivités supérieures à 2 000 mhos) comprise dans l'angle que forment deux axes de fracturation bien visibles par d'autres méthodes.

FIG. 31

MONT-DORE

MAGNETOTELLURIQUE BASSES FREQUENCES INTERPRETATION



Le CRG a utilisé, de son côté, la méthode dite "magnétotellurique harmonique". Les résultats des sondages sont rassemblés sur la figure 31 où l'on a ajouté les courbes de niveau (quelque peu "lissées") de ce qui paraît être le toit d'une couche conductrice profonde.

Outre l'identité presque parfaite qui existe entre le maximum de conductance cartographié sur la figure 30 et le sommet de la formation conductrice sur la figure 31 on remarquera d'une part, que l'ordre de grandeur de la profondeur indiquée n'est que de 2 000 mètres, ce qui est tout à fait accessible par forage, d'autre part que le niveau conducteur passe de profondeurs fort élevées à températures donc importantes jusqu'aux faibles profondeurs observées où il ne présente parfois (cf. sondage 26) que des résistivités très inférieures à 1 mho mètre.

3.3.3. TEST DE POLARISATION SPONTANEE (cf. annexe)

La carte présentée sur la figure 32 a été réalisée par le BRGM après l'exécution d'environ 100 km de profils. Très difficile à interpréter quantitativement, ce document montre néanmoins une série de corrélation intéressante avec les résultats des autres méthodes.

A la périphérie de la caldera, à l'est, au nord et au sud, on remarque de très fortes anomalies positives (variant très vite donc probablement d'origine superficielle) qui jalonnent les reliefs existants. Ceci traduit probablement d'intenses circulations d'eaux ce qui n'a rien d'étonnant si l'on se souvient que l'étude gravimétrique laissait prévoir une forte porosité des formations géologiques sous-jacentes.

On s'intéressera davantage aux anomalies négatives qui jalonnent la vallée de la Dordogne et traversent le massif du Puy de l'Angle et du Barbier (à l'est) pouvant indiquer des pénétrations d'eau importantes vers les profondeurs de la caldera.

Mais l'élément le plus intéressant est la nette anomalie positive (avec son petit maximum très local le long de la faille principale) qui se superpose exactement avec la zone précédemment détectée comme très conductrice en profondeur.

Même en l'absence de couplage électro-thermique, on peut penser ici à des circulations d'eaux profondes du fait de la faiblesse de l'anomalie, de son extension et de son absence de corrélation avec le relief. En supposant que le milieu où circule l'eau serait à peu près homogène, on aurait une circulation des profondeurs vers la surface, ce qui serait une situation tout à fait favorable d'un point de vue géothermique.

POLARISATION
SPONTANEE

0 1 km

- Limites de la caldera
- == Failles internes probables
- ▣ Zone sélectionnée pour forages

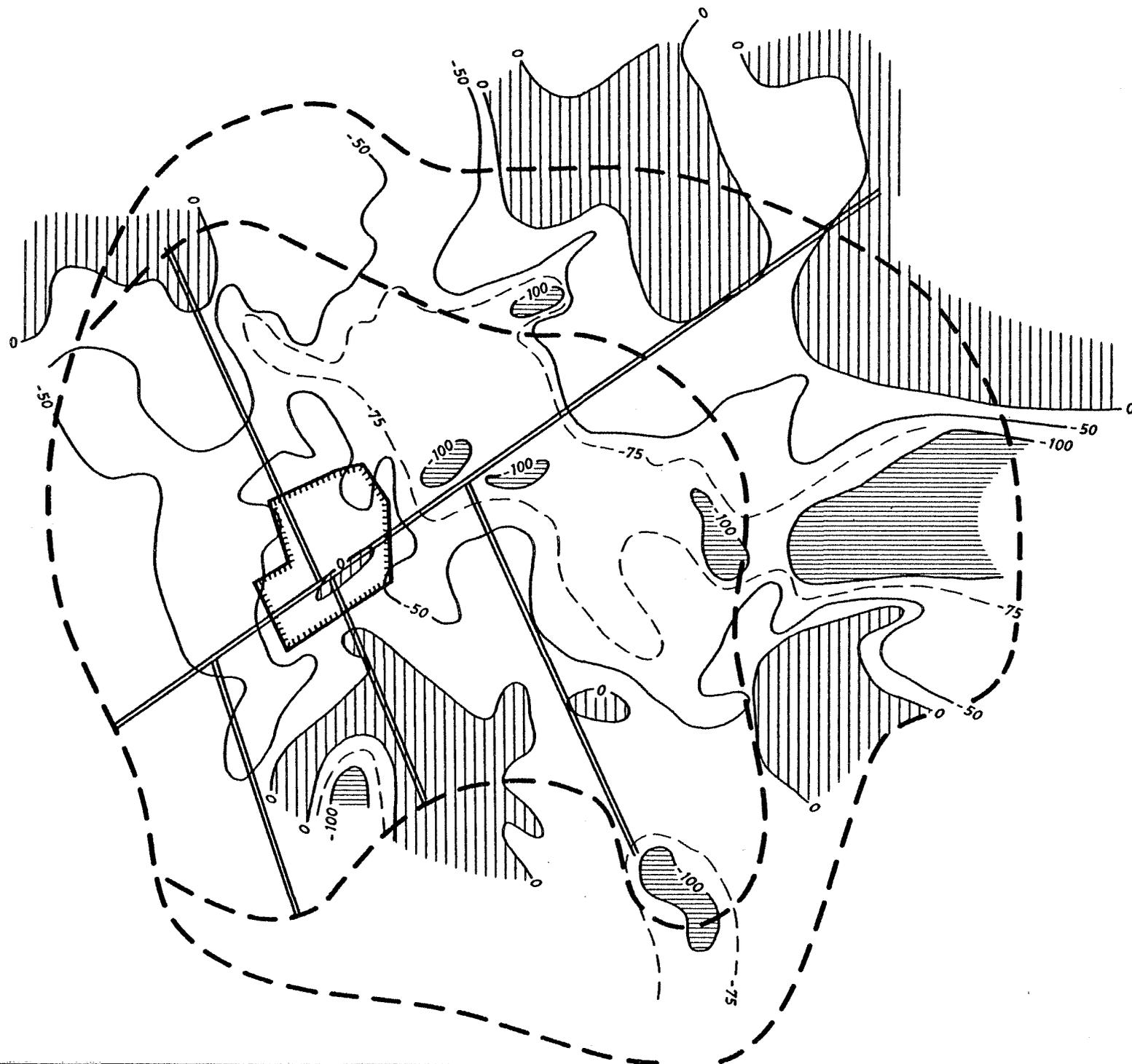


FIG. 32

3.4. - CONCLUSION GEOPHYSIQUE ET SELECTION DE CIBLES DE FORAGE

L'ensemble des résultats acquis est reporté sur la coupe de la figure 33, traversant la caldera en direction SN-NE. La région centrale de la caldera présente une superposition de caractéristiques géophysiques attrayantes (zone A, figure 32) :

- épaisseur maximale des formations de remplissage d'après la gravimétrie
- intersection des grands systèmes de fractures observées sur diverses cartes (gravimétrie, magnétisme, magnétotellurique)
- conductance la plus élevée en M.T. 5 EX
- montée du toit du conducteur profond à moins de 2 000 m (M.T. harmonique)
- petite anomalie de PS
- anomalie de bruit sismique en cours d'étude

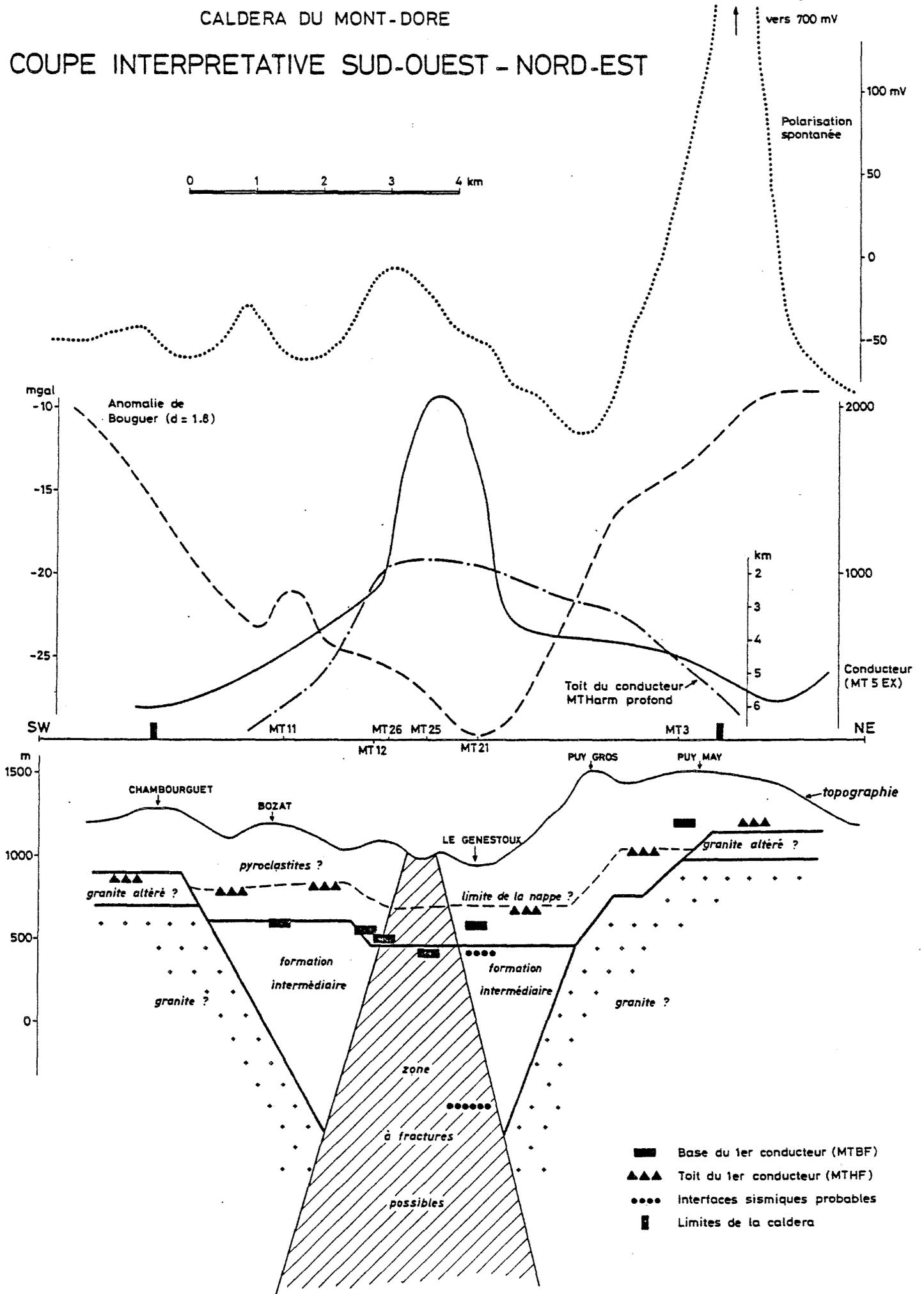
Une autre zone d'intérêt se dégage le long de la limite est de la caldera (vallée du Sancy au sud du Mont Dore). On y observe également les anomalies de gravité et de conductance, quoiqu'avec une amplitude moindre qu'en A, on y observe aussi une remontée du toit du conducteur profond, de fortes discontinuités liées aux accidents tectoniques et une anomalie de PS extraordinairement élevée. L'intensité du bruit sismique est la plus importante de la zone, mais son origine reste à préciser.

Cette seconde zone donne les meilleurs résultats avec les méthodes les moins conventionnelles, mais apparaît moins attractive si l'on considère les résultats des méthodes les plus classiques.

FIG. 33

CALDERA DU MONT-DORE

COUPE INTERPRETATIVE SUD-OUEST - NORD-EST



4. - STRATEGIE D'EXPLORATION PAR FORAGE

4.1. - INTRODUCTION

La région du Mont Dore avait été sélectionnée sur la base d'une reconnaissance géothermique régionale dans le massif central français. La prospection intégrée que nous concluons aujourd'hui permet de préciser que les premières hypothèses se confirment à savoir que :

- l'activité volcanique a été organisée autour de phases successives d'un volcan central à caldera, d'environ 7 km de diamètre, empli de plusieurs séries de formations principalement pyroclastiques.

- le massif a connu une activité magmatique longue et active encore dans la période récente (200 000 ans).

- tectonique complexe, liée aux failles bordières de la caldera mais aussi au rejeu de la tectonique ancienne qui affecte l'ensemble de la zone et semble réactivée par les mouvements récents.

- les fluides géothermaux, affectés de phénomènes convectifs le long de ces fractures, sont équilibrés à une température de 150° C, et constituent plusieurs unités hydrogéochimiques indépendantes. Dans la région de Sancy, des "anomalies de fuite de réservoir" sont observées.

- le remplissage de la caldera pourrait dépasser 1 500 m d'épaisseur dans la zone centrale ; il serait constitué des formations pyroclastiques légères (ponces principalement) sur les premiers 500 à 700 mètres, surmontant des formations un peu plus denses, constituées de brèches volcaniques ou continentales détritiques, et/ou de socle fracturé.

- des zones de forte conductivité électrique s'observent à ces deux niveaux (700 et 2 000 mètres) qui pourraient constituer des réservoirs chauds.

- des anomalies de P.S. et de fortes discontinuités géophysiques indiquent une structure profonde discontinue, et des zones d'intérêt majeur.

A ce stade de l'exploration, toutes les méthodes géologiques, géochimiques et géographiques ayant été utilisées et interprétées, un modèle de champ peut être construit qui laisse apparaître des espoirs de gisement d'intérêt économique. Il n'y a plus rien d'autre à faire pour vérifier ces hypothèses que de reconnaître par forage les objectifs définis comme des réservoirs géothermiques potentiels.

4.2. - STRATEGIE DE FORAGE

Plusieurs méthodes s'offrent à ce stade de la reconnaissance d'un champ :

- forage de gradient
- forages de reconnaissance en petit diamètre "slim hole"
- forage(s) de reconnaissance en diamètre suffisant pour assurer la production (7").

L'implantation de forage de gradient, à une profondeur de quelques dizaines à quelques centaines de mètres est en général recommandée à ce stade. Dans bien des cas, reposant sur des bases géophysiques insuffisantes, ces forages ont constitué un piège car les gradients les plus élevés s'inversent souvent en profondeur (San Miguel, Lanzarote, Guatémala). Dans le cas du Mont Dore, la topographie accidentée de la géologie superficielle ne favorise pas une telle stratégie. Les discontinuités géologiques ou tectoniques et les circulations affectant les fractures indiqueront à coup sûr des gradients favorables au voisinage des émergences et moins favorables sur les points hauts surmontant des aquifères perchés. Enfin, la profondeur minimale à atteindre pour de tels forages serait de l'ordre de 500 à 1 000 m, profondeur du premier conducteur.

Du point de vue économique, la réalisation de 2 ou 3 forages à cette profondeur équivaut à un forage profond à 2 000 m de profondeur, ordre de grandeur du toit du conducteur profond dans la zone centrale. Nous préférons donc cette solution, du forage de reconnaissance du conducteur profond dans un diamètre suffisant, pour permettre une situation garantissant aussi bien une possibilité d'insertion dans un système de production à plusieurs puits qu'une reconversion en forage de recherche et d'expérimentation en cas d'échec.

L'idéal serait certainement de réaliser - comme on le fait habituellement en reconnaissance de champ géothermique par forage - 2 voire 3 forages profonds dans les zones d'intérêt majeur que nous avons pu détecter dans la zone centrale, et dans les régions du Mont Dore et du Sancy.

4.3. MODELE DE CHAMP ET CHOIX D'IMPLANTATION

4.3.1. - Source de chaleur constituée par une chambre magmatique située à profondeur moyenne dans la croûte (7 à 15 km), centrée bien sous la caldera et aujourd'hui sous la pointe constituant sa limite vers le Sud-Est. Indiquée par une anomalie profonde en "airmag" elle est centrée sous le massif du Sancy, où se concentre l'activité centrale la plus récente.

4.3. .2. - les réservoirs sont de deux types :

- un réservoir de type "sédimentaire" situé à la base du remplissage post-caldera, constitué de formation volcano-sédimentaires légères. Ce réservoir, compartimenté par des discontinuités tectoniques et/ou lithologiques (dykes, intrusions), alimente les diverses sources thermales.

- un réservoir profond, principalement contrôlé par la fracturation, constitué de roches contemporaines de la phase paroxysmale de mise en place de la caldera (brèches volcaniques sur socle fracturé).

Ce dernier réservoir, peu aléatoire, est aussi le plus susceptible de contenir des fluides à une température suffisante pour permettre une exploitation économique (> 150° C)

4.3.3.3. - Couverture constituée de matériaux volcano-sédimentaires (ponces, lahars, dépôts lacustres) souvent argilisés, recouverte au voisinage des bordures de la caldera de coulées récentes. Cette couverture est recoupée par une tectonique récente permettant les manifestations thermales.

4.3.4. - Dans le détail, la région centrale (zone A) apparaît comme étant la plus sûre, sur la base des méthodes les plus éprouvées : la géologie indique que nous sommes dans la zone de remplissage maximale et à proximité de l'intersection de directions tectoniques majeures.

La géochimie nous indique des températures bien corréllées entre divers géothermomètres, de l'ordre de 150° C. La géophysique nous montre que nous sommes au centre de toutes les anomalies les plus intenses : gravimétrie, conductivité, toit du conducteur profond. Nous l'avons donc choisie comme zone de première priorité pour le forage.

Une autre zone apparaît cependant également intéressante : l'est de la haute vallée de la Dordogne entre le Mont Dore et le Sancy (zone B). Dans cette région, outre l'extrême jeunesse du volcanisme, s'observent diverses manifestations thermales qui, si elles traduisent des données géothermométriques moins faibles, décèlent aussi des températures plus élevées et des "indices de fuites" repérées par des anomalies en éléments volatils. De plus, les méthodes géophysiques indiquent de bonnes caractéristiques en conductivité électrique, et de très violentes anomalies de P.S. Cette dernière région apparaît donc à la fois comme plus attrayante, et plus risquée.

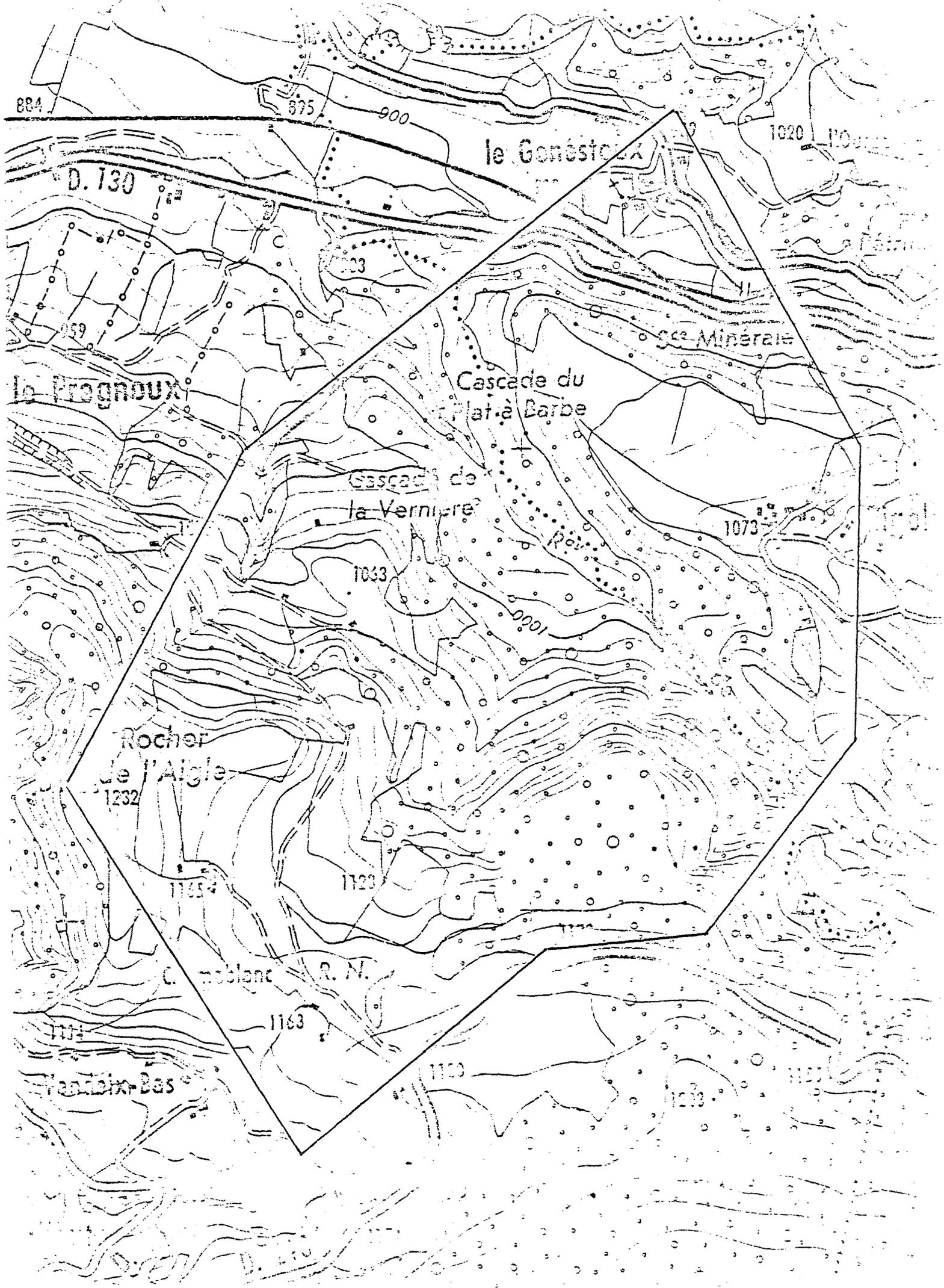
Des zones de réalimentation en eau froide pourraient y cotoyer des zones de remontée de fluides géothermaux profonds. Or nous n'avons pu cartographier ces phénomènes dans le détail, compte tenu du caractère très accidenté de cette partie du massif et y circonscrire une zone anormale précise comme dans le centre de la caldera. De plus, l'implantation d'une plate-forme de forage poserait des problèmes techniques importants, ce qui influencerait de façon sensible sur le coût de l'opération de forage. Cette zone B, potentiellement meilleure que la zone A, est conservée en seconde priorité pour le forage compte tenu des restrictions actuellement non levées.

L'emplacement finalement choisi pour forage obéit également à un souci d'environnement : il est situé à l'écart des principales voies commerciales ou touristiques, hors de vue des stations thermales du Mont Dore et de la Bourboule, et à la limite entre ces deux communes.

4.4. - DONNEES TECHNIQUES DU FORAGE

Après un avant trou, une première colonne 17"1/2 sera posée à quelques mètres. On forera ensuite pour poser une colonne 13"3/8 cimentée à 600 mètres environ, au toit du premier réservoir, ce qui permettra de le tester au cours du forage en diamètre inférieur. On fixera alors un tubage 9"5/8 vers 1 000 mètres de profondeur, puis on pénétrera en 7" dans les formations inférieures, supposées fracturées et productrices, jusqu'à 2 000 - 2 500 mètres de profondeur où le socle compact devrait être atteint.

FIG. 34



Des mesures régulières seront effectuées au cours du forage ; elles sont détaillées par ailleurs dans le programme de forage.

4.5. - PRODUCTION ET UTILISATION ATTENDUES

Il est évidemment bien hasardeux de tracer ici -comme nous le faisons en basse énergie dans les réservoirs déjà reconnus par forages pétroliers- des courbes prévisionnelles - débit - température - pression.

Le débit attendu -si l'on rencontre effectivement les zones de fractures- pourrait être de l'ordre de 100 à 250 T/h.

La température pourrait être de l'ordre de 150° C, mais en tout état de cause comprise dans une fourchette allant de 100° C à 200° C.

La pression sera certainement de l'ordre de la pression hydrostatique, soit de l'ordre de 200 bars en fond de trou.

Un diagramme prévisionnel débit/température/pression en fond de trou dans le réservoir laisse montrer plusieurs possibilités d'utilisation de puits de recherche.

- En cas de succès, il constitue un puits de production possible qui s'insérera dans le schéma de développement du champ, qui comprendra plusieurs puits de ce type dans la région.

- En cas d'échec, deux situations peuvent être envisagées :

- soit le puits produit de l'eau chaude (défaut de température) avec un bon débit (> 100 m³/h). Dans ce cas, des consommateurs de chaleur existent au Mont Dore et à la Bourboule. Nous avons réalisé une étude de faisabilité de cette situation que l'on trouvera par ailleurs montrant que la demande énergétique en basse énergie est suffisante pour justifier le coût d'une canalisation calorifugée transportant la chaleur depuis le puits vers les centres de consommation.

- soit le puits est chaud mais sec (défaut de réservoir). Dans ce cas, on possède un excellent puits de recherche pour réaliser des expériences de fracturation provoquée dans une perspective de réservoir en "roches chaudes sèches".

Les travaux réalisés, les interprétations retenues, et les modèles de champs qui en découlent nous semblent justifier la réalisation d'un forage de recherche et de contrôle des modèles de champ géothermique proposé susceptible de déboucher ensuite sur une opération d'intérêt industriel.



COMMISSION DES COMMUNAUTÉS
EUROPÉENNES
C.C.E

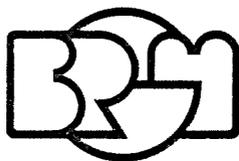
DELÉGATION GÉNÉRALE A LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE
D.G.R.S.T

MINISTÈRE DE L'INDUSTRIE

A N N E X E S

AU RAPPORT

PROSPECTION GEOTHERMIQUE
INTEGREE DANS LE MASSIF DU MONT-DORE



Département géothermie

B.P. 6009 - 45060 Orléans Cédex - Tél.: (38) 63.80.01

80 SGN 150 GTH

LISTES DES ANNEXES

- ANNEXE 1 : GRAVIMETRIE
*par A. GERARD et C. MECHENNET avec la participation de
S. BEAU et M. OLTRA*
- ANNEXE 2 : MAGNETOMETRIE
- 1 - Traitement des données aéromagnétiques *par A. GERARD*
- 2 - Modélisation des données aéromagnétiques
et mesures magnétométriques au sol. *par JF. LENAT*
- ANNEXE 3 : ELECTRICITE ET ELECTROMAGNETISME SUR MELOS
par S. LALLIER
- ANNEXE 4 : CAMPAGNE DE POLARISATION SPONTANEE sur la Caldera
du Mont-Dore (Puy de Dôme)
*par A. GERARD et P. PUVILLAND avec la collaboration
de V. BOURRET.*

ANNEXE 1

GRAVIMETRIE

*par A. GERARD et C. MECHENNET
avec la participation de S. BEAU et M. OLTRA*

1. EXECUTION DES MESURES

1.1. Généralités :

Les travaux de terrain ont été réalisés en deux phases : du 13 au 23 juin 1978, et du 07 au 20 septembre 1978 par Cl. MENNECHET.

Les appareils utilisés ont été le gravimètre Worden n° 641 (1ère phase) et le gravimètre LACOSTE-ROMBERG, modèle D n° 24 (2ème phase).

La plupart des mesures ont été effectuées sur repères I.G.N. du 6ème ordre (points cotés par restitution photogrammétrique). Une soixantaine de mesures de la 2ème phase ont nécessité un nivellement (zones Sancy, Puy May, Banne d'ordanche).

1.2. Statistiques :

. Personnel

1 opérateur sur le terrain pendant 22 jours ouvrés (voyage et étalonnage des gravimètres compris).

. Matériel

1 gravimètre ;
1 théodolite To ;
1 véhicule léger.

. Nombre de mesures

401 stations ;
22 reprises ;
66 mesures à la base ;
2 étalonnages ;
1 liaison de base.

S. BEAU a déterminé les corrections topographiques.

M. OLTRA a réalisé les opérations de nivellement.

1.3. Etalonnage des gravimètres :

Le gravimètre WORDEN n° 641 a toujours été utilisé à température constante grâce à son système de thermostatisation. Son coefficient d'étalonnage est donc une constante.

Du fait des fortes dénivellées sur la zone d'études, il a été jugé nécessaire de parfaire le vide de ce gravimètre avant le départ de la mission, afin de réduire les problèmes de variation de pression adiabatiques. Cette opération affectant les caractéristiques de l'appareil, un étalonnage sur les bases d'AUBUSSON et LETRADE a été effectué le 13 juin 1978. Il a été déterminé : $K = 0,9872$.

Le gravimètre LACOSTE-ROMBERG, modèle D n° 24, qui ne s'emploie qu'à température constante a été étalonné le 20 septembre 1978 sur les mêmes bases que le WORDEN. Il a été déterminé : $K = 0,9290$.

1.4. Bases :

Une nouvelle base a été créée au MONT-DORE (voir description ci-après) et reliée à la base d'ORCINES (Puy de Dôme).

La base d'ORCINES, établie en octobre 1962, appartient au réseau de bases de la carte gravimétrique de la France et la pesanteur y a pour valeur : $g_{\text{ORCINES}} = 980.513,16 \text{ mgal}$.

Ont été obtenus les résultats suivants :

$$g_{\text{MONT-DORE}} = g_{\text{ORCINES}} - 92,17 \text{ mgal}$$

$$g_{\text{MONT-DORE}} = g_{\text{ORCINES}} - 92,17 \text{ mgal} \quad \text{moyenne} = 92,17 \text{ mgal}$$

$$g_{\text{MONT-DORE}} = g_{\text{ORCINES}} - 92,16 \text{ mgal}$$

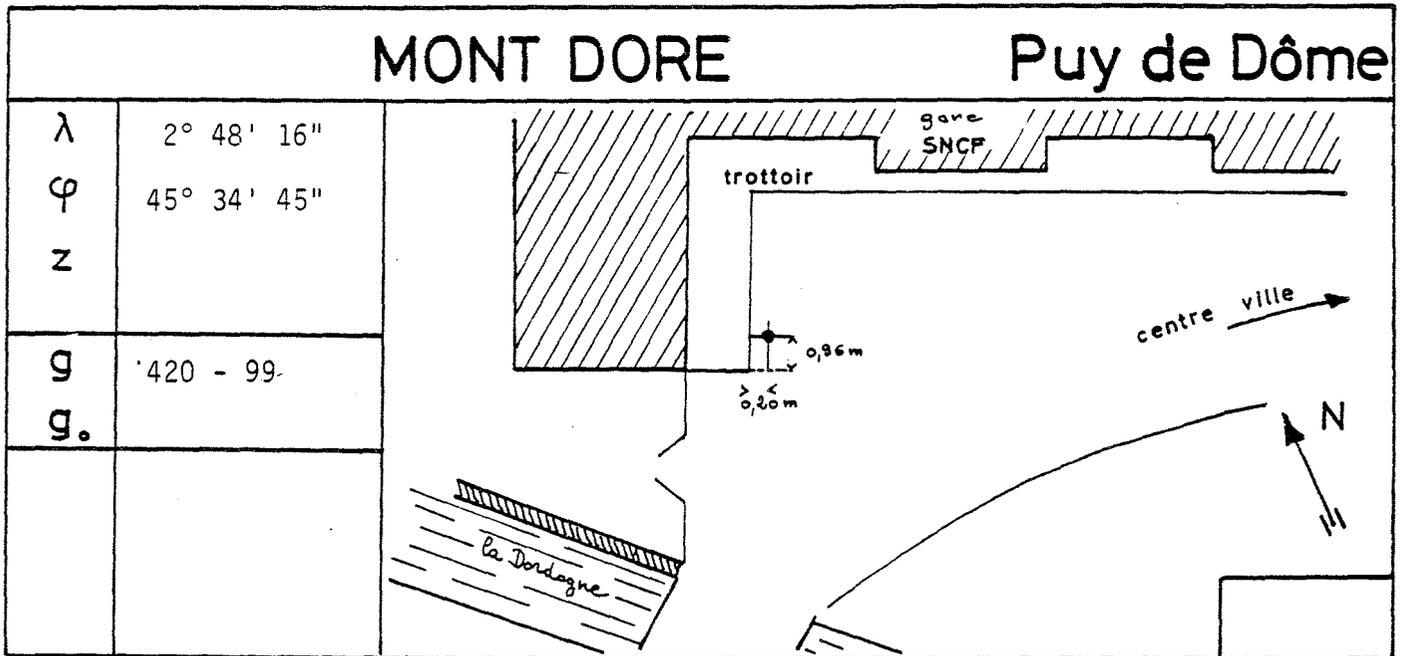
$$\text{D'où } g_{\text{MONT-DORE}} = 980.240,99 \text{ mgal.}$$

Toutes les stations ont été mesurées par rapport à cette base.

1.5. - Réitérations

Afin de contrôler la dérive du gravimètre et la qualité des mesures, un certain nombre de stations ont fait l'objet de plusieurs mesures à des passages différents :

- 17 stations ont été mesurées 2 fois ;
- 1 station a été mesurée 3 fois ;
- 1 station a été mesurée 4 fois.



2. COMPILATION

2.1. Utilisation des données antérieures (mesures CORON) :

En 1966, 1967, 1972 et 1974 le groupe S. CORON avait réalisé des mesures et calculé l'anomalie de Bouguer dans la région du MONT-DORE.

Ces mesures réparties environ à raison de une station pour quatre kilomètres carrés (environ 350 mesures) ont été utilisées pour une cartographie préliminaire de l'anomalie de Bouguer en densité 2,7.

C'est d'après cette carte que l'on a implanté les 400 stations complémentaires mesurées en 1978.

C'est en utilisant ensuite la totalité des mesures qu'a été réalisée la carte générale de l'anomalie de Bouguer à 1/100 000 présentée sur la planche 1.

Notons au passage la qualité métrologique du réseau S. CORON qui s'est intégré sans difficultés notables avec notre réseau complémentaire.

2.2. Compilation des données nouvelles :

L'anomalie de la pesanteur dite anomalie de Bouguer s'exprime en un point par la formule :

$$B = g - g_0 + (0,3086 - 0,0419 d) Z + CT$$

avec :

- g, pesanteur réelle mesurée,
- g₀, pesanteur dite normale qui est la valeur théorique de g au point de mesure. Cette valeur se calcule en fonction de la latitude par la formule de W.D. LAMBERT et F.W. DARLING (Bull. Géod. n° 1931, p. 327-340),
- d, densité attribuée aux terrains,
- Z, altitude de la station,
- CT, correction topographique, fonction des reliefs entourant la station. (Calcul fait jusqu'à 22 km, système Hammer).

La répartition des fermetures aux bases, la correction lunisolaire et le calcul de l'anomalie de Bouguer ont été effectués à l'aide d'un ordinateur I.B.M. 370/135.

2.3. Précision des résultats :

La précision sur l'anomalie de Bouguer est fonction de la précision avec laquelle sont obtenus les différents termes de la formule :

$$B = g - g_0 + (0,3086 - 0,0419 d) Z + CT$$

. Précision sur g :

Le gravimètre WORDEN a une précision de lecture de 0,01 mgal ; celle du LACOSTE-ROMBERG, modèle D est de 0,002 mgal, mais les lectures ont été notées arrondies au centième de mgal le plus proche.

La précision des mesures est en fait inférieure du fait de la dérive instrumentale, du défaut de localisation exacte du point de mesure, de la variation de hauteur du support du gravimètre, ... On évalue la précision des mesures à l'aide des points repris

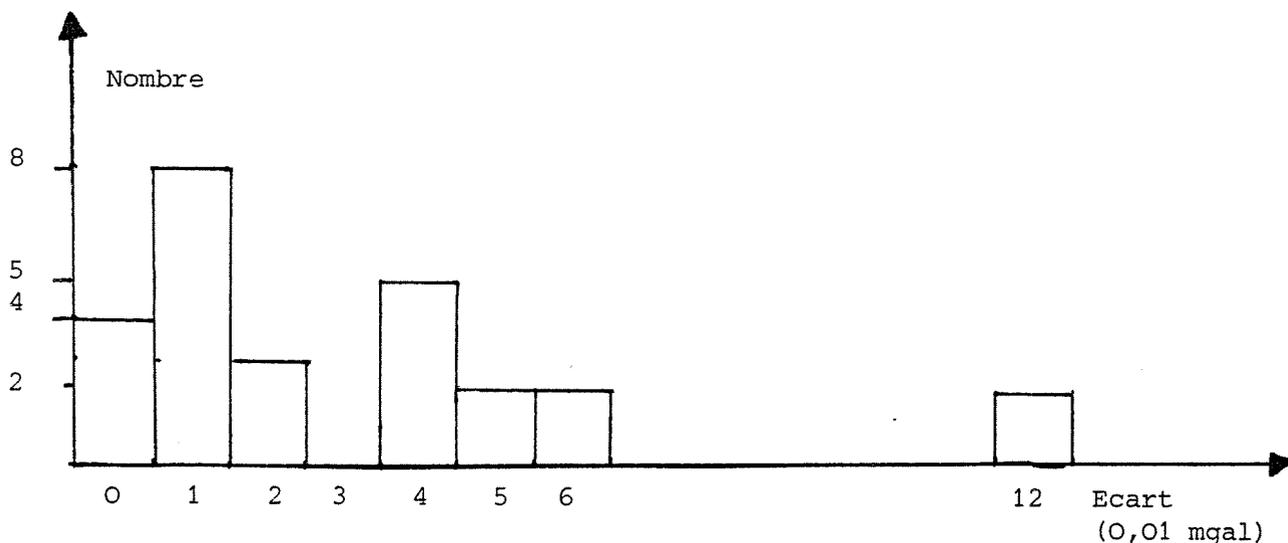
Le tableau 1 donne les valeurs des reprises reportées en histogramme, ci-après.

TABLEAU 1

N° de station	1ère mesure (mgal)	2ème mesure (mgal)	Δ G (0,01 mgal)
26	458,02	458,02	0
30	449,21	449,16	5
105	453,12	453,11	1
86	440,09	440,05	4
86	440,09	440,04	5
86	440,09	440,05	4
9	381,31	381,27	4
74	450,99	450,98	1
171	459,00	459,01	1
173	453,13	453,12	1
177	445,20	445,24	4
190	404,75	404,75	0
196	381,72	381,68	4
207	362,32	362,34	2
8	372,42	372,41	1
253	336,23	336,29	6
253	336,23	336,17	6
55	411,01	411,13	12
273	320,97	320,99	2
4	383,12	383,12	0
408	335,77	335,79	2
426	360,10	360,10	1
:	:	:	:

1 }
5 } 0
4 } 1

6 }
6 } 12



L'histogramme montre que des écarts supérieurs à 0,04 mgal sont exceptionnels.

On admettra donc comme un maximum :

$$\underline{eg = 0,04 \text{ mgal}}$$

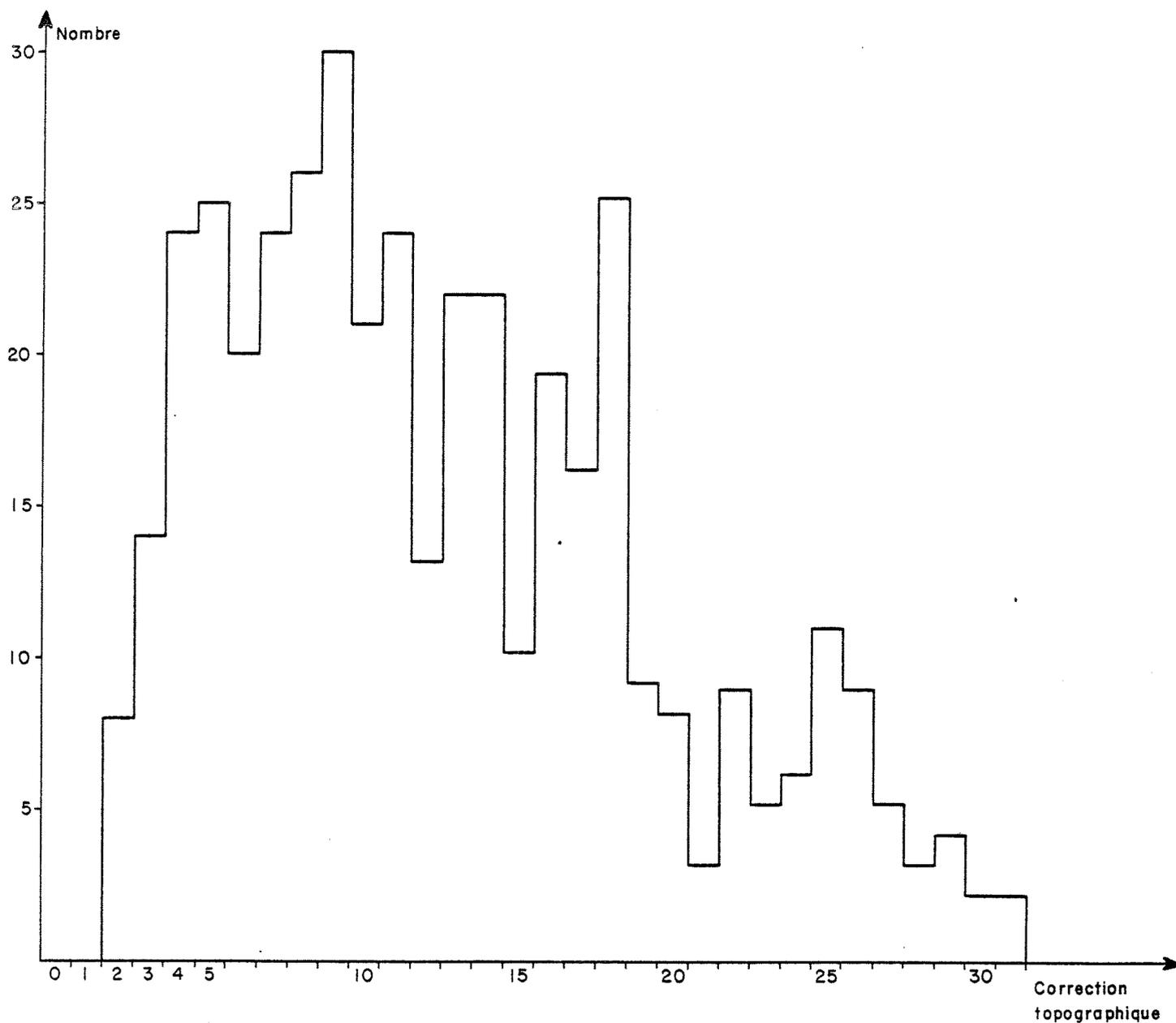
Précision sur go : la latitude des stations, utilisée pour le calcul de go, est déterminée avec une précision de 10 m. Cela correspond pour le lieu de l'étude à une incertitude de 0,01 mgal sur go. D'où ego = 0,01 mgal.

Précision sur CZ : quelle que soit la densité adoptée pour les terrains superficiels e vaut environ 0.2. Les stations ont été prises sur points cotés par restitution photogrammétrique ; dont la valeur est connue à 0,1 m près. On admettra donc une incertitude maximale de 0,1 m sur Z ; soit 0,02 mgal pour CZ. Des erreurs accidentelles pouvant atteindre 0,2 mgal peuvent cependant être parfois mises en évidence (point coté difficilement repérable).

$$\underline{eCZ = 0,02 \text{ mgal}}$$

Précision sur CT : sur l'ensemble de l'étude, la correction topographique a rarement dépassé 2 mgals comme l'indique l'histogramme ci-après.

On admet que la précision d'une correction est de 20 % ; soit 0,4 mgal.



HISTOGRAMMES DES CORRECTIONS TOPOGRAPHIQUES

D'où la précision sur CT :

$$e_{CT} = 0,4 \text{ mgal.}$$

Précision finale sur l'anomalie de Bouguer :

$$\begin{aligned} e_b &= e_g + e_{go} + e_{CZ} + e_{CT} \\ &= 0,04 + 0,01 + 0,02 + 0,4 \\ &= 0,47 \text{ mgal} \end{aligned}$$

d'où : $e_b \neq 0,50 \text{ mgal.}$

3. - CHOIX DE LA DENSITE DES TERRAINS SUPERFICIELS ET CARTOGRAPHIE DE L'ANOMALIE DE BOUGUER

Il est généralement admis que la densité doit être choisie pour obtenir une carte de l'anomalie de Bouguer dont la morphologie soit aussi différente que possible de celle de la carte topographique, à condition que la topographie ne soit pas elle même évidemment liée à la nature géologique des terrains superficiels.

Pour estimer la densité "idéale", nous avons commencé par calculer l'anomalie de Bouguer en utilisant une densité de 2,7, valeur normalement admise comme plausible en régions de socle affleurant.

Après contrôle de l'innocuité des corrections topo-isostatiques, sur ce document primitif, nous avons constaté que sur la région de la Caldera supposée et sur les massifs avoisinants (Banne d'Ordanche, Puy de Sancy, Puy May, etc...), l'anomalie de Bouguer présentait de très fortes anomalies négatives en phase avec les variations de l'altitude, bien que la carte géologique indique le plus souvent en surface des laves auxquelles on peut attribuer une densité élevée.

On pourra contrôler, ce qui précède sur la planche 1, en regardant d'une part le comportement de l'anomalie de Bouguer dans la zone cartographiée en densité 2,7, d'autre part les courbes reportées de la topographie dans la zone centrale.

On est conduit à penser que les reliefs sont en réalité constitués de formation de densité très inférieure à 2,7, sous les couches de lave. On pourrait envisager des cendres et ponces.

Nous intéressant essentiellement à la zone centrale, pour délimiter la Caldera et les fractures éventuelles qui l'affectent, nous avons diminué progressivement la densité utilisée. Ceci jusqu'au moment où, en l'absence de variations pétrographiques des formations superficielles, l'anomalie de Bouguer variait indépendamment de l'altitude sur des zones tests sélectionnées (Banne d'Ordanches, Massif de Sancy, Ensemble Puy de l'Angle, Puy de Barbier, Puy de Monne).

Le résultat est présenté sur la planche 2. On a dû admettre une densité de 1,8 pour atteindre ce résultat. Au fond de la Caldera, région de la Bourboule et du Mont-Dore, on observera que l'anomalie de Bouguer présente toujours de fortes variations associées à la topographie. Mais ici, la topographie est également très liée à la nature géologique des formations : Formations lourdes et donc plus dures, constituant les points hauts, les vallées étant remplies de cendres et ponces dont la densité est très faible.

 *****MEASURES S.COORDON 1966 A 1974 *****

BOUQUER (U=1.40) (MGALS)*100	G (MGALS)	X (KM)	Y (KM)	CT (U=2.31) (MGALS) METRES	ALTIITUDE (METRES)	NUMERO	LATITUDE NEG*10000.	LONGITUDE
1-2057	504.75	614.950	72.350	0.490	577.400	1.1	1365	507230. -2130.
1-1435	496.3750615.255		72.350	0.350	747.500	0.1	1460	507234. -2322.
1-1486	482.4380620.250		71.500	0.450	545.000	1.0	1500	507182. -2442.
1-146	470.1980625.375		72.350	0.350	524.500	0.0	1565	507246. -3765.
1-552	444.50	632.540	73.340	0.477	1025.000	1.0	1760	507340. -4695.
1-1062	471.9380635.750		73.100	0.450	594.000	0.0	1460	507490. -5100.
1-1150	477.5880636.750		73.550	0.450	571.100	0.0	1460	507650. -5245.
1-819	416.3750638.035		72.150	1.350	1132.000	0.0	2260	507200. -5420.
1-744	406.75	639.800	71.050	1.600	1175.000	0.0	2360	507090. -5570.
1-713	405.8750640.273		72.150	1.100	1182.000	0.0	2460	507200. -5740.
1-375	423.1380642.184		72.720	0.750	1125.000	0.0	2565	507254. -6020.
1-489	429.9380642.750		72.450	0.800	1090.000	0.0	2565	507222. -6100.
1-720	432.75	643.940	72.750	0.750	1070.000	0.0	2765	507274. -6252.
1-379	443.25	645.190	73.050	0.750	1050.000	0.0	2765	507255. -6400.
1-248	449.75	646.570	74.550	0.440	1023.000	0.0	2765	507435. -6412.
1-669	491.8750651.785		74.550	0.450	524.000	0.0	3365	507455. -7383.
1-1107	504.4380653.500		73.540	0.550	747.000	0.1	3405	507355. -7525.
1-650	488.25	650.730	74.730	0.550	540.000	0.0	4165	507445. -7732.
1-580	487.1380650.313		74.320	0.550	546.000	0.0	4265	507405. -7780.
1-904	480.75	650.900	70.020	0.730	544.000	0.0	4465	506990. -7250.
1-1328	491.00	653.770	70.420	0.540	782.500	0.0	4565	506990. -7660.
1-1549	517.3750652.977		73.550	0.710	535.500	0.0	5265	506370. -7540.
1-1632	499.50	650.540	73.550	0.750	717.400	0.0	5365	506554. -7200.
1-1277	476.75	647.700	74.550	0.520	523.500	0.0	5465	506402. -6788.
1-1400	463.00	645.710	74.320	1.250	877.000	0.0	5565	506340. -6527.
1-1407	461.1250644.964		74.220	1.350	825.200	0.0	5565	506400. -6400.
1-1161	462.25	643.520	73.700	1.700	868.300	0.1	5765	506350. -6217.
1-902	446.1250647.747		72.310	1.100	665.000	0.0	5865	506180. -6400.
1-1385	492.75	615.940	73.550	0.330	768.000	0.0017567	506835.	-6274.
1-1100	444.50	620.480	70.720	0.600	409.100	0.0017767	506654.	-2916.
1-1498	479.4380622.125		71.770	0.450	797.500	0.0017867	506190.	-3150.
1-1443	459.75	621.540	74.040	0.300	874.500	0.0017967	505878.	-3053.
1-1312	383.8750631.195		70.540	0.850	1211.500	0.0018267	506054.	-4438.
1-2067	390.1250637.313		72.370	2.500	1153.000	0.0018567	506225.	-5310.
1-1752	373.50	637.400	71.430	3.190	1234.000	0.0018867	506129.	-5320.
1-1408	358.6880637.563		70.530	2.900	1310.000	0.0018767	506040.	-5351.
1-265	409.75	644.130	70.540	1.040	1144.100	0.0019367	506037.	-6277.
1-452	430.9750646.703		72.270	0.830	1033.900	0.0019467	505695.	-6640.
1-1511	483.9380649.938		74.760	1.290	767.200	0.0019567	505950.	-7108.
1-1710	497.8750653.848		70.470	0.740	701.800	0.0019667	506024.	-7660.
1-1821	496.8750653.438		72.370	1.250	683.100	0.0020667	505527.	-7596.
1-1678	471.75	650.940	72.310	1.220	786.700	0.0020767	505208.	-7236.
1-657	426.8750646.855		74.770	0.330	1034.600	0.0020967	505453.	-6660.
1-670	396.9750642.984		72.540	1.020	1166.200	0.0020967	505570.	-6110.
1-702	390.1250642.035		72.270	0.750	1192.000	0.0021567	505505.	-5975.
1-706	388.4380640.000		72.740	0.720	1190.000	0.0021667	505562.	-5590.
1-1223	420.75	629.730	72.700	0.450	1040.000	0.0021767	505552.	-4225.
1-185	472.3750649.773		73.700	1.250	665.500	0.0022667	505855.	-7105.
1-1923	500.6250612.340		71.770	0.210	743.700	0.0023767	507754.	-1760.
1-2008	510.3750612.363		71.770	0.120	712.000	0.0024167	508158.	-1765.

 *****MEASURES S.COORDON 1966 A 1974 *****

BOUQUER (U=1.40) (MGALS)*100	G (MGALS)	X (KM)	Y (KM)	CT (U=2.31) (MGALS) METRES	ALTIITUDE (METRES)	NUMERO	LATITUDE NEG*10000.	LONGITUDE
0-1921	504.50	613.020	82.150	0.050	743.000	0.0024267	508212.	-1500.
0-1957	500.75	613.340	83.400	0.060	762.000	0.0024367	508332.	-1500.
0-1954	502.5250614.750		83.440	0.030	755.000	0.0024467	508375.	-2100.
0-2205	507.75	615.220	84.490	0.073	725.000	0.0024567	508434.	-2170.
0-2236	510.5250615.813		85.540	0.040	714.900	0.0024667	508540.	-2200.
0-1412	483.1250617.855		83.300	0.520	754.900	0.0027567	505323.	-2200.
0-1270	476.75	617.070	87.520	0.710	802.400	0.0027667	505733.	-2200.
0-1261	474.25	620.710	82.660	0.340	798.200	0.0027767	505254.	-2200.
0-1039	442.25	626.680	82.370	0.330	944.500	0.0027967	505228.	-3740.
0-956	421.25	631.130	82.940	0.510	1040.100	0.0028167	505243.	-4420.
0-1240	419.00	631.100	87.170	0.410	1051.000	0.0028267	505645.	-4420.
0-635	384.1880633.063		87.860	1.487	1225.000	0.0028467	505760.	-4700.
0-1314	475.00	639.340	76.130	0.430	872.300	0.0028772	507544.	-5610.
0-1135	464.9380639.563		76.770	0.760	926.000	0.0028772	507650.	-5600.
0-1202	472.50	639.540	77.670	0.650	894.000	0.0028772	507736.	-5650.
0-1241	475.1880640.000		78.290	0.580	883.000	0.0028772	507795.	-5700.
0-1135	481.6880640.375		79.080	0.710	862.000	0.0028772	507870.	-5760.
0-1131	495.3750640.749		78.580	0.330	803.000	0.0028772	507851.	-5830.
0-953	494.9380641.000		80.020	0.550	916.000	0.0028772	507959.	-5850.
0-114	500.1250641.825		80.220	0.380	800.500	0.0028772	507974.	-5900.
0-610	503.5250642.508		80.520	0.430	797.000	0.0028772	507945.	-6050.
0-306	501.3750643.340		80.950	0.560	820.500	0.0028772	508074.	-6100.
0-2	490.3750644.054		79.450	0.720	876.000	0.0028772	507947.	-6200.
0-392	480.1250644.449		77.430	0.460	933.000	0.0028772	507910.	-6400.
0-304	469.50	645.740	77.210	0.380	971.000	0.0028772	507944.	-6400.
0-200	458.00	646.200	76.420	0.400	972.000	0.0028772	507660.	-6500.
0-151	468.3750646.895		76.490	0.600	966.300	0.0028772	507618.	-6600.
0-146	470.00	647.840	76.230	0.450	958.000	0.0028772	507592.	-6600.
0-101	468.00	649.050	76.070	0.660	963.500	0.0028772	507576.	-6600.
0-109	476.50	649.540	75.060	0.580	945.200	0.0028772	507478.	-7000.
0-362	480.75	650.240	74.550	0.530	945.000	0.0028772	507454.	-7100.
0-638	485.75	649.730	73.550	0.630	947.000	0.0028772	507340.	-7000.
0-483	471.25	650.240	73.300	0.440	945.000	0.0028772	507335.	-7100.
0-251	470.00	649.100	73.140	0.740	930.000	0.0028772	507240.	-7100.
0-361	466.75	650.450	72.700	0.530	938.000	0.0028772	507257.	-7100.
0-246	463.25	650.860	72.200	0.540	956.000	0.0028772	507196.	-7200.
0-258	463.25	651.440	72.340	0.650	956.000	0.0028772	507210.	-7300.
0-527	471.25	651.540	71.540	0.620	903.000	0.0028772	507130.	-7300.
0-544	469.5250651.935		72.170	0.740	913.000	0.0028772	507142.	-7400.
0-503	469.25	652.250	72.700	0.540	920.000	0.0028772	507232.	-7400.
0-727	472.00	653.120	72.310	0.650	932.000	0.0028772	507265.	-7500.
0-752	472.75	652.100	74.700	0.720	916.000	0.0028772	507446.	-7600.
0-453	476.75	651.100	73.130	0.500	952.000	0.0028772	507457.	-7600.
0-474	483.25	651.220	72.370	0.600	974.000	0.0028772	507576.	-7600.
0-414	478.375	651.350	71.550	0.720	901.000	0.0028772	507647.	-7600.
0-791	494.25	653.340	73.500	0.450	904.900	0.0028772	507647.	-7600.
0-477	485.75	651.740	73.130	0.540	959.000	0.0028772	507772.	-7300.
0-150	475.8750649.855		76.070	0.449	922.000	0.0028772	507645.	-7710.
0-6	471.5250649.977		74.410	0.640	939.000	0.0028772	507415.	-6900.
0-137	452.25	648.240	72.450	0.560	966.000	0.0028772	507224.	-6900.

NUMBER	Y	X (KM)	Y (KM)	GT	ALTITUDE	NUMBER	LATITUDE	LONGITUDE	Y	X (KM)	Y (KM)	GT	ALTITUDE	NUMBER	LATITUDE	LONGITUDE	
(=1,40)	(MGAUS)			(MGAUS)	(MGAUS)	(=1,40)	(MGAUS)	(MGAUS)	(=1,40)	(MGAUS)	(MGAUS)	(MGAUS)	(MGAUS)	(=1,40)	(MGAUS)	(MGAUS)	
(40AL*100)	(-380000)			(MGAUS)	METRES	(40AL*100)	(-380000)	(-380000)	(40AL*100)	(-380000)	(-380000)	(MGAUS)	METRES	(40AL*100)	(-380000)	(-380000)	
0	-5	447.75	447.75	71.420	0.5301030.700	0.0020672	507122.	-6735.0	-3	475.135	447.75	45.340	1.170	454.000	0.0028472	508504.	-7042.
0	-277	443.125	447.75	71.420	0.5301030.000	0.0020772	507025.	-6774.0	-206	474.175	450.75	45.340	0.820	471.000	0.0028572	508500.	-7242.
0	-472	443.75	447.75	71.420	0.5301030.000	0.0020872	506928.	-6813.0	310	474.215	447.75	45.340	1.220	472.000	0.0028672	508500.	-7442.
0	-408	435.25	447.75	71.420	0.5301030.000	0.0020972	506831.	-6852.0	431	474.255	447.75	45.340	1.150	477.000	0.0028772	508504.	-7642.
0	-527	432.438	447.75	71.420	0.5301030.000	0.0021072	506734.	-6891.0	143	472.125	445.75	45.340	0.820	472.000	0.0028872	508504.	-7842.
0	-1048	430.125	445.000	71.420	0.5301030.000	0.0021172	506637.	-6930.0	-74	473.25	444.500	45.340	0.510	475.000	0.0028972	508504.	-8042.
0	-541	435.75	445.000	71.420	0.5301030.000	0.0021272	506540.	-6969.0	-276	473.438	444.250	45.340	0.430	479.000	0.0029072	508504.	-8242.
0	-439	440.438	445.000	71.420	0.5301030.000	0.0021372	506443.	-7008.0	-47	472.25	450.000	45.340	1.150	476.000	0.0029172	508504.	-8442.
0	-743	433.238	445.000	71.420	1.0201038.000	0.0021472	506346.	-7047.0	-68	471.75	450.370	45.340	0.900	487.000	0.0029272	508504.	-8642.
0	-245	452.538	445.000	71.420	0.5301030.000	0.0021572	507127.	-7086.0	-202	473.75	445.75	45.340	1.500	485.000	0.0029372	508514.	-8842.
0	-475	442.438	445.000	71.420	0.5301030.000	0.0021672	507130.	-7125.0	-206	473.438	444.500	45.340	1.450	487.000	0.0029472	508514.	-9042.
0	-575	428.25	445.000	71.420	0.5301030.000	0.0021772	507150.	-7164.0	-1425	523.00	638.380	45.340	0.380	494.000	0.0029572	508514.	-9242.
0	-621	429.438	445.000	71.420	0.5301030.000	0.0021872	507218.	-7203.0	-1231	518.125	638.000	45.340	0.380	496.000	0.0029672	508514.	-9442.
0	-548	446.538	445.000	71.420	0.5301030.000	0.0021972	507245.	-7242.0	-1400	514.25	637.310	45.340	0.400	494.000	0.0029772	508514.	-9642.
0	-1167	455.538	445.000	71.420	0.5301030.000	0.0022072	507313.	-7281.0	-604	521.525	635.234	45.340	0.400	495.000	0.0029872	508514.	-9842.
0	-1111	438.25	445.000	71.420	0.5301030.000	0.0022172	507340.	-7320.0	-634	510.438	634.438	45.340	0.380	494.000	0.0029972	508514.	-10042.
0	-1128	456.538	445.000	71.420	0.5301030.000	0.0022272	507367.	-7359.0	-444	508.438	634.250	45.340	0.380	497.000	0.0030072	508514.	-10242.
0	-47	444.25	444.250	71.420	0.5301030.000	0.0022372	508110.	-7398.0	-1012	513.138	634.063	45.340	0.380	493.000	0.0030172	508514.	-10442.
0	215	473.125	445.000	71.420	0.5301030.000	0.0022472	508160.	-7437.0	-1445	515.525	637.438	45.340	0.380	493.000	0.0030272	508514.	-10642.
0	348	466.75	445.000	71.420	0.5301030.000	0.0022572	508188.	-7476.0	-1700	501.00	636.440	45.340	0.420	493.000	0.0030372	508514.	-10842.
0	147	450.538	445.000	71.420	1.3001062.400	0.0022672	508243.	-7515.0	-2002	495.25	635.740	45.340	0.450	487.000	0.0030472	508514.	-11042.
0	78	466.25	445.000	71.420	0.5301030.000	0.0022772	508295.	-7554.0	-1933	490.375	635.309	45.340	0.480	485.000	0.0030572	508514.	-11242.
0	-142	473.438	445.000	71.420	0.5301030.000	0.0022872	508347.	-7593.0	-1960	483.25	634.040	45.340	0.480	483.000	0.0030672	508514.	-11442.
0	-57	454.25	445.000	71.420	0.5301030.000	0.0022972	508399.	-7632.0	-2013	478.438	633.125	45.340	0.480	480.500	0.0030772	508514.	-11642.
0	-370	501.75	445.000	71.420	0.5301030.000	0.0023072	508500.	-7671.0	-2191	478.75	631.470	45.340	0.450	483.000	0.0030872	508514.	-11842.
0	-544	440.75	445.000	71.420	0.5301030.000	0.0023172	507448.	-7710.0	-2255	474.525	630.523	45.340	0.430	488.000	0.0030972	508514.	-12042.
0	-447	456.538	445.000	71.420	0.5301030.000	0.0023272	507500.	-7749.0	-2317	473.525	629.340	45.340	0.380	484.500	0.0031072	508514.	-12242.
0	-1027	454.25	445.000	71.420	0.5301030.000	0.0023372	507552.	-7788.0	-2173	475.438	627.667	45.340	0.380	484.000	0.0031172	508514.	-12442.
0	-1051	456.138	445.000	71.420	0.5301030.000	0.0023472	507562.	-7827.0	-2371	471.438	625.438	45.340	0.380	483.000	0.0031272	508514.	-12642.
0	-1225	470.438	445.000	71.420	0.5301030.000	0.0023572	507604.	-7866.0	-2280	474.375	623.624	45.340	0.220	484.000	0.0031372	508514.	-12842.
0	-476	479.375	445.000	71.420	0.5301030.000	0.0023672	507734.	-7905.0	-859	475.25	635.400	45.340	0.360	494.000	0.0041172	507642.	-13042.
0	-460	470.138	445.000	71.420	0.5301030.000	0.0023772	507818.	-7944.0	-643	472.00	634.480	45.340	0.440	497.000	0.0041272	507727.	-13242.
0	-940	482.75	445.000	71.420	0.5301030.000	0.0023872	507916.	-7983.0	-823	472.25	633.930	45.340	0.440	495.000	0.0041372	507750.	-13442.
0	-1088	496.25	445.000	71.420	0.5301030.000	0.0023972	508040.	-8022.0	-422	475.138	633.250	45.340	0.450	490.000	0.0041472	507750.	-13642.
0	-1036	500.25	445.000	71.420	0.5301030.000	0.0024072	508137.	-8061.0	-1260	487.50	631.900	45.340	0.540	427.500	0.0041572	507750.	-13842.
0	-1251	512.00	445.000	71.420	0.5301030.000	0.0024172	508150.	-8100.0	-866	465.25	630.350	45.340	0.420	441.00	0.0041672	507758.	-14042.
0	-433	509.25	445.000	71.420	0.5301030.000	0.0024272	508204.	-8139.0	-968	458.375	628.969	45.340	0.360	469.000	0.0041772	507832.	-14242.
0	-488	509.138	445.000	71.420	0.5301030.000	0.0024372	508215.	-8178.0	-1040	464.375	627.023	45.340	0.330	439.100	0.0041872	507793.	-14442.
0	-828	511.125	445.000	71.420	0.5301030.000	0.0024472	508228.	-8217.0	-1279	463.50	625.090	45.340	0.360	431.900	0.0041972	507775.	-14642.
0	-525	507.75	445.000	71.420	0.5301030.000	0.0024572	508340.	-8256.0	-745	468.438	623.625	45.340	0.400	418.000	0.0042072	507452.	-14842.
0	-537	510.00	445.000	71.420	0.5301030.000	0.0024672	508314.	-8295.0	-1187	477.438	622.020	45.340	0.380	416.000	0.0042172	507533.	-15042.
0	-529	507.125	445.000	71.420	0.5301030.000	0.0024772	508432.	-8334.0	-1353	484.25	620.440	45.340	0.320	422.000	0.0042272	507604.	-15242.
0	-578	509.138	445.000	71.420	0.5301030.000	0.0024872	508484.	-8373.0	-1759	494.438	620.144	45.340	0.250	414.000	0.0042372	507685.	-15442.
0	-139	496.75	445.000	71.420	0.5301030.000	0.0024972	508546.	-8412.0	-1828	490.375	619.344	45.340	0.230	410.000	0.0042472	507766.	-15642.
0	-140	475.125	445.000	71.420	0.5301030.000	0.0025072	508555.	-8451.0	-1942	494.25	618.210	45.340	0.150	410.000	0.0042572	507784.	-15842.
0	45	489.125	445.000	71.420	0.5301030.000	0.0025172	508580.	-8490.0	-1973	497.125	618.247	45.340	0.180	410.000	0.0042672	507820.	-16042.
0	448	478.75	445.000	71.420	0.5301030.000	0.0025272	508642.	-8529.0	-2022	500.438	618.000	45.340	0.250	418.000	0.0042772	507727.	-16242.
0	512	468.438	445.000	71.420	0.5301030.000	0.0025372	508704.	-8568.0	-2187	497.50	617.240	45.340	0.150	410.000	0.0042872	507844.	-16442.
0	236	450.25	445.000	71.420	1.2001077.000	0.0025472	508766.	-8607.0	-2059	491.375	617.140	45.340	0.180	410.000	0.0042972	508343.	-16642.
0	-103	457.00	445.000	71.420	1.3001033.000	0.0025572	508828.	-8646.0	-2442	507.75	617.020	45.340	0.180	417.000	0.0043072	508312.	-16842.

***** S. CORON 1964 A 1974 *****
 ***** S. CORON 1964 A 1974 *****
 ***** S. CORON 1964 A 1974 *****

STATION	CL	ALTITUDE (M)	LONGITUDE (M)	LATITUDE (M)	LONGITUDE (M)	LATITUDE (M)	LONGITUDE (M)	LATITUDE (M)
4995	0	500	120.000	30.554	115.000	30.554	120.000	30.554
4996	0	500	120.000	30.554	115.000	30.554	120.000	30.554
4997	0	500	120.000	30.554	115.000	30.554	120.000	30.554
4998	0	500	120.000	30.554	115.000	30.554	120.000	30.554
4999	0	500	120.000	30.554	115.000	30.554	120.000	30.554
5000	0	500	120.000	30.554	115.000	30.554	120.000	30.554
5001	0	500	120.000	30.554	115.000	30.554	120.000	30.554
5002	0	500	120.000	30.554	115.000	30.554	120.000	30.554
5003	0	500	120.000	30.554	115.000	30.554	120.000	30.554
5004	0	500	120.000	30.554	115.000	30.554	120.000	30.554
5005	0	500	120.000	30.554	115.000	30.554	120.000	30.554
5006	0	500	120.000	30.554	115.000	30.554	120.000	30.554
5007	0	500	120.000	30.554	115.000	30.554	120.000	30.554
5008	0	500	120.000	30.554	115.000	30.554	120.000	30.554
5009	0	500	120.000	30.554	115.000	30.554	120.000	30.554
5010	0	500	120.000	30.554	115.000	30.554	120.000	30.554

RESOURCES S. CO. 1966 A 1974

BOGUEY (U=1.0)	G (MGALS)	X(KM)	Y(KM)	CT (U=2.3)	ALTITUDE (MGALS) METRES
-575	439.00	644.500	67.500	0.000175.000	0.00056972 505422. -6350.
-740	431.50	643.500	67.500	0.000175.000	0.00056972 505422. -6350.
-770	435.00	647.500	67.500	0.000175.000	0.00056972 505422. -6350.
-746	435.4750650.500	67.130	67.130	0.000175.000	0.00056972 505422. -6350.
-1102	477.75	651.700	68.150	0.000175.000	0.00056972 505422. -6350.
-1753	504.5250651.500	67.710	67.710	0.000175.000	0.00056972 505422. -6350.
-1329	431.4380650.180	67.750	67.750	0.000175.000	0.00056972 505422. -6350.
-1104	444.50	648.900	67.440	0.000175.000	0.00056972 505422. -6350.
-1240	455.9380645.313	67.440	67.440	0.000175.000	0.00056972 505422. -6350.
-1041	448.50	647.500	67.130	0.000175.000	0.00056972 505422. -6350.
-1104	446.75	649.740	67.110	0.000175.000	0.00056972 505422. -6350.
-1205	474.00	651.430	67.110	0.000175.000	0.00056972 505422. -6350.
-1146	464.25	650.670	67.120	0.000175.000	0.00056972 505422. -6350.
-1413	468.3750649.402	67.170	67.170	0.000175.000	0.00056972 505422. -6350.
-504	445.6380648.553	67.010	67.010	0.000175.000	0.00056972 505422. -6350.
-317	439.25	647.750	67.130	0.000175.000	0.00056972 505422. -6350.
-460	436.25	648.430	67.300	0.000175.000	0.00056972 505422. -6350.
115	404.1250650.313	67.010	67.010	0.000175.000	0.00056972 505422. -6350.
-49	420.50	650.900	67.300	0.000175.000	0.00056972 505422. -6350.
-127	409.25	647.900	67.300	0.000175.000	0.00056972 505422. -6350.
-705	434.50	650.250	67.440	0.000175.000	0.00056972 505422. -6350.
-1754	445.3750651.500	67.450	67.450	0.000175.000	0.00056972 505422. -6350.
254	473.50	649.110	67.500	0.000175.000	0.00056972 505422. -6350.
-250	433.5250651.020	67.810	67.810	0.000175.000	0.00056972 505422. -6350.
-468	439.5880651.180	67.000	67.000	0.000175.000	0.00056972 505422. -6350.
47	459.5250649.500	77.190	77.190	0.000175.000	0.00056972 505422. -6350.
135	458.3750647.500	77.380	77.380	0.000175.000	0.00056972 505422. -6350.
93	459.3750644.250	75.130	75.130	0.000175.000	0.00056972 505422. -6350.
-211	434.3750650.200	67.430	67.430	0.000175.000	0.00056972 505422. -6350.
79	470.00	649.150	67.250	0.000175.000	0.00056972 505422. -6350.
378	458.50	647.770	67.380	0.000175.000	0.00056972 505422. -6350.
576	476.75	646.850	67.160	0.000175.000	0.00056972 505422. -6350.
278	461.5250646.023	67.270	67.270	0.000175.000	0.00056972 505422. -6350.
-2255	510.25	615.620	67.480	0.000175.000	0.00056972 505422. -6350.
-2055	501.4380613.375	76.000	76.000	0.000175.000	0.00056972 505422. -6350.
-1985	495.25	618.210	79.340	0.000175.000	0.00056972 505422. -6350.
-1668	494.1380617.250	75.170	75.170	0.000175.000	0.00056972 505422. -6350.
-1519	494.1880617.250	72.060	72.060	0.000175.000	0.00056972 505422. -6350.
-2022	500.4380612.180	70.400	70.400	0.000175.000	0.00056972 505422. -6350.
-1041	483.5380619.313	67.310	67.310	0.000175.000	0.00056972 505422. -6350.
-757	472.75	623.330	67.770	0.000175.000	0.00056972 505422. -6350.
-842	456.3750620.613	67.020	67.020	0.000175.000	0.00056972 505422. -6350.
-1187	469.25	620.810	67.100	0.000175.000	0.00056972 505422. -6350.
-1256	483.25	617.610	67.110	0.000175.000	0.00056972 505422. -6350.
-1242	476.75	619.000	67.130	0.000175.000	0.00056972 505422. -6350.
-1246	476.75	617.720	67.000	0.000175.000	0.00056972 505422. -6350.
-1721	478.50	616.840	67.300	0.000175.000	0.00056972 505422. -6350.
-2518	517.25	616.100	67.800	0.000175.000	0.00056972 505422. -6350.
-1553	441.9380612.438	67.430	67.430	0.000175.000	0.00056972 505422. -6350.
-2128	488.50	612.840	67.700	0.000175.000	0.00056972 505422. -6350.
-2078	500.1380615.875	77.630	77.630	0.000175.000	0.00056972 505422. -6350.
-2134	390.25	635.530	67.470	0.000175.000	0.00056972 505422. -6350.

RESOURCES S. CO. 1975

BOGUEY (U=1.0)	G (MGALS)	X(KM)	Y(KM)	CT (U=2.3)	ALTITUDE (MGALS) METRES	NUMERO	LATITUDE DEG*10000.	LONGITU DEG*10000.
0	-2541	414.33	636.470	61.150	1.5111022.199	0.0	1	506410. -5191.
0	-2737	397.40	635.450	61.200	1.7391995.399	0.0	2	506314. -5000.
0	-2227	383.12	633.730	61.650	1.5141189.199	0.0	4	506361. -4411.
0	-2110	345.42	633.610	61.330	2.0151173.500	0.0	5	506328. -4725.
0	-2151	344.51	632.450	61.000	2.5771151.099	0.0	6	506122. -4670.
0	-2033	378.23	632.000	62.050	1.5131204.399	0.0	7	506292. -4560.
0	-1577	372.42	631.770	61.700	1.1041245.399	0.0	8	506166. -4520.
0	-1250	331.31	631.400	60.760	0.9181222.399	0.0	9	506073. -4467.
0	-1152	345.03	631.170	60.570	0.8051210.799	0.0	10	506054. -4434.
0	-1136	411.45	629.770	59.890	0.9011095.000	0.0	11	505987. -4234.
0	-1152	416.74	629.310	59.740	0.8491070.000	0.0	12	505972. -4164.
0	-2376	402.54	637.230	63.140	2.5181086.499	0.0	13	506307. -5227.
0	-2492	410.59	637.000	63.630	2.5091044.199	0.0	14	506355. -5221.
0	-2448	346.74	634.640	63.620	1.8591154.799	0.0	15	506357. -4411.
0	-2214	345.64	634.130	63.400	1.5431171.599	0.0	16	506345. -4400.
0	-2150	346.05	632.920	62.720	2.3351166.599	0.0	17	506224. -4400.
0	-1048	344.73	631.210	60.250	1.0441171.599	0.0	18	506022. -4434.
0	-1302	422.40	628.750	59.700	0.4491040.399	0.0	19	505464. -4400.
0	-1317	427.55	628.300	59.660	0.7681017.199	0.0	20	505464. -4400.
0	-1408	438.33	627.740	59.560	0.761 964.699	0.0	21	505454. -3945.
0	-1453	442.71	627.470	59.370	0.659 945.099	0.0	22	505936. -3907.
0	-1540	453.55	626.510	58.730	0.754 894.000	0.0	23	505842. -3779.
0	-7010	457.40	626.220	58.200	0.921 871.399	0.0	24	505819. -3728.
0	-1482	457.05	625.520	57.820	0.820 877.000	0.0	25	505722. -3624.
0	-1805	458.02	625.400	57.470	0.450 867.599	0.0	26	505747. -3611.
0	-1331	450.27	624.900	57.330	0.307 812.799	0.0	27	505713. -3540.
0	-1340	452.25	624.750	57.130	0.250 801.599	0.0	28	505713. -3514.
0	-1244	450.20	624.530	56.660	0.212 813.000	0.0	29	505665. -3487.
0	-1203	444.21	624.150	56.360	0.206 918.399	0.0	30	505596. -3434.
0	-1202	445.92	624.640	56.100	0.214 933.000	0.0	31	505610. -3504.
0	-1190	444.11	625.140	56.070	0.206 941.199	0.0	32	505607. -3574.
0	-1142	439.49	625.960	56.040	0.312 961.000	0.0	33	505603. -3630.
0	-1170	437.22	626.940	56.190	0.364 971.599	0.0	34	505618. -3837.
0	-1287	433.55	627.870	56.660	0.367 983.599	0.0	35	505665. -3962.
0	-1677	372.41	631.770	61.700	1.1041245.399	0.0	3	506166. -4520.
0	-2598	458.02	625.400	57.470	0.450 867.599	0.0	26	505747. -3611.
0	-1208	449.15	624.160	55.960	0.206 918.399	0.0	30	505596. -3434.
0	-1229	455.44	623.510	55.750	0.310 889.199	0.0	37	505575. -3342.
0	-1273	460.15	623.040	55.600	0.265 866.799	0.0	38	505561. -3275.
0	-1310	463.33	622.420	55.220	0.466 847.399	0.0	39	505523. -3258.
0	-1323	467.27	622.650	54.490	0.245 830.199	0.0	40	505450. -3219.
0	-1012	460.55	622.220	54.230	0.309 871.399	0.0	41	505424. -3154.
0	-1323	474.33	621.650	53.560	0.307 796.399	0.0	42	505357. -3081.
0	-1200	473.12	620.760	52.840	0.324 804.399	0.0	43	505285. -2475.
0	-1204	471.07	620.700	52.770	0.293 813.199	0.0	44	505279. -2441.
0	-1370	481.57	619.740	52.180	0.265 758.199	0.0	45	505220. -2410.
0	-1478	487.55	619.210	51.660	0.276 726.599	0.0	46	505184. -2429.
0	-1727	494.59	618.620	51.440	0.332 885.399	0.0	47	505146. -2667.
0	-1904	497.13	617.790	51.360	0.259 865.599	0.0	48	505174. -2527.
0	-1788	497.63	617.140	50.910	0.284 867.000	0.0	49	505044. -2434.

 *****B.K.G.M. 1978 *****

 *****B.K.G.M. 1978 *****

DOUVER (D=1.40)	G (MGALS)	X (KM)	Y (KM)	CT (D=2.34)	ALTITUDE (METRES)	NUMERO	LATITUDE (DEG*10000)	LONGITUDE (DEG*10000)	DOUVER (D=1.40)	G (MGALS)	X (KM)	Y (KM)	CT (D=2.34)	ALTITUDE (METRES)	NUMERO	LATITUDE (DEG*10000)	LONGITUDE (DEG*10000)		
-1919	502.57	616.430	50.450	0.441	637.500	0.0	50	505049.	-2404.0	-641	475.17	622.140	67.500	0.376	875.899	0.0	101	506950.	-3154.
-2011	498.29	615.870	50.450	0.207	653.200	0.0	51	505048.	-2254.0	-738	476.79	621.470	67.190	0.362	865.399	0.0	102	506920.	-3058.
-1903	493.02	615.400	50.450	0.304	660.299	0.0	52	505049.	-2187.0	-871	479.79	620.740	68.840	0.374	845.599	0.0	103	506895.	-2960.
-1679	369.51	637.550	54.110	2.005	1262.799	0.0	53	506404.	-5345.0	-908	482.14	620.470	68.640	0.362	833.199	0.0	104	506865.	-2916.
-1418	359.91	637.970	63.700	2.528	1312.799	0.0	54	506366.	-5404.0	-491	453.12	623.240	63.540	0.407	940.799	0.0	105	506845.	-3308.
-393	411.01	641.000	62.170	1.423	1133.399	0.0	55	506209.	-5975.0	-871	454.19	622.870	63.510	0.400	937.000	0.0	106	506815.	-3255.
-348	420.93	642.420	63.070	1.811	1096.099	0.0	56	506297.	-6037.0	-1235	468.90	622.360	62.480	0.474	854.199	0.0	107	506790.	-3145.
-1023	462.55	643.940	63.560	1.949	889.199	0.0	57	506345.	-6254.0	-1091	464.96	621.900	62.590	0.547	877.500	0.0	108	506760.	-3116.
-1098	464.55	644.530	63.810	1.900	878.399	0.0	58	506369.	-6338.0	-1104	470.95	621.360	62.630	0.688	850.799	0.0	109	506730.	-3040.
-1302	461.08	644.990	64.060	1.602	886.399	0.0	59	506394.	-6404.0	-1124	473.09	620.840	62.940	0.753	841.799	0.0	110	506700.	-2966.
-1320	462.58	646.170	63.970	1.237	880.000	0.0	60	506394.	-6571.0	-1071	473.22	620.450	63.100	0.731	844.000	0.0	111	506670.	-2910.
-1254	466.88	646.390	64.140	1.227	864.899	0.0	61	506401.	-6603.2	-892	453.11	623.240	63.540	0.407	940.799	0.0	112	506640.	-2860.
-1271	467.07	647.200	63.490	0.960	862.000	0.0	62	506335.	-6717.0	-1100	456.04	623.900	63.170	0.398	918.000	0.0	113	506610.	-2801.
-1272	471.54	647.490	63.820	0.922	844.000	0.0	63	506368.	-6759.0	-1018	449.95	624.570	63.470	0.431	948.599	0.0	114	506580.	-2747.
-1197	476.08	648.500	64.070	1.085	828.000	0.0	64	506342.	-6917.2	-1038	440.05	625.360	63.610	0.600	990.299	0.0	115	506550.	-2694.
-1134	487.34	649.380	64.620	0.632	785.599	0.0	65	506447.	-7079.0	-1084	432.49	626.160	63.530	0.586	1020.599	0.0	116	506520.	-2643.
-1145	487.45	649.640	63.550	0.931	778.099	0.0	66	506351.	-7065.0	-1074	420.52	627.170	63.730	0.722	1072.799	0.0	117	506490.	-2597.
-1147	473.55	651.470	62.030	1.151	832.199	0.0	67	506186.	-7323.3	-1039	440.04	625.360	63.610	0.600	990.299	0.0	118	506460.	-2549.
-1169	484.41	650.450	62.420	1.062	787.599	0.0	68	506226.	-7258.0	-1322	432.75	625.760	57.100	0.587	986.399	0.0	119	506430.	-2494.
-1529	500.54	650.320	63.340	1.206	705.299	0.0	69	506318.	-7151.0	-1185	420.70	624.750	57.290	0.682	1044.799	0.0	120	506400.	-2440.
-2544	423.54	636.660	64.850	1.412	496.799	0.0	70	506440.	-7190.0	-1161	415.23	630.310	57.450	0.736	1069.799	0.0	121	506370.	-2385.
-2521	428.60	635.440	65.310	2.015	476.599	0.0	71	506525.	-5124.0	-1075	409.93	631.300	57.470	0.721	1096.399	0.0	122	506340.	-2330.
-2408	417.72	635.470	65.560	2.273	1027.799	0.0	72	506550.	-5043.2	-1264	381.27	631.400	60.750	0.918	1222.399	0.0	123	506310.	-2275.
-2971	433.75	634.320	65.650	1.638	939.199	0.0	73	506560.	-4586.0	-960	408.94	631.710	57.330	0.690	1105.199	0.0	124	506280.	-2220.
-2913	450.99	632.280	65.600	1.632	865.399	0.0	74	506556.	-4546.0	-724	391.21	632.730	57.560	0.580	1192.799	0.0	125	506250.	-2165.
-1942	453.55	630.780	65.180	0.877	897.799	0.0	75	506515.	-4382.0	-655	384.32	633.090	57.660	0.566	1225.799	0.0	126	506220.	-2110.
-1815	455.83	630.250	65.490	0.869	894.399	0.0	76	506546.	-4307.0	-585	360.30	633.710	58.070	0.863	1332.599	0.0	127	506190.	-2055.
-1640	400.95	629.490	64.290	0.954	1133.799	0.0	77	506426.	-4264.0	-449	353.73	634.180	58.170	0.928	1366.799	0.0	128	506160.	-2000.
-1557	391.23	630.450	63.890	1.219	1176.899	0.0	78	506386.	-4350.8	-641	357.12	634.160	59.090	1.068	1344.799	0.0	129	506130.	-1945.
-2175	392.36	631.050	64.400	1.602	1145.000	0.0	79	506437.	-4421.4	-1038	440.05	625.360	63.610	0.600	990.299	0.0	130	506100.	-1890.
-1200	413.05	629.030	65.200	0.871	1099.299	0.0	80	506376.	-4132.0	-627	453.71	630.220	71.330	0.926	932.000	0.0	131	507070.	-4385.
-1244	412.40	629.350	65.250	0.924	1099.199	0.0	81	506356.	-4110.0	-498	464.90	629.850	71.570	0.834	933.599	0.0	132	507040.	-4330.
-1048	409.51	628.390	65.210	0.721	1114.399	0.0	82	506334.	-4048.0	-379	464.39	629.480	71.790	0.664	942.199	0.0	133	507010.	-4275.
-987	415.18	627.490	62.630	0.726	1095.599	0.0	83	506251.	-3940.0	-328	465.49	628.880	72.110	0.428	941.599	0.0	134	506980.	-4220.
-1048	419.54	627.300	62.720	0.754	1174.799	0.0	84	506271.	-3885.0	-420	466.55	629.790	72.280	0.504	933.399	0.0	135	506950.	-4165.
-1191	424.74	626.840	62.350	0.620	1045.199	0.0	85	506237.	-3819.0	-413	468.79	629.550	72.710	0.479	925.599	0.0	136	506920.	-4110.
-1034	440.07	625.360	63.610	0.600	990.299	0.0	86	506360.	-3609.0	-389	469.45	630.010	73.080	0.462	925.199	0.0	137	506890.	-4055.
-1462	467.28	629.470	65.880	0.693	845.599	0.0	87	506595.	-4267.0	-438	472.55	629.960	73.750	0.409	912.199	0.0	138	506860.	-4000.
-1752	467.52	629.540	66.370	0.660	850.799	0.0	88	506634.	-4206.0	-2306	392.05	632.770	67.060	1.584	1151.000	0.0	139	506830.	-3945.
-1505	469.53	629.010	65.790	0.619	852.199	0.0	89	506677.	-4131.0	-2216	388.71	633.110	67.150	2.072	1168.000	0.0	140	506800.	-3890.
-1359	481.53	627.850	67.370	0.797	809.599	0.0	91	506737.	-3456.0	-1443	372.14	633.530	67.610	2.263	1252.000	0.0	141	506770.	-3835.
-1059	477.90	627.190	65.050	0.777	841.399	0.0	92	506803.	-3473.0	-1866	370.71	633.810	67.590	2.641	1260.199	0.0	142	506740.	-3780.
-777	471.65	625.450	66.080	0.763	880.599	0.0	93	506807.	-3759.0	-1727	342.35	633.380	67.450	1.689	1391.799	0.0	143	506710.	-3725.
-754	467.29	625.420	66.130	0.629	840.599	0.0	94	506832.	-3620.0	-2044	346.90	632.220	66.950	1.695	1141.000	0.0	144	506680.	-3670.
-723	469.54	625.520	66.170	0.774	899.000	0.0	95	506876.	-3635.0	-1611	413.43	631.410	67.130	0.887	1389.000	0.0	145	506650.	-3615.
-788	468.32	624.450	66.740	0.653	801.399	0.0	96	506873.	-3555.0	-1417	412.43	631.710	66.050	1.003	1105.199	0.0	146	506620.	-3560.
-622	465.02	624.320	66.950	0.672	819.199	0.0	97	506895.	-3464.0	-1247	410.19	631.640	68.370	1.312	1124.000	0.0	147	506590.	-3505.
-753	463.66	623.650	67.330	0.420	896.000	0.0	98	506933.	-3371.0	-877	414.55	631.290	67.120	1.362	1123.599	0.0	148	506560.	-3450.
-713	472.71	623.350	67.470	0.439	884.799	0.0	99	506947.	-3326.0	-742	424.57	630.810	67.350	1.424	1067.000	0.0	149	506530.	-3395.
-816	476.82	622.540	67.480	0.409	862.799	0.0	100	506948.	-3217.8	-732	435.30	630.850	70.170	1.138	1055.000	0.0	150	507014.	-4395.

 *****B.G.M. 1978 *****

NUMBER	G	X (KM)	Y (KM)	CT	ALTITUDE
(1..80)	(MGALS)			(0=2.3)	(MGALS) METRES
(-980000)	(-980000)				
-706	452.47	624.760	07.600	0.024	471.199
-711	459.21	630.540	70.890	1.052	445.799
-058	456.73	630.480	71.860	0.708	963.399
-079	473.82	630.640	74.220	0.466	902.599
-043	470.13	630.800	74.740	0.404	921.599
-532	473.57	631.040	75.160	0.357	907.599
-479	461.40	631.740	74.910	0.304	962.599
-443	459.26	631.970	74.580	0.542	971.599
-409	455.59	632.110	74.300	0.632	985.000
-455	454.25	632.010	74.060	0.631	990.599
-2914	450.98	632.280	65.600	1.632	865.399
-558	448.29	632.650	73.760	0.481	1011.199
-626	444.14	632.670	73.500	0.514	1025.099
-772	437.93	632.890	72.910	0.544	1043.399
-837	433.13	633.320	72.670	0.604	1060.199
-771	423.75	633.190	71.910	0.630	1100.000
-643	412.92	633.820	71.290	1.133	1149.000
-600	406.70	642.450	74.450	0.491	11018.000
-514	446.44	642.630	74.700	0.522	1023.799
-303	450.44	643.130	74.740	0.492	1016.599
-140	451.46	643.760	75.020	0.455	976.799
187	459.55	644.290	75.970	0.420	1002.399
0	456.30	644.690	76.350	0.420	997.399
216	456.55	644.900	76.290	0.452	966.000
154	453.15	645.170	75.850	0.454	985.199
110	457.00	646.530	75.270	0.454	999.199
322	454.53	646.840	74.860	0.400	1024.799
199	453.13	646.910	74.500	0.442	1025.399
-84	449.94	646.540	74.070	0.454	1025.399
-80	452.51	646.060	74.050	0.462	1013.199
-133	449.47	645.740	73.590	0.510	1023.399
-252	445.20	645.530	73.270	0.566	1035.399
191	468.87	647.870	77.150	0.606	966.000
358	465.79	648.370	77.450	0.550	986.699
163	468.68	648.870	77.720	0.783	967.000
219	466.90	649.080	78.090	0.626	978.199
117	459.01	646.530	75.270	0.454	999.199
178	453.12	646.910	74.500	0.442	1025.399
-248	445.24	645.530	73.270	0.566	1035.399
-177	443.35	645.190	72.980	0.566	1041.299
-123	423.54	641.710	72.940	0.637	1106.399
-091	434.56	642.000	73.590	0.766	1065.000
-130	414.29	641.540	72.440	1.104	1143.000
-017	405.69	641.270	71.940	0.962	1183.000
-080	395.50	641.070	71.330	1.630	1260.000
-008	401.21	641.000	71.650	1.136	1202.599
-082	406.14	640.170	72.090	1.323	1182.799
-488	404.75	640.040	71.740	1.628	1190.599
-488	404.75	640.040	71.740	1.628	1190.599
-409	406.93	639.710	70.900	2.273	1177.099
-454	401.77	639.520	71.470	2.053	1202.599

 *****B.G.M. 1978 *****

NUMBER	LATITUDE	LONGITUDE	BOUSSIER	G	X (KM)	Y (KM)	CT	ALTITUDE
(DEG*10000)	(DEG*10000)	(DEG*10000)	(D=1.80)	(MGALS)			(0=2.3)	(MGALS) METRES
(-980000)	(-980000)	(-980000)	(-980000)	(-980000)				
147	506957.	-4241.	0	-529	393.99	638.490	71.210	2.0481232.000
140	507040.	-4352.	0	-591	386.55	638.360	70.950	2.2271259.399
149	507143.	-4344.	0	-701	384.79	638.240	07.600	2.7251256.599
150	507419.	-4347.	0	-773	381.72	637.750	07.050	1.7091267.799
151	507470.	-4411.	0	-985	370.95	637.260	06.690	1.4021304.799
152	507512.	-4426.	0	-913	361.26	636.760	06.700	1.3941350.000
153	507467.	-4526.	0	-1196	346.82	635.270	06.560	1.7091396.199
154	507454.	-4558.	0	-1423	325.03	634.660	06.340	2.0141480.399
155	507426.	-4578.	0	-1410	331.84	634.390	06.160	2.2161450.399
156	507402.	-4564.	2	-778	381.68	637.750	07.050	1.7091267.799
74	506556.	-4546.	0	-1456	390.85	637.860	06.110	2.3661186.799
157	507372.	-4655.	0	-1622	385.31	637.870	65.150	2.6531199.199
158	507345.	-4646.	0	-990	375.41	638.680	65.860	2.8951270.599
159	507280.	-4686.	8	-704	357.83	639.640	66.700	1.8261305.600
160	507262.	-4749.	0	-275	357.13	640.350	07.390	1.7231389.199
161	507186.	-4730.	0	-232	362.32	641.520	06.890	1.6161374.199
162	507124.	-4819.	0	-463	375.63	642.330	07.490	0.9121311.399
163	507434.	-6052.	0	-512	397.24	642.430	07.950	0.8971218.600
164	507459.	-6078.	0	-117	350.25	640.460	06.440	2.2241427.599
165	507483.	-6150.	2	-230	362.34	641.520	06.690	1.6161374.199
166	507491.	-6240.	0	-462	408.93	643.150	70.660	0.6061172.399
167	507585.	-6316.	0	-568	416.11	642.440	71.210	0.8161139.000
168	507523.	-6373.	0	-489	428.17	643.580	71.650	0.6541092.000
169	507615.	-6689.	0	-366	428.49	644.360	71.240	0.7691094.599
170	507553.	-6612.	0	-355	437.26	645.140	71.760	0.6481059.599
171	507514.	-6635.	0	-345	448.22	645.190	72.210	0.5941014.599
172	507472.	-6679.	0	-350	435.16	647.290	65.500	0.6561057.399
173	507430.	-6688.	0	-344	432.58	646.530	67.910	0.6671056.600
174	507344.	-6635.	0	-640	429.46	646.290	67.420	0.6621065.599
175	507345.	-6657.	0	-707	432.79	646.070	67.120	0.6741047.399
176	507340.	-6657.	0	-577	436.35	646.160	68.190	0.6101034.599
177	507314.	-6640.	0	-572	437.43	646.780	68.760	0.6671027.799
178	507700.	-6625.	0	-718	433.34	645.350	68.600	1.0541038.000
179	507711.	-6640.	0	-543	422.29	644.920	68.590	0.7731096.399
180	507717.	-6671.	0	-525	416.05	644.240	68.290	0.5511123.399
181	507743.	-7002.	0	-256	403.46	643.230	68.970	1.1191187.599
171	507514.	-6635.	0	-167	403.46	642.730	68.960	1.4081190.599
173	507430.	-6688.	0	-226	354.09	640.160	66.390	1.8041400.599
177	507314.	-6640.	8	-183	361.68	640.520	06.030	2.0001366.600
182	507260.	-6641.	0	-197	370.00	640.940	06.090	1.9701331.799
183	507249.	-6645.	0	-201	389.44	642.910	66.650	1.3741248.399
184	507349.	-6647.	0	-198	399.13	642.590	65.410	0.4751207.000
185	507234.	-6621.	0	-272	403.56	642.230	65.420	1.3291169.799
186	507184.	-6622.	8	-965	450.49	647.730	62.180	0.919 942.000
187	507124.	-6622.	0	-471	450.77	647.220	62.160	1.114 959.399
188	507176.	-6643.	0	-822	446.03	647.750	61.650	1.139 985.299
189	507200.	-6725.	0	-493	436.84	647.160	61.270	0.9901017.599
190	507165.	-6706.	8	-287	429.59	646.760	61.000	0.9181057.000
190	507165.	-6706.	0	-209	419.49	645.660	61.050	1.1141103.399
191	507041.	-6658.	0	-45	414.35	645.400	60.910	1.1091132.000
192	507139.	-6632.	0					

 *****B.G.M. 1978 *****

NOUVEAU (D=1.40) (MGAL*100)	G (MGALS)	X (KM)	Y (KM)	CI (D=2.39) (MGALS) METRES	ALTIITUDE	NUMERO	LATITUDE DEG*10000.	LONGITUDE
50	407.91	644.610	60.610	1.6911163.000	0.0	241	506050.	-6345.
47	374.64	644.110	59.720	1.1001219.399	0.0	242	505961.	-6274.
-33	409.67	643.760	60.840	1.1361152.500	0.0	243	506073.	-6225.
-218	422.95	644.690	62.340	1.3161092.000	0.0	244	506222.	-6359.
-1195	466.00	646.370	62.360	1.355 464.399	0.0	245	506223.	-6599.
-1326	467.40	646.920	62.700	1.363 454.000	0.0	246	506263.	-6677.
-197	429.03	645.580	62.680	1.4271067.399	0.0	247	506256.	-6486.
-182	420.53	643.650	61.590	1.3021101.399	0.0	248	506148.	-6239.
-497	337.38	639.190	62.530	1.8061447.399	0.0	249	506245.	-5577.
-1886	387.93	637.690	64.760	2.4661175.599	0.0	250	506469.	-5365.
-2260	401.15	636.490	65.240	2.6341104.000	0.0	251	506518.	-5195.
-874	336.23	638.610	62.720	1.8161436.799	0.0	253	506265.	-5494.
-3223	439.11	633.580	65.400	1.668 903.000	0.0	254	506535.	-4781.
-1796	494.00	613.080	73.250	0.260 761.800	0.0	1266	507318.	-1864.
-2845	435.20	632.740	65.380	1.667 936.000	0.0	255	506534.	-4661.
-680	336.17	638.610	62.720	1.8161436.799	0.0	253	506265.	-5494.
-246	352.51	639.920	62.610	2.4431386.199	0.0	256	506193.	-5680.
-278	360.55	640.100	62.150	2.4141352.899	0.0	257	506207.	-5706.
-268	356.29	641.430	62.370	1.7021238.000	0.0	258	506230.	-5495.
-370	393.50	641.220	62.610	1.4481211.500	0.0	259	506252.	-5866.
-351	411.13	641.990	62.190	1.9231133.399	0.0	260	506209.	-5975.
-625	403.55	640.610	60.240	2.6661135.000	0.0	261	506015.	-5777.
-624	494.55	641.020	60.150	1.8141136.799	0.0	261	506006.	-5835.
-725	373.97	640.330	59.740	2.4781174.799	0.0	262	505965.	-5736.
-1000	497.45	639.930	59.680	2.7191197.899	0.0	263	505978.	-5679.
-329	378.31	642.750	61.130	2.0761186.799	0.0	264	506108.	-6022.
-344	411.52	642.030	60.870	1.8121126.500	0.0	265	506077.	-5979.
-262	414.22	642.360	61.260	2.1681121.199	0.0	266	506116.	-6026.
-1101	447.62	642.610	61.770	1.430 446.000	0.0	267	506179.	-6053.
-1143	458.90	643.470	62.530	1.604 896.399	0.0	268	506272.	-6180.
-2192	386.43	635.900	67.140	1.7121169.399	0.0	269	506400.	-5110.
-1895	368.55	636.200	63.450	2.3061253.599	0.0	270	506342.	-5125.
-1623	352.30	636.280	62.600	1.8061335.600	0.0	271	506254.	-5153.
-1450	343.25	636.210	62.120	2.5461377.399	0.0	272	506206.	-5152.
-1490	320.97	636.180	61.500	2.4901469.799	0.0	273	506156.	-5147.
-149	413.00	643.110	64.950	1.3021147.000	0.0	274	506484.	-6137.
-248	417.11	643.630	64.500	1.6321122.399	0.0	275	506439.	-6210.
-409	429.73	642.470	64.310	1.6531059.599	0.0	276	506421.	-6045.
-105	401.40	641.380	63.990	2.4481186.799	0.0	277	506390.	-5890.
-17	400.82	641.180	63.690	2.3361197.399	0.0	278	506360.	-5841.
-1495	320.99	636.180	61.560	2.4801469.799	0.0	279	506150.	-5143.
-1345	306.75	636.160	61.170	2.5171535.599	0.0	279	506111.	-5144.
-1279	286.90	636.180	60.660	2.5061623.799	0.0	280	506100.	-5147.
-1303	274.67	636.240	60.530	2.5441674.199	0.0	281	506057.	-5155.
-1415	282.32	636.310	60.430	3.0051693.499	0.0	282	506037.	-5155.
-1000	280.15	636.320	60.050	2.5551658.000	0.0	283	505999.	-5150.
-1050	272.89	636.240	59.670	2.1551690.000	0.0	284	505961.	-5154.
-968	269.53	636.170	59.390	1.8891707.899	0.0	285	505933.	-5144.
-866	268.53	636.440	59.200	1.8851714.899	0.0	286	505914.	-5143.
-1001	371.58	637.290	62.310	2.8341153.599	0.0	287	506224.	-5305.

 *****B.G.M. 1978 *****

NOUVEAU (D=1.40) (MGAL*100)	G (MGALS)	X (KM)	Y (KM)	CI (D=2.39) (MGALS) METRES	ALTIITUDE	NUMERO	LATITUDE DEG*10000.	LONGITUDE
0	374.43	637.400	61.150	3.0491233.499	0.0	287	506124.	-5321.
0	376.25	637.400	60.230	3.2211275.299	0.0	288	506074.	-5329.
0	388.53	636.490	61.430	1.5301325.099	0.0	289	506016.	-5346.
0	375.57	637.150	61.110	2.6711250.600	0.0	291	506139.	-5248.
0	275.61	639.720	62.350	2.6051180.799	0.0	292	506174.	-5290.
0	314.94	639.700	62.350	2.6261204.399	0.0	294	506330.	-5652.
0	276.90	639.720	64.810	3.0051292.399	0.0	295	506473.	-5655.
0	276.93	639.250	64.310	3.1161702.299	0.0	296	506423.	-5588.
0	284.74	639.300	63.740	2.7951737.799	0.0	297	506366.	-5543.
0	305.13	638.470	63.310	2.5451265.799	0.0	298	506324.	-5475.
0	336.29	638.610	62.720	1.8161436.799	0.0	253	506265.	-5494.
0	286.00	637.660	59.140	1.5191657.799	0.0	297	505847.	-5456.
0	292.20	637.800	59.300	2.5721680.399	0.0	300	505929.	-5376.
0	307.29	638.050	59.600	1.8121553.599	0.0	301	505953.	-5412.
0	338.20	637.800	59.770	1.8151509.799	0.0	302	505922.	-5377.
0	430.81	632.300	64.470	1.437 751.199	0.0	303	506443.	-5494.
0	417.93	632.450	64.010	1.4041008.399	0.0	304	505937.	-5417.
0	338.55	635.910	61.940	2.6801397.799	0.0	305	506184.	-5189.
0	323.47	635.420	61.710	1.8191469.699	0.0	306	506165.	-5040.
0	317.04	635.990	62.000	1.9071492.199	0.0	307	506195.	-5480.
0	325.23	634.500	62.300	1.7041455.699	0.0	308	506225.	-5420.
0	328.03	633.930	62.550	1.8121433.699	0.0	309	506250.	-5427.
0	336.12	633.450	62.300	1.8091401.399	0.0	310	506225.	-5417.
0	340.12	633.430	62.430	2.2021377.000	0.0	311	506234.	-5475.
0	401.50	633.170	63.420	1.8261387.599	0.0	312	506338.	-5421.
0	383.12	633.730	63.600	1.3141100.199	0.0	4	506361.	-5401.
0	402.45	633.230	64.620	1.3351074.599	0.0	313	506478.	-5430.
0	420.37	632.170	65.140	1.206 996.399	0.0	314	506510.	-5486.
0	387.43	632.470	62.240	1.8141101.799	0.0	315	506220.	-5420.
0	393.97	632.120	62.690	1.3161133.799	0.0	316	506265.	-5471.
0	347.10	631.970	62.790	1.2221108.000	0.0	317	506275.	-5449.
0	388.34	631.630	62.730	1.1501212.600	0.0	318	506269.	-5501.
0	342.72	639.830	60.440	1.4361403.199	0.0	319	505836.	-5662.
0	320.11	639.400	60.650	1.4271508.599	0.0	320	505676.	-5601.
0	314.12	639.190	60.890	1.8111538.000	0.0	321	505881.	-5572.
0	280.19	638.450	57.490	1.5211685.199	0.0	322	505742.	-5467.
0	273.39	638.360	57.800	1.6551714.799	0.0	323	505773.	-5454.
0	282.30	638.650	57.210	1.8161672.599	0.0	324	505714.	-5495.
0	425.43	628.990	64.910	0.4561050.599	0.0	325	506449.	-5427.
0	417.76	628.600	64.240	0.9411080.599	0.0	326	506422.	-5471.
0	402.71	629.040	62.780	0.8401149.199	0.0	327	506277.	-5432.
0	378.53	629.550	62.790	0.8531100.399	0.0	328	506276.	-5405.
0	393.79	630.110	62.550	0.9011101.199	0.0	329	506252.	-5425.
0	391.33	630.630	62.570	1.0441195.199	0.0	330	506256.	-5434.
0	331.05	630.420	62.040	1.0471237.599	0.0	331	506201.	-5428.
0	405.50	629.690	62.360	0.8711133.399	0.0	332	506274.	-5472.
0	408.25	629.430	62.630	0.9711119.000	0.0	333	506208.	-5447.
0	419.43	627.550	61.500	1.1141064.599	0.0	334	506154.	-5495.
0	425.32	627.550	61.950	1.1041036.000	0.0	335	506193.	-5421.

ANNEXE 2

MAGNETOMETRIE

par A. GERARD - JF. LENAT' - R. BAYER - M. CUER

TRAITEMENT DES DONNEES AEROMAGNETIQUES

par
A. GERARD

Le champ donné sur la région qui nous intéresse, présenté figure 1, a été extrait d'un lever aéromagnétique de 10.000 km linéaires réalisé en 1972 en coopération entre le B.R.G.M. et l'I.N.A.G.

Une interprétation d'ensemble du lever a été publiée en 1975, par N. DEBEGLIA et A. GERARD, reprise en 1977, par N. DEBEGLIA, A. GERARD et C. WEBER.

Pour faciliter la lecture de la carte magnétique, on présente figure 2 ce que serait le champ magnétique s'il était dû à des structures aimantées verticalement et s'il avait été mesuré au voisinage du pôle. En l'absence d'aimantation rémanente, un tel champ à l'avantage de ramener les anomalies à la verticale des sources géologiques qui les créent, si elles ont des pendages voisins de la verticale, et de ne laisser subsister que les bipolarités liées à des pendages qui différeraient notablement de la verticale.

Sur les figures 3 et 4 on présente ce qui semble être, après analyse fréquentielle (SYBERG, 1972) les composantes du champ cartographié figure 2 respectivement liées aux sources d'origine apparemment profonde et aux sources situées à des niveaux intermédiaires ou superficiels.

On notera, sur la figure 4, la position des principaux "apex" magnétiques qui sont systématiquement associés aux flancs de la Caldera (d'après gravimétrie).

La partie centrale de la Caldera semble presque dépourvue de formations magnétiques, à l'exception de l'anomalie marquée (A) et de l'extension vers le Nord d'une anomalie beaucoup plus forte marquée (B). La comparaison de la carte magnétique à la carte géologique à 1/50 000 de R. BROUSSE montre immédiatement l'association qui existe entre ces anomalies (A) et (B) et des formations éruptives qui, compte-tenu de l'intensité des anomalies (A) et (B) peuvent être fort épaisses à cet endroit.

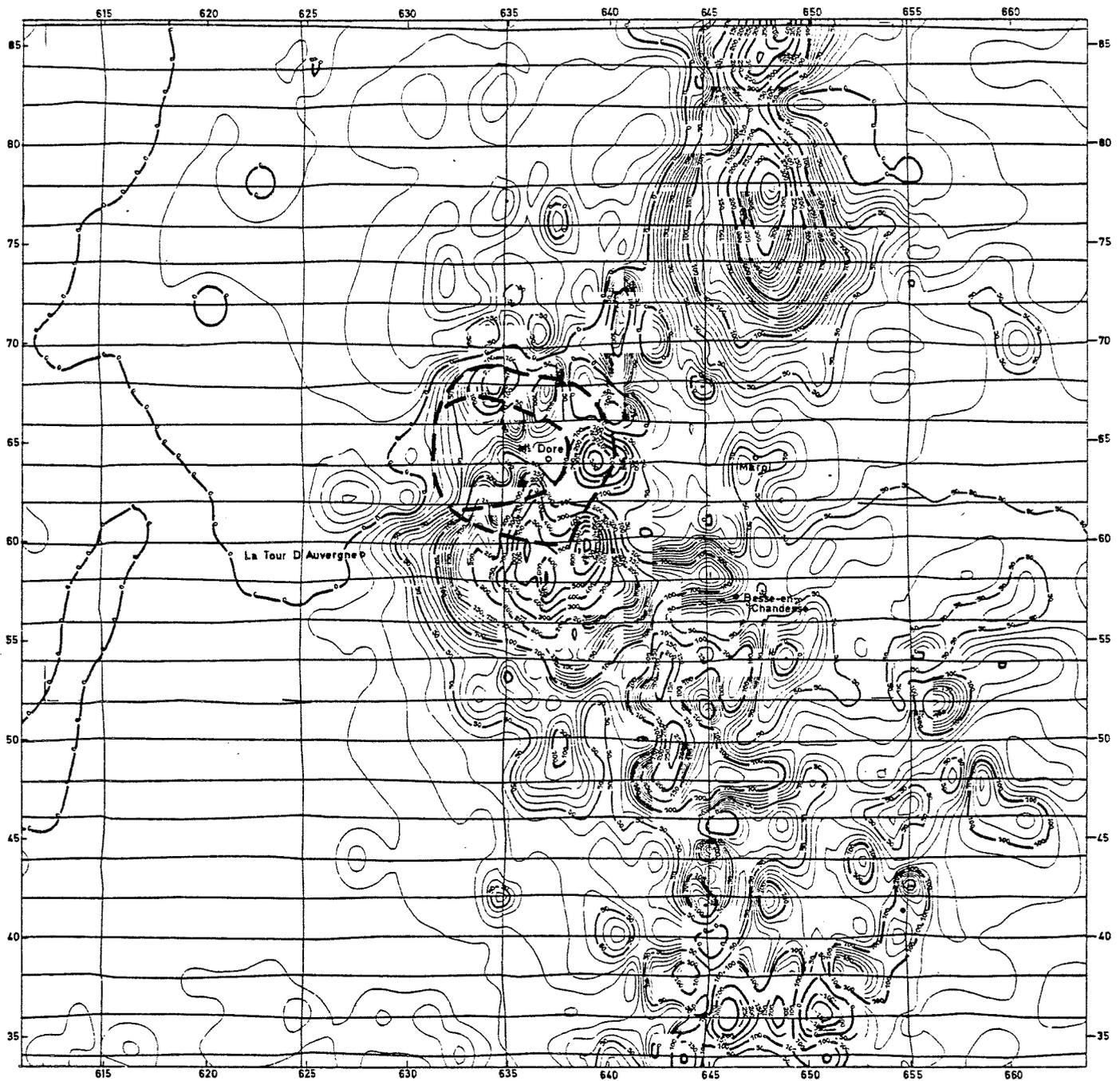
Puisque les formations aimantées, semblent sinon disparaître totalement, du moins s'approfondir sensiblement au voisinage du centre de la Caldera, nous avons tenté de vérifier s'il était possible de fournir un ordre de position des variations du niveau du toit des formations qui constitueraient le socle magnétique.

Pour cela on a systématiquement cherché à estimer zone par zone (environ 15 km x 15 km) un ordre de grandeur de la distance au delà de laquelle il devenait impossible de prolonger vers le bas le champ magnétique préalablement prolongé vers le haut à 3 000 m (dans l'espoir de réduire autant que possible des effets intempestifs de coulées superficielles sans enracinement véritable).

La méthode utilisée fait appel aux variations de la pente du spectre d'énergie logarithmique, créé par le champ observé dans chacune des zones, et aux variations de son ordonnée à l'origine.

Les indications obtenues sont reportées sur la figure 5. On observe en effet des variations du niveau apparent du socle magnétique qui montrent un enfoncement de ce dernier au voisinage de la Caldera, mais la méthode manque visiblement de précision ce qui ne saurait trop surprendre si l'on songe que les variations du niveau observées ne sont que de quelques centaines de mètres alors que les lignes de vol utilisées pour cartographier le **champ** sont distantes en moyenne de 2 km.

Figure : 1



MAGNETISME MONT DORE

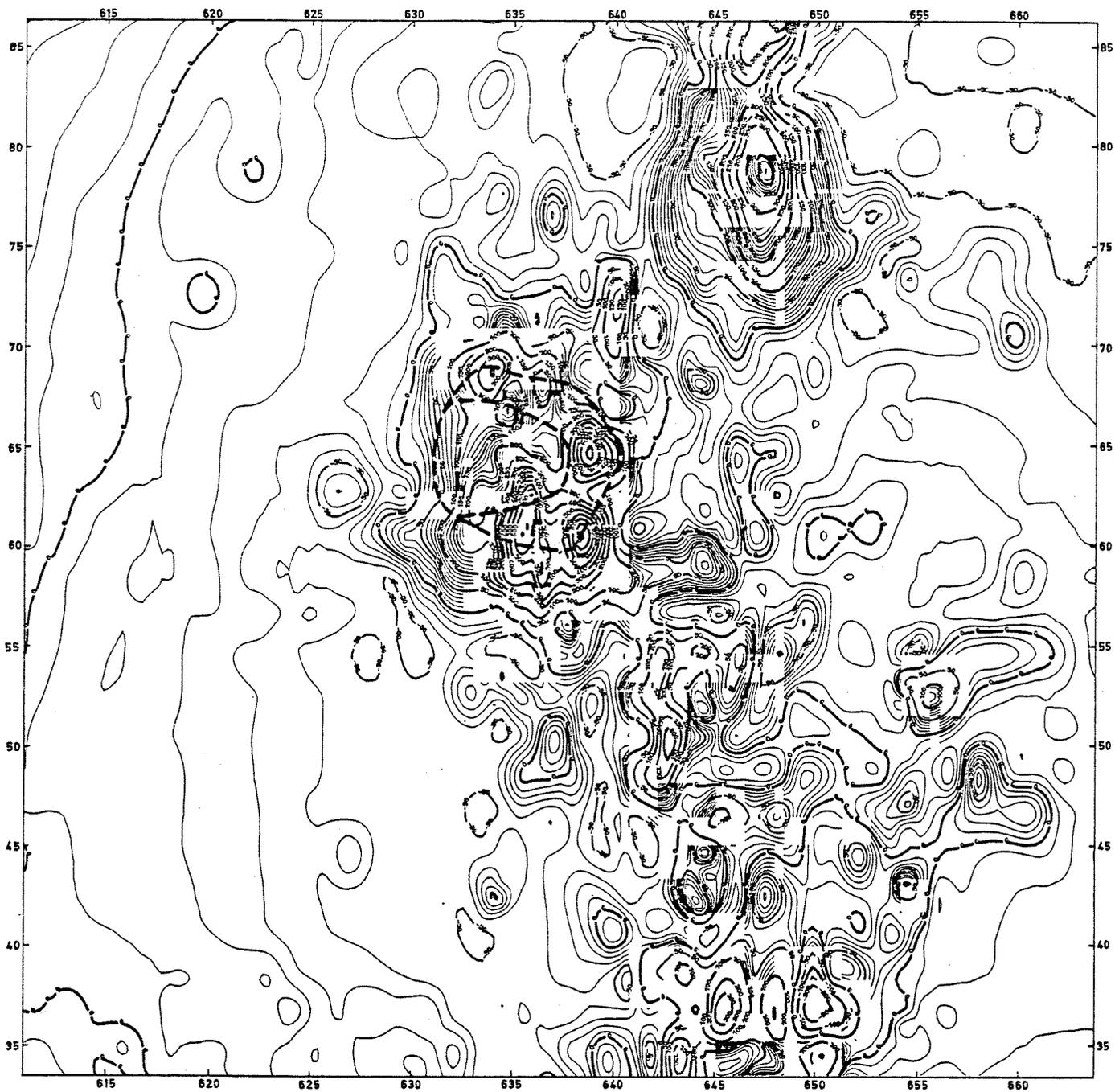
Champ donné - Altitude de vol barométrique : 2000m - Cotes en gammas

Echantillonnage : $P_x = P_y = 0.48$ km

— — Limite caldera (gravimétrie)

0 5 10 15 km

Figure : 2



MAGNETISME MONT DORE

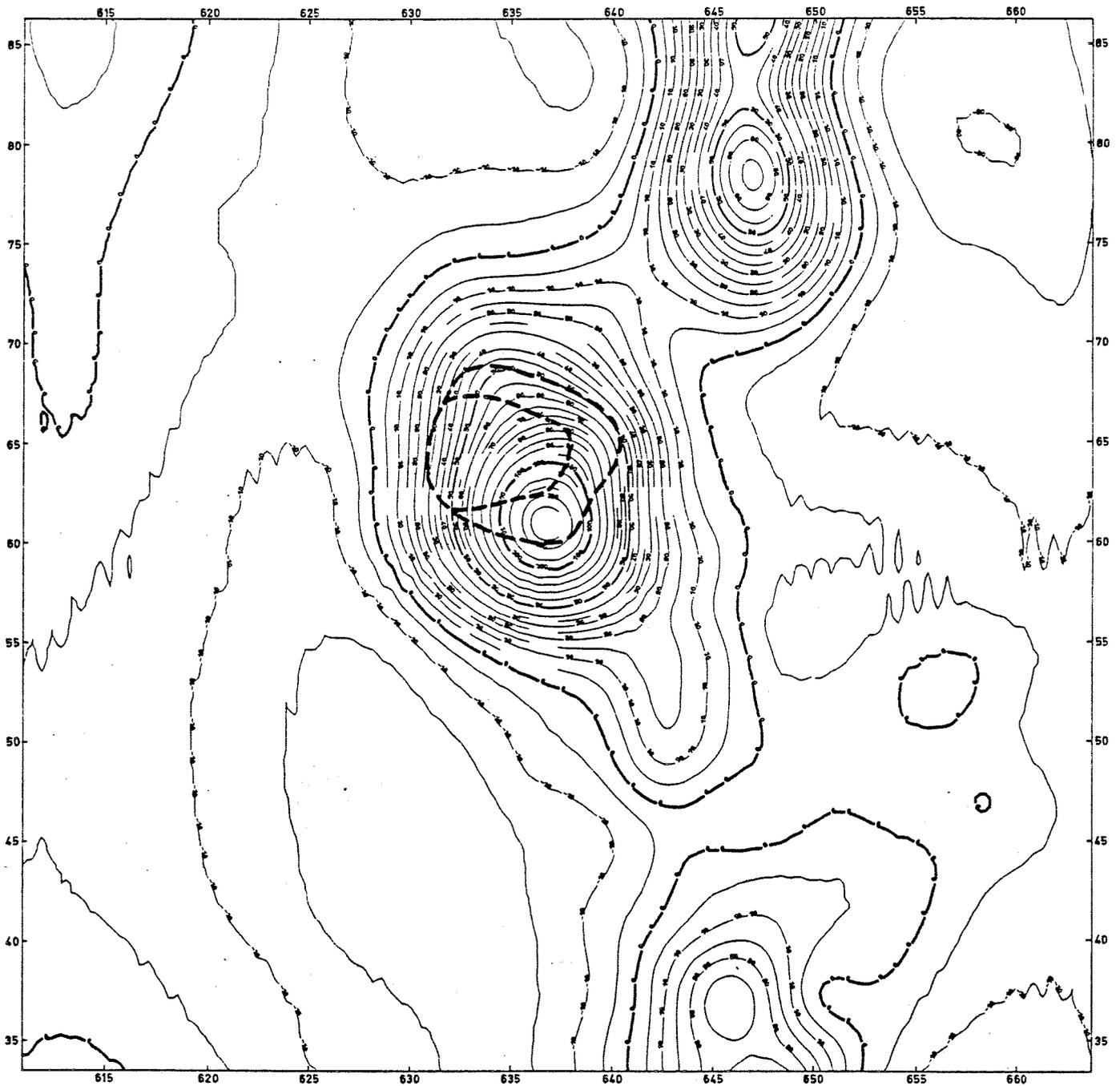
Champ réduit au pôle - Altitude de vol : 2000m barométriques

Cotes en gammas

--- Limite caldera (gravimétrie)

0 5 10 15 km

Figure 3

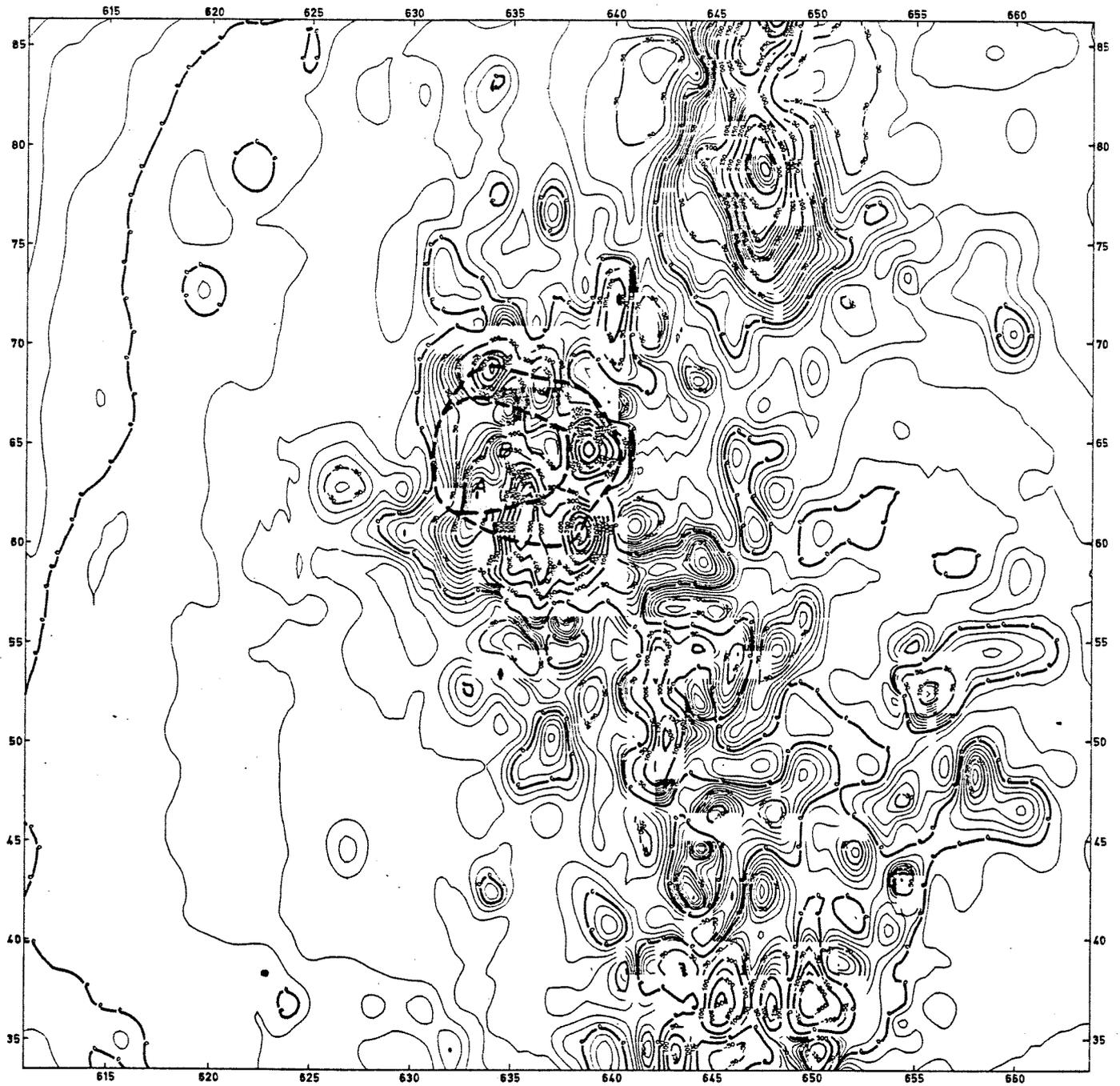


MAGNETISME MONT DORE
Champ d'origine profonde réduit au pôle

--- Limite caldera (gravimétrie)



Figure : 4

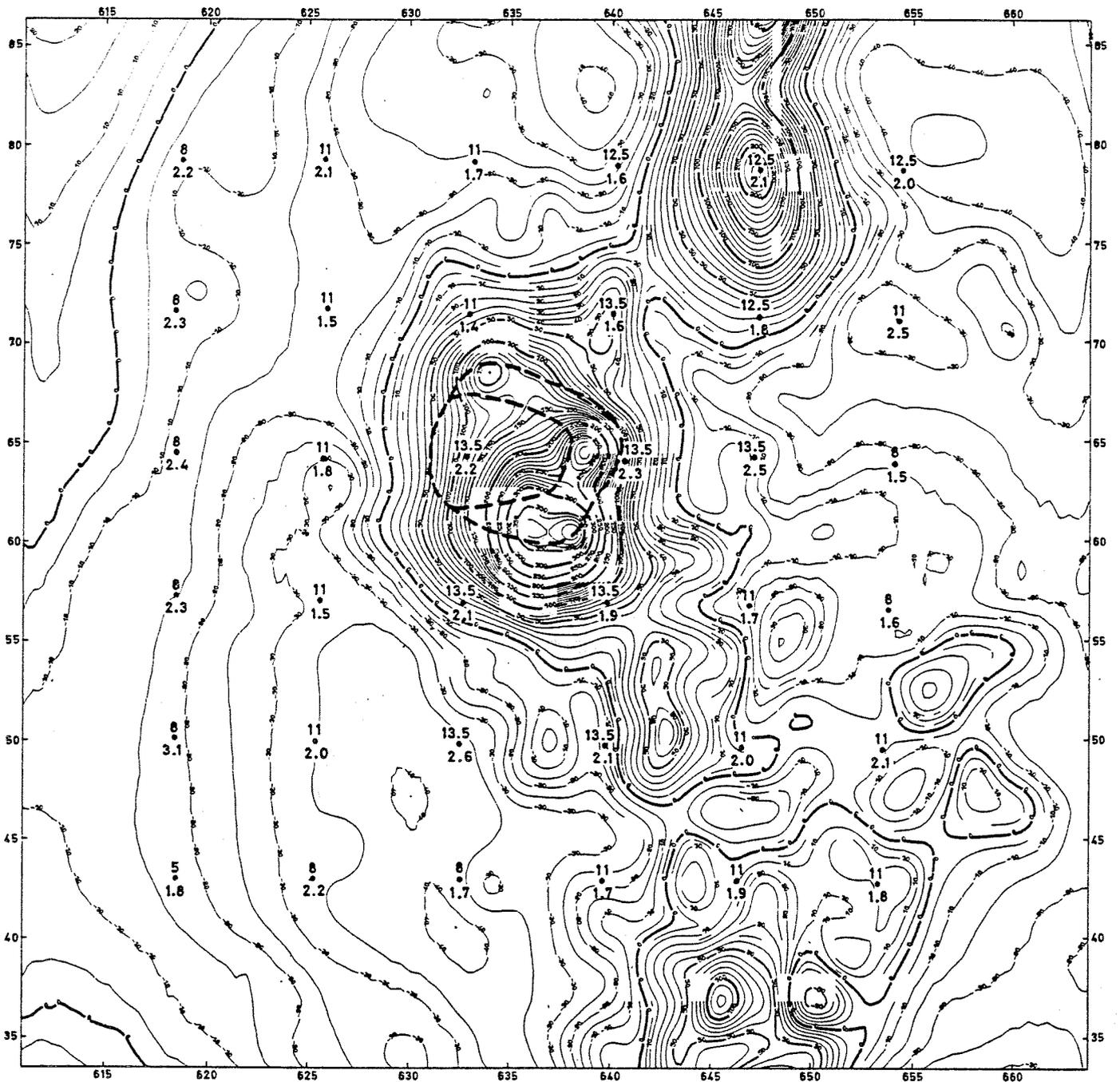


MAGNETISME MONT DORE
Champ d'origine superficielle réduit au pôle

--- Limite caldera (gravimétrie)



Figure : 5



MAGNETISME MONT DORE

Champ réduit au pôle prolongé vers le haut à 3000m barométriques

Cotes en gammas

xx Indice de profondeur du socle magnétique obtenu par
yy analyse du spectre d'énergie de 32x32 échantillons

xx Ordonnée de l'origine du spectre logarithmique

yy Cote en km sous le niveau du champ

--- Limite caldera (gravimétrie)

0 5 10 15 km

MODELISATION DES DONNEES AEROMAGNETIQUES

et

MESURES MAGNETOMETRIQUES AU SOL

par

J. F. LENAT *

*

Stagiaire boursier - Département Géothermie - BRGM

Il est demandé aux méthodes géophysiques, dans le programme "Géothermie-Mont Dore", de définir la structure interne et profonde du massif volcanique.

L'analyse des données magnétiques intervient pour déterminer la répartition spatiale des différents marqueurs magnétiques.

Les roches volcaniques présentent en général de forts contrastes d'aimantation avec un encaissant cristallin, cristallophyllien et sédimentaire tel que celui du Mont Dore, aussi le pouvoir de discrimination de la méthode magnétique peut-il être intéressant.

La principale question posée sera de déterminer si l'édifice, tel qu'il est connu, peut à lui seul rendre compte des anomalies magnétiques observées ou si une partie profonde magnétique ou hypostructure, existe.

1. ETUDES MAGNETIQUES ANTERIEURES

M. AUBERT et al. (1971) remarquent sur le levé aéromagnétique à 3000 m (cf. II) que l'anomalie associée au Mont-Dore est beaucoup plus développée que celle du Cantal bien que ce dernier soit beaucoup plus important en surface et en volume. Ils émettent l'idée de la présence d'une hypostructure volcanique massive sous le Mont-Dore.

M. BAYER (1978) a réalisé la première interprétation des données aéromagnétiques du Mont-Dore d'après les données du levé à 2000 m (cf. II). Il définit tout d'abord par analyse statistique deux niveaux de marqueurs : l'un situé entre 500 et 1500 m d'altitude et dont l'épaisseur serait de 400 à 1200 m, l'autre dont le toit se situerait entre 2 et 4 km sous le niveau de la mer avec une épaisseur de 2 à 4,5 cm. L'ensemble superficiel est associé par cet auteur aux superstructures du volcan et à sa fosse volcano-tectonique. Par contre, il estime que l'assimilation de l'ensemble profond à des réservoirs magmatiques est délicat car, d'une part les estimations de profondeur fournies par la pétrologie sont supérieures et d'autre part, la présence de marqueurs crustaux indépendants ne saurait être écartée a priori.

Réalisant ensuite une interprétation en programmation linéaire en ayant divisé la zone en plusieurs couches de prismes, M. BAYER décrit un modèle différent dont les deux éléments essentiels sont que l'"édifice magnétique" du Mont-Dore est le plus important au sud de la ville du Mont-Dore, soit dans la zone allant du Sancy au Mont-Dore, et qu'il n'est pas obligatoire d'envisager la présence de masses profondes sous l'édifice pour rendre compte des valeurs observées.

M. GERARD (1979), dans le cadre de ce programme "géothermie - Mont-Dore" a réalisé une analyse fréquentielle des données pour séparer les composantes du champ d'origines profondes et superficielles. La carte du champ d'origine superficielle est évidemment corrélée avec les reliefs volcaniques et la carte du champ d'origine profonde montre une anomalie s'étendant sur une large partie du massif et en particulier sur la caldera et la zone du Sancy.

L'étude magnétique que nous présenterons se distinguera de ces précédentes études par une prise en compte beaucoup plus précise des éléments du relief volcanique en rapport avec leur nature géologique, par une critique de la qualité des données par rapport à l'objectif étudié et par un contrôle sur le terrain des principaux traits de l'interprétation.

2. DONNEES AEROMAGNETIQUES

Deux lignes du vol (orientées N-S) du levé aéromagnétique général de la France à 3000 m (CNRS, 1964) ont capté l'anomalie créée par le massif volcanique du Mont-Dore. Elles sont malheureusement trop excentrées par rapport au massif (kilomètres 630 et 640 en coordonnées Lambert II, cf. fig.1) pour être utilisées.

Un levé aéromagnétique réalisé en 1972 par le BRGM et l'INAG sur la partie nord du Massif Central fournit une meilleure densité de mesure sur le massif du Mont-Dore. C'est ce document (fig.1) que nous avons exploité bien qu'il présente à l'aplomb du Mont-Dore un défaut important si on veut étudier la structure magnétique de l'ensemble du massif : les données sont collectées à trop basse altitude par rapport à leur densité ainsi que nous allons le démontrer.

2.1. Importance de l'altitude de vol et de la densité des mesures sur la qualité de la carte aéromagnétique à l'aplomb du massif volcanique du Mont-Dore

Au-dessus d'un massif volcanique, les mesures aéromagnétiques sont largement influencées par les effets de relief, c'est-à-dire par la répartition topographique des marqueurs magnétiques superficiels.

Le massif volcanique du Mont-Dore possède des reliefs contrastés et importants. Les sommets et la carapace de l'édifice sont constitués par des roches massives : coulées, intrusions dégagées par l'érosion, dômes, qui sont autant de marqueurs magnétiques puissants. Les effets de relief seront donc nets.

L'anomalie des structures superficielles ne présente cependant pas d'intérêt particulier si elle n'est que l'image de la géologie observable en surface. On attend de l'interprétation des documents magnétiques des éléments quant à la répartition plus profonde des marqueurs dans le corps de l'édifice et à des niveaux plus profonds.

Cet objectif sera d'autant mieux réalisable que le document aéromagnétique répondra à certains critères ; pour qu'un levé aéromagnétique soit représentatif du champ magnétique au-dessus du massif, il est nécessaire que certaines conditions soient respectées entre l'altitude de vol et la densité des lignes par rapport au relief magnétique.

Conséquences de l'altitude de vol sur la qualité des données

L'anomalie magnétique générée par un corps magnétique est inversement proportionnelle non à la distance à ce corps, mais à une certaine puissance de cette distance (par exemple, le cube de la distance pour un dipôle magnétique). On comprend donc que l'effet d'un marqueur situé trop près de la mesure soit exagéré par rapport à l'effet d'un corps plus éloigné lorsqu'on veut étudier l'ensemble.

On peut estimer que ce phénomène est fréquent sur le levé aéromagnétique concerné dont le plan de vol à l'altitude de 2000 m se trouve très proche des marqueurs fortement aimantés des parties élevées du massif : Puy de Sancy 1885, Puy de Clergue 1691, Puy de Chabanne 1746, Puy de Cacadagne 1785, Puy Gros 1793, Roc de Cuzeau 1737, Puy de l'Angle 1738, etc... Le signal de ces reliefs, lorsqu'ils sont proches des lignes de vol, est fortement privilégié au détriment de celui des sources situées entre les lignes ou plus profondément.

Le problème de la validité de la carte interpolée à partir des lignes de vol se pose alors ; nous allons tout d'abord l'examiner, puis nous analyserons le problème de la précision des mesures sur les lignes de vol.

2.2. Validité de l'interpolation entre les lignes de mesure

Les lignes de vol (fig. 1), orientées E-W, sont espacées de 2 km et les traverses N-S de 10 km.

Les formes volcaniques constituant les points hauts possèdent des dimensions inférieures à l'écartement des lignes : en général moins de 100 mètres pour les dykes et intrusions diverses, de l'ordre du kilomètre pour les dômes, les coulées, bien que ne pouvant être très longues, n'excèdent guère 500 mètres en largeur. Ces marqueurs, ainsi caractérisés par une forte intensité d'aimantation et par des dimensions réduites, produisent des anomalies intenses et de faible extension.

Pour ces raisons et pour celles développées plus haut quant à la décroissance des anomalies en fonction de la distance, la répartition des anomalies d'origine superficielle de la carte aéromagnétique du Mont Dore ne peut qu'être extrêmement sensible à la distribution des lignes par rapport aux marqueurs. Ainsi, certains édifices situés entre les lignes et dont le signal magnétique doit être important, n'apparaissent pas sur la carte ou bien apparaissent avec une intensité très diminuée par rapport à celle de marqueurs comparables plus proches des lignes. C'est le cas de reliefs fortement aimantés tels que les Puys de Pallaret, de Chambourguet, Ferrand, les hauts du S et S-W de Chaudefour, le Roc de Cuzeau, le Puy de Manne, etc..., qui ne sont guère pris en compte par la carte aéromagnétique.

En conséquence, on peut estimer, compte tenu de l'altitude et de l'espacement des mesures par rapport au type de relief magnétique du Mont Dore que *l'interpolation entre les lignes de vol ne peut être qu'erronée et trompeuse*. C'est ce qui illustre la figure 1 où l'on peut examiner les rapports entre la topographie, les anomalies au niveau des lignes de mesure aéromagnétique et la carte dessinée par interpolation. Outre le déplacement probable de certains maximums qui sont, comme il est habituel en aéromagnétisme "accrochés" aux lignes de vol, on observe l'absence du signal de certains marqueurs potentiels placés entre les lignes de vol et également une tendance à obtenir des anomalies à allongement N-S entre les lignes de vol orientées E-W, tendance qui est assurément artificielle dans de nombreux cas.

Il semble donc clair, dans ces conditions, qu'une interprétation rigoureuse des données aéromagnétiques ne peut se faire qu'uniquement au niveau des lignes de vol. Nous adopterons par conséquent cette règle à laquelle ne satisfont pas les interprétations des auteurs précédant, qui ont adopté une grille de valeurs interpolées.

2.3. Précision des mesures

Sur les zones de fort relief, en raison de la proximité du plan de mesure avec les marqueurs magnétiques fortement aimantés que sont les roches volcaniques massives, des gradients horizontaux atteignant 20 à 50 nT par 100 m sont fréquents. Les gradients verticaux sont du même ordre de grandeur. Compte tenu de l'importance de tels gradients, la précision du positionnement intervient sensiblement.

Dans le rapport de compilation du levé aéromagnétique, DEGIBLIA (1975) estime que l'incertitude sur le repérage horizontal des mesures est de l'ordre de ± 80 à 100 m, celle du repérage vertical (altitude barométrique) de 50 m ou éventuellement plus lors du survol des reliefs importants.

Il faut donc avoir conscience que des écarts sensibles entre les valeurs vraies et les valeurs du document aéromagnétique sont possibles au-dessus des zones les plus hautes.

En conclusion à ce chapitre critique sur les données aéromagnétiques au-dessus du massif volcanique du Mont-Dore, nous pouvons préciser les caractéristiques d'un levé qui serait mieux adapté.

Si la densité des lignes de vol ne saurait être trop multipliée pour des raisons de coût, le choix de l'altitude de mesure reste par contre une caractéristique aisément modifiable. Avec une altitude supérieure à 2000 m, le signal des marqueurs les plus proches des lignes de vol serait moins privilégié et le champ, plus lisse, serait plus correctement interpolé. Un compromis raisonnable entre altitude et équidistance des lignes pourrait être : altitude de vol 2500 m à 3000 m - intervalle des lignes 1 km - La carte aéromagnétique interpolée serait alors nettement plus représentative et toutes les transformations de données validées en proportions.

En fait, le problème de l'optimisation des caractéristiques d'un levé aéromagnétique par rapport à un objectif mériterait à lui seul une analyse beaucoup plus complète que celle qui peut en être faite dans le cadre de ce travail.

3. CONTEXTE GEOPHYSIQUE

Le volcanisme tertiaire et quaternaire du Massif Central français est inscrit dans un contexte particulier de lithosphère. Des expériences de sismique ont révélé la présence d'une croûte amincie surmontant un manteau anormal (Perrier et Ruegg, 1973)/ La zone concernée englobe les fossés d'effondrement oligocènes et les aires volcanisées. A la base d'une croûte de 23 km, la discontinuité de Mohorovicic a disparu ; elle est remplacée par une zone de transition de 22 km sous le Mont-Dore, où la vitesse des ondes P augmentent graduellement de 7,3 à 8,4 km/s (fig.2). Les principaux massifs volcaniques dont le Mont-Dore, se sont mis en place préférentiellement sur les bordures de la zone anormale.

Une large anomalie magnétique positive coïncide avec cette zone. Son origine n'est pas encore totalement déterminée. Elle pourrait correspondre à la surélévation de la croûte inférieure (Roux et Senaud, 1978).

Le Massif du Mont-Dore est placé sur le bord N-W de cette anomalie de grande longueur d'onde qui apparaît, à l'échelle du massif, dans la dissymétrie entre le niveau moyen du champ à l'est et à l'ouest.

4. MODELISATION

La méthode d'interprétation développée dans cette étude consiste à confronter aux valeurs observées l'effet d'un modèle de l'édifice volcanique tenant compte de la topographie et de la géologie. Deux types de résultats peuvent apparaître : soit un modèle réaliste peut à lui seul rendre compte des anomalies observées, soit un tel modèle ne peut en aucun cas créer ces anomalies et alors la présence de sources magnétiques enracinées sera mise en évidence.

4.1. Caractéristiques du modèle

Un modèle magnétique est défini par sa géométrie et une répartition d'aimantations. Le modèle du Mont Dore que nous avons conçu est limité vers le bas à la cote 1 000 m qui correspond à l'altitude moyenne de la Vallée de la Dordogne. La caldera n'est donc pas prise en compte dans le modèle.

4.1.1. Topographie

Les contours du modèle sont définis à partir des courbes de niveau de la carte topographique au 1/50 000e de l'IGN, avec des intervalles en altitude de 100 m et parfois de 50 m vers les sommets. Ces courbes de niveau ont été polygonisées puis numérisées. Cette opération assez fastidieuse à réaliser à la main serait par contre rapidement exécutée avec un pupitre de digitalisation.

4.1.2. Géologie

Il fallait concevoir un modèle réaliste quant à la répartition des aimantations. Deux grandes catégories de marqueurs magnétiques ont été distinguées, d'une part les roches massives, d'autre part les pyroclastites d'aimantations et autres brèches. Au sein même de ces catégories, des différences d'aimantations sont aussi envisagées. Nous avons utilisé la carte géologique du Mont Dore au 1/50 000e de Brousse (1978) pour fixer la répartition de ces marqueurs. Le substratum sous l'édifice a été fixé par extrapolation de ses cotes à la périphérie en tenant compte, d'une part de son bombement bien observable à l'extérieur du massif, d'autre part des limites gravimétriques de la caldera (Gérard, 1979).

4.1.3. Aimantation

Chaque élément du modèle sera affecté d'une aimantation apparente, résultante de la somme des divers types d'aimantations dont les roches sont porteuses. Les composantes principales de l'aimantation des roches volcaniques sont l'aimantation induite, de même sens que le champ ambiant et proportionnelle à celui-ci, et l'aimantation thermorémanente (A.T.R.) acquise lors du refroidissement de la roche. L'aimantation apparente devra être définie par son sens et par son module ou intensité.

a) sens de l'aimantation

- L'aimantation thermorémanente (A.T.R.) est en général la composante prépondérante de l'aimantation apparente des roches volcaniques

massives. Parmi les brèches, selon qu'elles aient été mises en place à haute ou à faible température, les moments d'A.T.R. portés par les fragments peuvent être cohérents ou dispersés et par conséquent, l'A.T.R. totale d'une formation importante ou nulle.

- En fonction de son âge paléomagnétique, une roche volcanique montrera une A.T.R. directe ou inverse par rapport au champ magnétique actuel. Bobier (1971) a réalisé une étude paléomagnétique des laves du Mont Dore. Les laves du Sancy et du Massif adventif sont à aimantation normale. Des aimantations inverses sont fréquentes dans la région de la Bourboule et du Lac de Guézy.

La distribution d'aimantations apparentes de notre modèle ne comporte que peu d'aimantations inverses. Nous n'en n'avons attribué à une formation que lorsqu'une anomalie négative nette lui était assimilée. C'est par exemple le cas du Puy Gros dans la vallée de la Bourboule ou de certaines formations à l'ouest de la Charbonnière. Par contre, le Massif de la Banne d'Ordanche où sont présentes à la fois des polarités directes et inverses montre un comportement d'ensemble positif et l'aimantation que nous avons donnée aux formations massives et bréchiques est de sens normal mais d'intensité inférieure à celle des autres parties du massif du Mont Dore. C'est une façon de prendre en compte le comportement global de l'ensemble des formations sachant d'une part que pour la grande majorité des brèches, compte-tenu de leur nature, l'A.T.R. est certainement faible et l'aimantation induite prépondérante, d'autre part que pour les laves massives à polarité inverse, l'A.T.R. est en opposition avec l'aimantation induite et probablement aussi avec une forte aimantation rémanente visqueuse (Prévot, 1975), ce qui se traduit par une aimantation apparente relativement faible inverse voire normale.

b) intensité d'aimantation

En interprétation magnétique, on considère le contraste des marqueurs étudiés avec leur encaissant. Dans le cas du Mont Dore, le substratum cristallin, cristallophyllien ou sédimentaire peut être considéré, a priori, comme très peu magnétique par rapport aux volcanites.

On peut déterminer l'intensité d'aimantation soit par mesure sur échantillons, soit par calcul sur profil.

- Mesure d'aimantation sur échantillons :

Ce type de mesure permet de fixer l'ordre de grandeur de l'aimantation mais il n'est généralement pas représentatif du comportement magnétique global d'une formation. Il a souvent été noté par les interpréteurs que l'intensité d'aimantation déterminée sur échantillons était trop faible pour rendre compte d'une anomalie donnée. Les quelques mesures que nous avons faites sur l'inductomètre à translation de l'I.P.G. du Puy de Dôme (Aubert et Cardesses, 1978) donnent les ordres de grandeur suivants pour l'aimantation apparente : phonolite (carrière Moneyron) $800 \cdot 10^{-3}$ A/m, trachyte du Cuzeau $7\ 000 \cdot 10^{-3}$ A/m. Aucune mesure n'a été réalisée sur des pyroclastites et il est certain que de très nombreuses mesures auraient été nécessaires pour caractériser les différentes formations. Cependant, pour une interprétation à l'échelle du massif, il est préférable de déterminer des intensités d'aimantations globales sur profil.

- détermination des intensités d'aimantations sur profils :

Connaissant la géométrie d'une formation et l'anomalie qui lui est associée, il est possible, moyennant une hypothèse sur le sens de l'aimantation, d'en déterminer son intensité.

Appliquée à la périphérie du massif, cette méthode nous a donné des valeurs de 3 à 5 A/m pour des zones où des formations massives dominaient.

Dans le coeur du massif, le problème se passe différemment puisque la base des formations n'est pas connue. Nous sommes conduit à tester l'hypothèse exposée plus haut : l'édifice volcanique sans hyposstructure peut-il rendre compte par sa nature géologique et son relief des anomalies observées. La limitation vers le vas, autour de la cote 1 000 m est donc une caractéristique de l'hypothèse.

La carte géologique montre que le massif est composé en surface par une carapace de roches massives, principalement des coulées mais aussi des dômes. Les intrusions dégagées par l'érosion constituent également de nombreux reliefs, particulièrement dans la région du Sancy. Dans le corps du massif par contre, les pyroclastites et autres brèches représentent la grande masse. Cette image, très schématique compte tenu de la complexité réelle des formations sur le terrain, traduit cependant bien le comportement d'ensemble du massif pour la géophysique. En particulier, c'est le schéma qui convient le mieux pour la réduction des données gravimétriques et l'interprétation des données électromagnétiques (Gérard, 1979). Il serait d'autre part inconcevable, et certainement vain, de procéder à une modélisation plus détaillée des différentes formations.

Le modèle tridimensionnel comporte donc (voir coupes, fig. 3 et 4) des marqueurs fortement aimantés en surface, correspondant aux roches massives, surmontant des sources moins aimantées.

Les intensités adoptées sont résolument élevées, voire excessives, afin de tenter de rendre compte au maximum des anomalies observées par l'effet de l'édifice.

Les formations à dominante de brèches, en raison de leur nature et en tenant compte du fait qu'elles peuvent contenir un certain pourcentage de roches massives, ne peuvent, à notre avis, avoir une aimantation apparente supérieure à 3 A/m.

Cette valeur maximum n'est pas atteinte dans d'autres contextes comparables : Cantal (Raux et Senaud, 1978) ; Long Valley Caldera (Williams et al, 1977). Cette valeur forte étant attribuée dans toutes les zones à l'exception du massif de la Banne d'Ordanche, nous sommes conduits pour réaliser un accord entre les intensités d'anomalies observées et calculées sur les principaux reliefs (Puy de Clierque, Cacadoigne, etc..., fig. 3) à donner une intensité d'aimantation de 7 A/m aux coulées trachyandésitiques et basaltiques. Pour les dômes du massif adventif (Puy de l'Angle), un bon accord est obtenu avec 4 A/m (fig. 4). Pour le massif de la Banne d'Ordanche, comme conséquence à la présence de formations à aimantation directe et inverse, les intensités sont plus faibles : 7 A/m pour les formations brêchiques, 4 A/m pour les laves. Dans les zones périphériques, des valeurs de 3 à 5 A/m sont suffisantes pour les formations massives. Enfin, des valeurs de 10 A/m ont localement été placées pour tenter de compenser en partie certains déficits de l'anomalie calculée.

4.2. Calcul de l'anomalie du modèle - carte résiduelle

Le calcul de l'anomalie du modèle a été effectué par un programme de l'Institut de Physique du Globe du Puy de Dôme inspiré des travaux de Talwani (1965). La différence anomalie observée-anomalie calculée a été réalisée au niveau des lignes de vol du levé aéromagnétique. La carte de la figure 5 montre la distribution spatiale des écarts.

5. INTERPRETATION DES DONNEES AEROMAGNETIQUES

5.1. Analyse qualitative des données aéromagnétiques

De l'examen qualitatif des données aéromagnétiques (fig. 1) peuvent être extraits certains éléments d'interprétation. Il faut évidemment avoir gardé à l'esprit les réserves formulées plus haut (2.2.) sur la valeur de l'interpolation entre les lignes de mesures et donc s'attacher à observer les signaux uniquement au voisinage des lignes.

Globalement, l'anomalie associée au massif se présente comme une large zone positive à laquelle est associée au nord une zone négative. Cette disposition est caractéristique d'un comportement d'ensemble de structure à aimantation conforme au champ actuel. La majorité des anomalies ponctuelles sont aussi positives ; seules quelques anomalies négatives déjà signalées (4 - a) apparaissent. La répartition des maxima conforme au relief, est extrêmement liée à la position et à la densité des lignes de vol ; en toute rigueur, peu de choses peuvent être avancées sur la répartition des marqueurs magmatiques superficiels si ce n'est des évidences géologiques. L'absence de marqueurs ponctuels, autres que ceux bien connus en surface, mérite cependant d'être soulignée en particulier au niveau de la caldera.

D'autre part, deux phénomènes qui seront précisés par la suite, sont déjà observables. Il s'agit tout d'abord d'une anticorrélation très nette entre la topographie et les anomalies au niveau du ruisseau de Vendeix (fig. 4) qui indique le signal de sources magnétiques non liées au relief. C'est aussi le cas du maximum en tête de la vallée de Chaudesfour, qui est décollé de 500 m par rapport au sommet topographique (fig. 1) ; il semble exclu de pouvoir expliquer cet écart par un défaut de positionnement.

5.2. Interprétation quantitative

La carte de l'anomalie résiduelle (fig. 5), soit la carte de la différence entre l'anomalie observée et l'anomalie du modèle, illustre le résultat de l'interprétation quantitative. C'est un document qui, à l'instar d'une carte d'anomalie de Bouguer, est une carte magnétique corrigée de l'effet de relief. Une telle correction de relief se distingue cependant d'une correction de Bouguer classique par le fait que les intensités des sources magnétiques sont modulées en fonction de leur nature géologique et que les corrections sont appliquées à des valeurs collectées à plan constant et au-dessus des reliefs.

Nous avons cherché, tout en gardant la répartition et l'intensité des aimantations dans un cadre géologique réaliste, à obtenir un effet de l'édifice qui compense au maximum l'anomalie observée. Malgré cette démarche, il subsiste des écarts qu'il n'a pas été possible de détruire. Mis à part des écarts ponctuels qui ne signalent que de petits défauts du modèle, deux anomalies résiduelles importantes sont apparues :

- une large anomalie positive avec une partie négative associée au nord, est inscrite dans la zone de la caldera ;

- une autre zone positive plus intense existe à l'aplomb du massif du Sancy. Le modèle pourrait être modifié sans que cette anomalie ne puisse être éliminée au niveau des vallées du Sancy, de Chaudesfour et de la Fontaine Solée.

Une autre zone positive au SW du Lac Chambon. BAYER (1978) avait déjà signalé un phénomène semblable. Pour notre part, nous admettrons jusqu'à plus ample information qu'elle est due sur notre carte à un défaut de la correction de relief. Nous n'avons pas, comme nous l'avons fait pour les deux autres anomalies résiduelles, cherché à l'éliminer.

6. MESURES MAGNETIQUES AU SOL

Ce type de mesure a été entrepris pour confirmer et préciser l'interprétation d'après les données aéromagnétiques. Bien qu'en site volcanique, les perturbations d'origine superficielle rendent souvent vain ce type de mesure, il s'est révélé que, dans le fond des vallées, des mesures correctes étaient possibles.

6.1. Vallée de la Bourboule

La prospection au sol dans cette vallée avait deux objectifs : préciser la large anomalie résiduelle qui semble être associée à la caldera et rechercher d'éventuels marqueurs intracaldériques. Les mesures dans cette zone sont assez perturbées. Il semble bien que le niveau magnétique général soit plus fort dans la vallée entre les villes du Mont Dore et de la Bourboule que respectivement au sud et à l'ouest de ces deux villes. Il n'existe pas de signaux indiquant la présence de marqueurs tels que des intrusions ou des coulées à faible profondeur mais on ne peut exclure la présence de telles structures sur le plancher de la caldera où, par ailleurs, ils pourraient avoir subi une altération hydrothermale contribuant à diminuer leur aimantation.

6.2. Vallées du Sancy, de Chaudefour et de la Fontaine Salée

L'anomalie résiduelle mise en évidence dans la zone du Sancy méritait un complément de données. En effet, d'une part aucune donnée géologique ou géophysique n'avait jusqu'à présent signalé un tel phénomène, d'autre part, l'aspect quantitatif de l'anomalie résiduelle ne peut être qu'approximatif en raison des incertitudes et des indéterminations de la correction de l'effet d'édifice. Les mesures et leur localisation sont présentées sur la figure 6.

6.2.1. Vallée du Sancy

Une discontinuité magnétique extrêmement nette, mesurable sur toute la largeur de la vallée (profils A, B, C) limite l'éponte nord et un compartiment magnétique relativement superficiel est situé sous le Sancy. La limite se place schématiquement sur l'alignement Puy de Clierge-Roc de Cuzeau. Aucun élément géologique ne souligne cette structure au niveau de la vallée.

6.2.2. Vallée de Chaudefour (profil D)

Un phénomène similaire à celui de la vallée du Sancy est observé. La discontinuité se manifeste au niveau du Chalet Sainte Anne où jaillit une source thermominérale bien connue. Le contact de la structure magnétique avec son encaissant est soit plus profond, soit plus progressif que dans la vallée du Sancy.

6.2.3. Vallée de la Fontaine Salée

Le fond de la vallée n'est pas, comme celui des précédentes, constitué par des brèches mais par des coulées. Or, à la latitude du Puy Gros, on enregistre une anomalie (profils E, F, G) qui peut être interprétée, soit par l'interruption brutale à un niveau magnétique (coulées) soit par une intrusion de 500 m à 15 km de puissance dont l'allongement serait perpendiculaire à l'axe de la vallée.

7. INTERPRETATION ET DISCUSSION DES RESULTATS

7.1. Interprétation géologique des anomalies magnétiques résiduelles

L'anomalie associée à la caldera est, sans conteste, due à l'accumulation de produits magnétiques dans la dépression. Ces produits sont constitués en grande part par les ponces ryolitiques liées ou postérieures à la formation de la caldera. Ces roches assez peu aimantées, mais assez cependant pour présenter un contraste avec l'encaissant, peuvent rendre compte par leur volume de l'anomalie mise en évidence. Il n'est cependant pas exclu que des formations volcaniques antérieures enfouies dans la caldera participent à l'anomalie.

Dans certains contextes magnétiques plus simples, par exemple la caldera de Long Valley (Kane et al, 1976 - William et al, 1977), les interpréteurs ont pu distinguer au sein d'un remplissage de caldera des zones où l'altération hydrothermale avait détruit une partie de l'aimantation. Le contexte magnétique du Mont Dore, trop complexe, se prête mal à la détermination de tels indices géothermiques. Si l'anomalie résiduelle de la caldera est plus faible dans la région de la Bourboule, cela peut être également dû à un affaiblissement de l'aimantation par un processus hydrothermal, à un défaut de la correction de l'effet de l'édifice ou à une variation de profondeur de la fosse. Seule cette dernière indétermination pourrait être levée par d'autres méthodes.

La nature de l'hypostructure magnétique du Sancy apparaît plus énigmatique. Son existence n'a jamais encore été signalée par d'autres travaux. Par contre, l'entité du Sancy en tant que volcan central a déjà été pressentie et la structure magnétique profonde lui est certainement liée.

Dans les vallées du Sancy et de Chaudefour, le marqueur s'étend sur 600 m à 1,5 km en aval et disparaît sous l'édifice en amont. Dans la vallée de la Fontaine Salée, nous avons, soit une coupure brutale des coulées, soit une intrusion d'une puissance de 500 à 1,5 km qui ne s'étendrait pas sous l'édifice. S'il y a une intrusion dans cette vallée, elle n'est donc pas connectée avec les structures des deux autres vallées.

Nous ne pouvons pas, au stade actuel du programme "Géothermie - Mont Dore" donner une interprétation définitive de ces phénomènes, la confrontation avec les données acquises par les autres méthodes géophysiques et géologiques étant capitale. Nous n'énoncerons donc que des hypothèses de travail.

Il est possible qu'au niveau de ces trois vallées, on ait enregistré l'expression d'une discontinuité annulaire centrée sur le massif du Sancy. Les sources magnétiques profondes pourraient alors correspondre à des intrusions subvolcaniques. Ce type de structure serait similaire aux complexes volcaniques tertiaires du nord de l'Ecosse auxquels sont associées des anomalies magnétiques comparables (Hall et al, 1970). Signalons aussi qu'un traitement des données aéromagnétiques analogue à celui que nous avons réalisé pour le Mont Dore avait permis de mettre en évidence l'importance d'une intrusion hypovolcanique gabbroïque qui affleure au fond de la vallée de la Jordane (Aubert et al, 1979) dans le massif volcanique du Cantal.

La structure hypovolcanique magnétique du Sancy mérite donc bien d'être précisée dans le but de mieux comprendre la mise en place du Sancy et également dans un but géothermique puisqu'il s'agit de la région la plus jeune du Mont Dore.

FIGURE 2 : STRUCTURE PROFONDE DU MASSIF CENTRAL D'APRES LES DONNEES SISMIQUES
(PERRIER ET RUEGG, 1973)

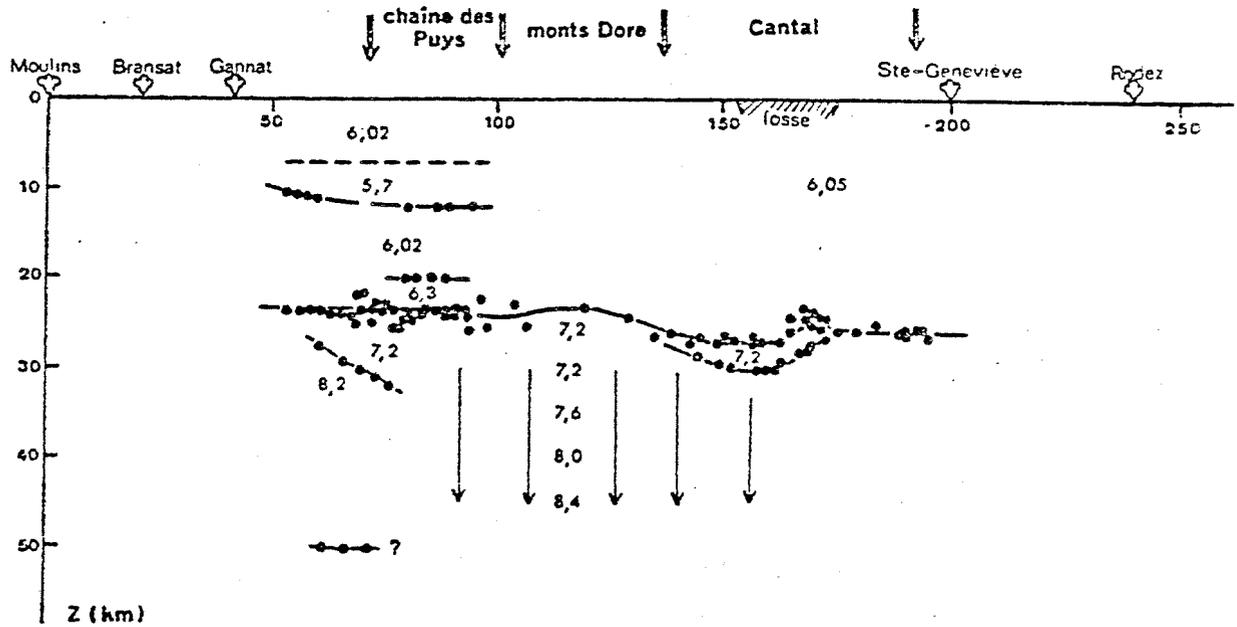


FIGURE : Coupes et lois de vitesses dans le Massif Central d'après PERRIER et RUEGG (1973).

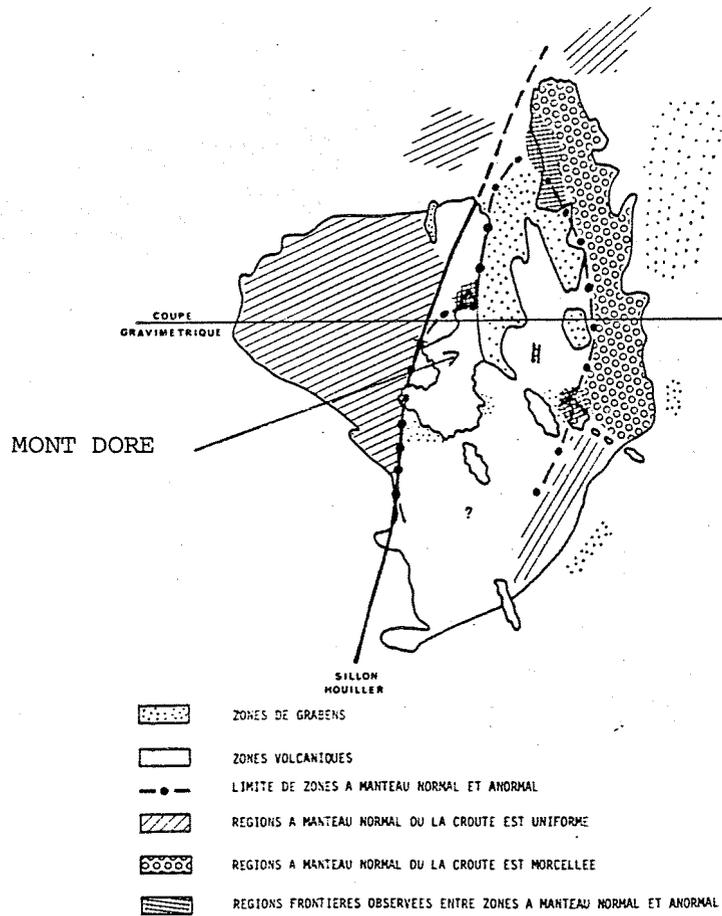


Fig. 54

Les types de structures sous le Massif Central



ΔF mT

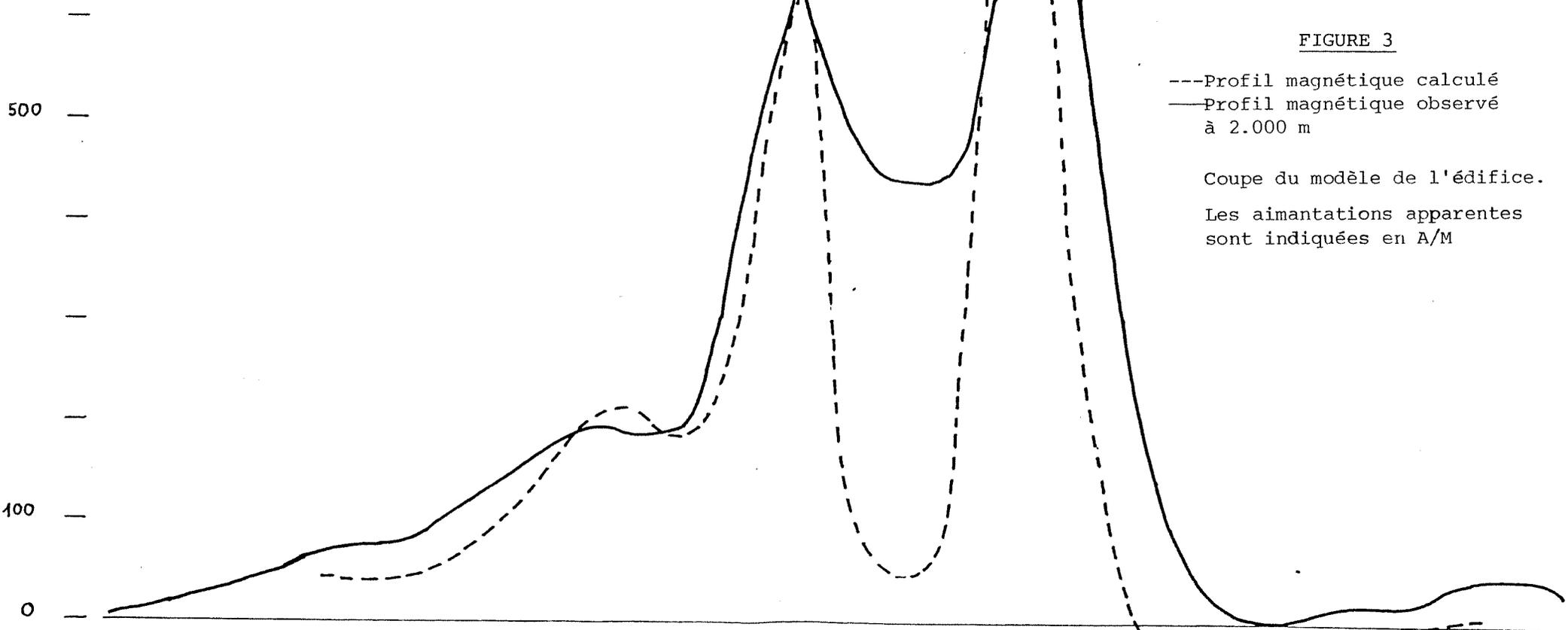
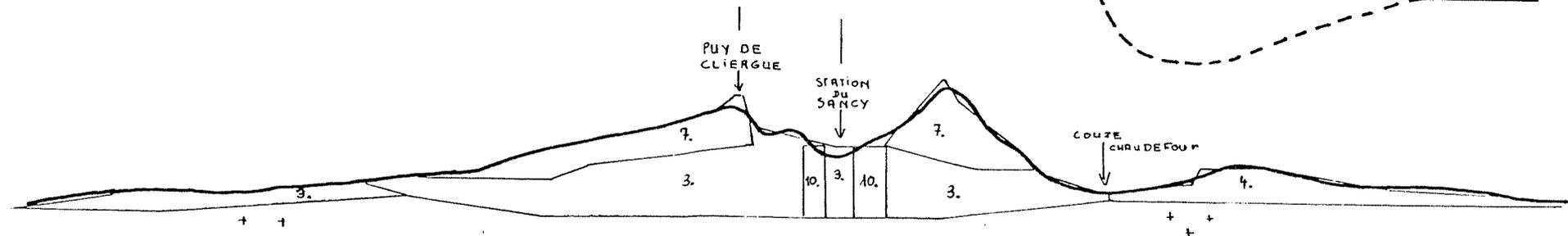
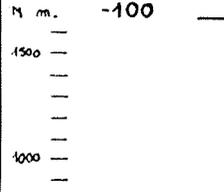


FIGURE 3

--- Profil magnétique calculé
 — Profil magnétique observé à 2.000 m

Coupe du modèle de l'édifice.
 Les aimantations apparentes sont indiquées en A/M

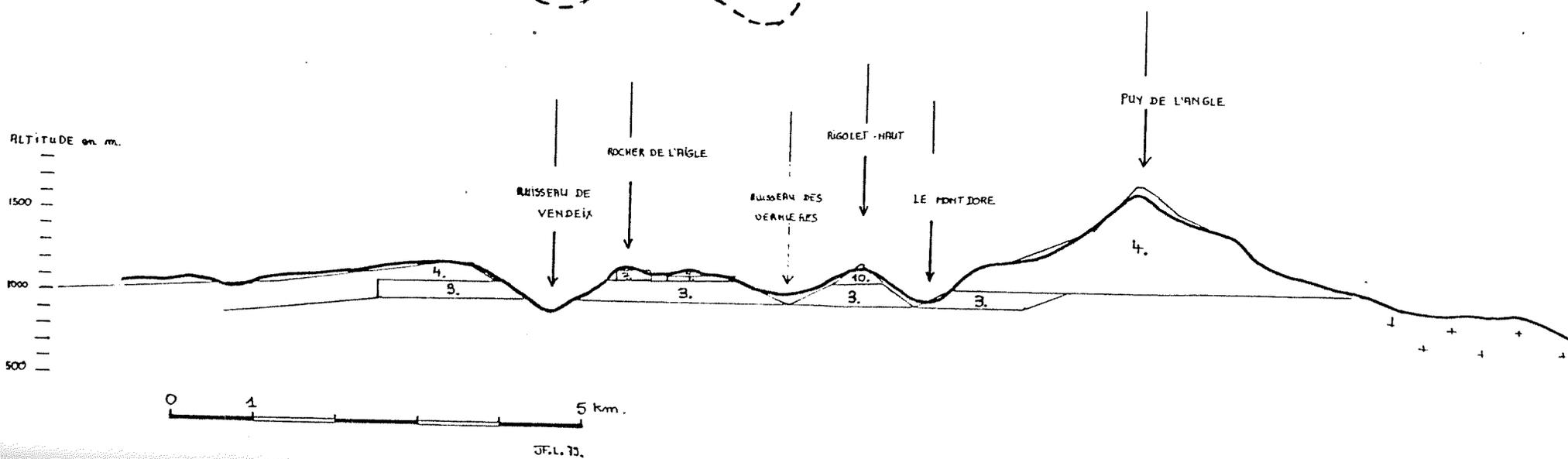
ALTITUDE



ΔF mT
500—

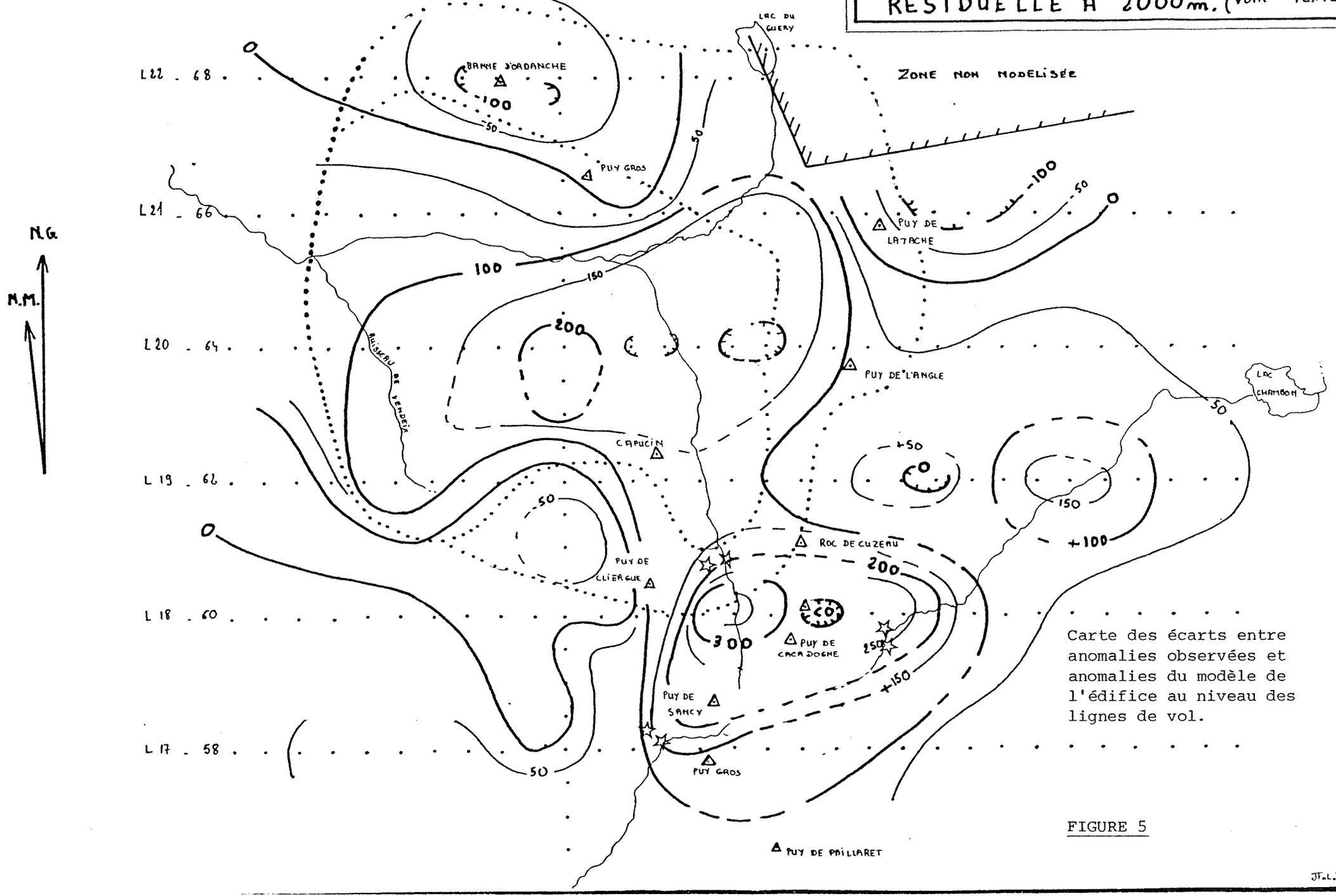
—
—
—
100—
0—
-100—

FIGURE 4





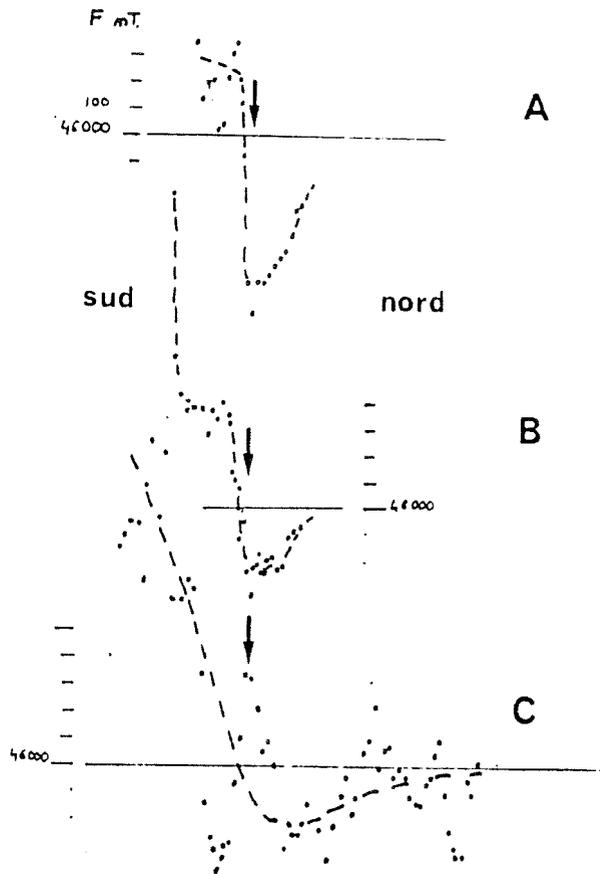
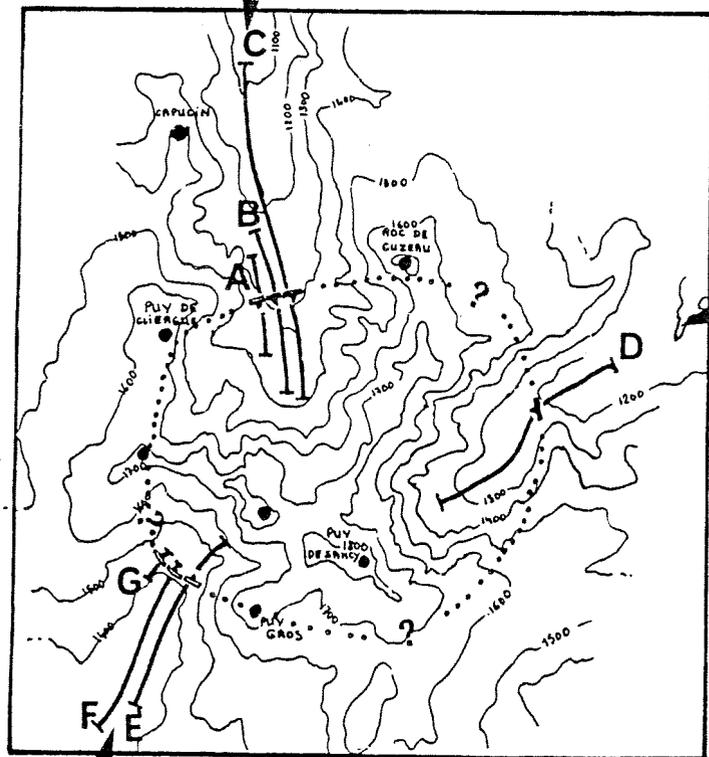
LE MONT-DORE ANOMALIE MAGNETIQUE RESIDUELLE A 2000m. (VOIR TEXTE)



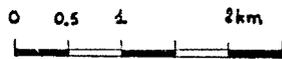
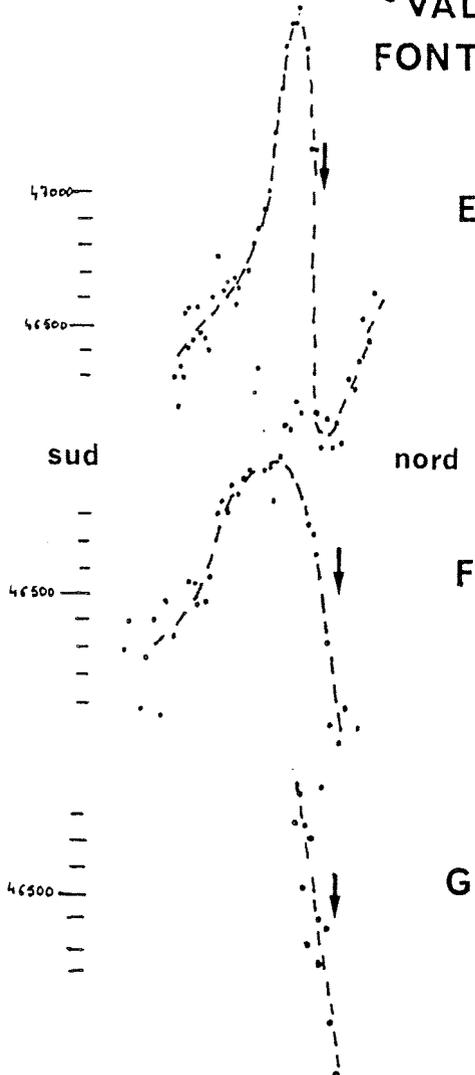
Carte des écarts entre anomalies observées et anomalies du modèle de l'édifice au niveau des lignes de vol.

FIGURE 5

VALLÉE DU MONT-DORE



VALLÉE DE LA FONTAINE SALÉE



VALLÉE DE CHAUDEFOUR

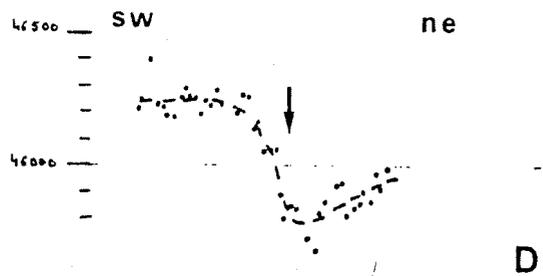


FIGURE 6

Levés magnétiques au sol dans les trois vallées du Sancy. Hypothèse d'une répartition annulaire des discontinuités mise en évidence.

A N N E X E 3

ELECTRICITE ET ELECTROMAGNETISME SUR MELOS

par S. LALLIER

1. RENSEIGNEMENTS ET STATISTIQUES

1.1. Méthodes électriques

Du 5 au 20 septembre 1978.

. Participants :

BAILLY	Technicien	B.R.G.M.	4 - 21.9.78
BELPAUME	Electronicien	"	4 - 16.9.78
CARRIVE	Stagiaire	"	4 - 27.9.78
FROIDEVAUX	Géophysicien	BEICIP	8 - 16.9.78
LALLIER	"	B.R.G.M.	4 - 27.9.78
LENAT	"	I.P.G.	4 - 27.9.78
MILLON	"	B.R.G.M.	4 - 7.9.78

. Matériel :

1 résistivimètre type RUE 3 ;
1 émetteur Phoenix ;
1 groupe électrogène ;
1 véhicule laboratoire Estafette ;
2 véhicules de liaison (R4 et Land Rover).

. Travaux réalisés :

7 sondages électriques grande ligne ($4\ 000\ \text{m} < \frac{AB}{2} < 8\ 000$) ;
3 essais dipôle-dipôle.

2. ETUDE PAR METHODES ELECTRIQUES

2.1. Implantation des sondages électriques

L'emplacement des sondages électriques a été choisi en fonction des données et impératifs suivants :

. Données gravimétriques :

A l'issue de la première campagne gravimétrique dans le massif du Mont-Dore, une première carte a été tracée en densité 2,7, en juillet 1978. Cette première carte mettait en évidence les contours de la fosse remplie de ponces ; fosse que révélait une anomalie légère de l'ordre de 20 mgals. L'objectif de l'étude étant de déterminer la profondeur du socle dans cet effondrement, nous nous sommes appuyés sur les premières données de la gravimétrie pour implanter les sondages.

. Topographie :

Afin de réduire les longueurs de ligne AB d'émission de courant, il convenait d'implanter les sondages sur les vallées. Il fallait également distribuer les points d'émission A et B selon une ligne la plus droite possible en évitant les obstacles topographiques, sources de perturbations. Les zones habitées et leurs abords devaient être évitées dans la mesure du possible.

Compte-tenu de ces contraintes, seulement 7 sondages ont pu être réalisés, (cf. Plan d'implantation) :

- 4 sondages à l'intérieur de la Caldera, dont 3 dans la haute vallée de la Dordogne (SE 3,6,1) et un dans la vallée de Vendeix (SE 7) ;

- 2 sondages à l'intérieur de la fosse (SE 4 au NE, au niveau du bois de Pessade - SE 2 au SW, à 3 km à l'Est de la Tour d'Auvergne). Les deux sondages ont été disposés sur des extensions de l'anomalie gravimétrique visible sur la première carte ;

- 1 sondage (SE 5) au niveau de la bordure N de la fosse. La présence d'une structure circulaire mise en évidence par l'étude photogéologique, a guidé le choix du site de ce sondage.

2.2 Limites de la méthode

L'interprétation normale des sondages électriques s'applique à des terrains tabulaires homogènes. Le respect de cette condition de tabularité implique donc une topographie relativement plate. Aucune de ces conditions topographiques et géologiques ne se trouve réalisée dans le massif du Mont-Dore. Il en découle des perturbations sur les sondages qui sont les suivantes :

a) A-coups de prises sur AB

Ils sont dûs à des hétérogénéités latérales : variations lithologiques, fractures, proximité des falaises... Ces effets latéraux ont une influence sur la distribution des surfaces équipotentiellles dans le sol et faussent d'autant plus l'interprétation du SE que la distribution des terrains s'éloigne du modèle théorique. Le diagramme de la figure 2 illustre ce phénomène d'a-coups de prises sur AB. Entre autre exemple de conséquence des effets latéraux, il faut citer les remontées de courbes de pente supérieures à 45°.

b) A-coups de prises sur MN

Ces a-coups de prises se traduisent sur les diagrammes de sondages lorsque, pour une même distance $AB/2$, deux dispositifs MN de longueurs différentes, donnent deux valeurs de résistivité apparente différentes. L'origine des a-coups sur MN est la même que pour AB. Ce phénomène illustré à la figure 3 rend plus difficile et incertaine l'interprétation du sondage, car on est obligé d'interpoler la courbe du SE.

2.3. Résultats

2.3.1. Qualité des sondages

L'interprétation des sondages électriques, exceptés SE 4 et SE 5, est très difficile, et ce pour les trois raisons suivantes (qui éloignent du cas idéal de tabularité des terrains) :

- topographie accidentée ;
- grande densité des fractures, de corps intrusifs ;
- diamètre relativement petit de la structure (10 km) comparé à la longueur des lignes d'émission qui atteignent parfois 8 km, d'où des effets de bord.

2.3.2. Interprétation

Nous interprétons ces sondages en tenant compte des résultats des études gravimétriques et magnétiques réalisées récemment par A. GERARD qui propose également une carte structurale sur laquelle nous avons reporté nos sondages (cf. figure1).

Sur tous les sondages, le dernier horizon géoélectrique, de résistivité très élevée est attribuable à la présence du socle sain. Profondeurs du toit du socle sain ne signifie pas nécessairement profondeur du fond de la Caldera ; en effet, le toit du socle peut être altéré et posséder une résistivité très faible. Seules les données d'un forage permettraient de lever l'incertitude.

2.3.2.1. Sondages extérieurs à la structure d'effondrement :

Il s'agit, au NE de la Caldera, du sondage SE 4 au niveau du bois de Pessade et, diamétralement opposé, le sondage de la Tour d'Auvergne SE 2.

Le sondage SE 2 est situé sur les formations volcaniques trachy-andésitiques, à environ 500 m de la bordure de celle-ci. Deux interprétations possibles sont données : (voir tableau ci-dessous).

0 - 3,5 m	:	1 500 ohm.m	0 - 3,5 m	:	1 500 ohm.m
formations superficielles sèches					
3,5 - 350 m	:	70 ohm.m	3,5 - 180 m	:	70 ohm.m
alternance laves, ponces					
> 350 m	:	320 ohm.m	> 180 m	:	200 ohm.m
socle altéré					

Le socle serait donc situé à une altitude approximative de 800 à 950 m.

Le sondage SE 4 se situe sur des formations volcaniques. L'affleurement du socle le plus proche à 3,5 km. D'après la carte géologique au 1/50 000 de R. BROUSSE, il apparaît que la cote moyenne du toit du socle au contact des formations volcaniques est de l'ordre de 1 500 m, d'où une épaisseur estimée de 300 m environ de laves et remplissage volcano-sédimentaire au niveau de ce sondage.

Interprétation du SE 4 :

0 - 6 m	:	10 000 ohm.m	:	formations superficielles sèches ;
6 - 95 m	:	1 500 ohm.m	:	trachy-andésites ;
95 - 320 m	:	250 ohm.m	:	volcano-sédimentaire + ponces ;
320 - 1 000 m	:	100 ohm.m	:	ponces + socle altéré ?
> 1 000 m	:	1 000 ohm.m	:	socle sain.

On voit donc que le socle sain pourrait être situé à une altitude de 200 à 300 m, mais que le socle altéré pourrait être beaucoup plus haut (altitude 1 000 m).

2.3.2.2. Sondage de la bordure Nord : SE 5 (Puy May)

Effets latéraux et à-coups de prises sur AB perturbent toute la partie moyenne du diagramme. Les effets latéraux sont dus à la proximité de la bordure de la fosse, bordure pratiquement parallèle à la ligne d'émission.

L'existence d'une zone conductrice ne semble cependant pas devoir être mise en doute, par contre, des réserves doivent être émises quant à sa position : elle est vraisemblablement située au Sud du SE 5 et non à son aplomb, c'est pourquoi nous ne donnons pas d'interprétation de ce sondage suivant le modèle tabulaire.

2.3.3. Sondages implantés à l'intérieur de la Caldera

Les sondages SE 3 et SE 6 sont pratiquement inexploitable, à cause d'effets latéraux résistants probables. L'interprétation proposée sur le diagramme doit être considérée avec prudence.

Le sondage SE 1 est perturbé au-delà de $AB/2 = 500$ m (pente de courbe supérieure à 45°), mais en ce point la remontée due au socle est déjà amorcée.

Interprétation du SE 1 :

0 - 8 m	:	1 500 ohm.m	:	formations superficielles ;
8 - 270 m	:	20 ohm.m	:	nappe de ponces inférieure ;
> 270 m	:		:	socle sain.

Altitude du toit du socle : 700 m.

Le sondage SE 7 (Vendeix) est peu perturbé.

Interprétation du SE 7 :

0 - 8 m : 2 000 ohm.m : formations superficielles ;
8 - 55 m : 30 ohm.m : ponces ;
55 - 600 m : 10 ohm.m : ponces + eau ?
> 600 m : : socle sain.

Altitude du toit du socle : 350 m.

Si l'on se reporte à la carte structurale issue de l'étude gravimétrique et magnétique, on remarque que les sondages SE 1 et SE 7 se situent dans deux compartiments différents de la fosse. Il apparaît donc, d'après les sondages électriques, que l'effondrement serait maximum dans le panneau Ouest. C'est également dans cette zone qu'ont été relevées les plus faibles résistivités.

2.4. Essais de sondages par méthode dipôle-dipôle

Deux types de dispositifs ont été utilisés :

- dispositif radial ;
- dispositif polaire (ou axial).

Ces essais n'ont pas donné les résultats attendus et ce, pour des raisons essentiellement d'ordre technique :

- puissance à l'émission trop faible :

- . longueur du dipôle AB = 500 m,
- . courant injecté : 1,8 A ;

- appareillage de mesure :

- . longueur du dipôle MN = 300 m,
- . le récepteur utilisé ne permettait pas d'effectuer des mesures de tensions inférieures à 0,2 mV, et encore moins d'opérer avec de faibles rapports signal/bruit. En pratique, les mesures étaient impossibles pour des valeurs de R^x supérieures à 2 200 m dans le cas du dispositif axial de 1 500 m seulement pour le dispositif radial.

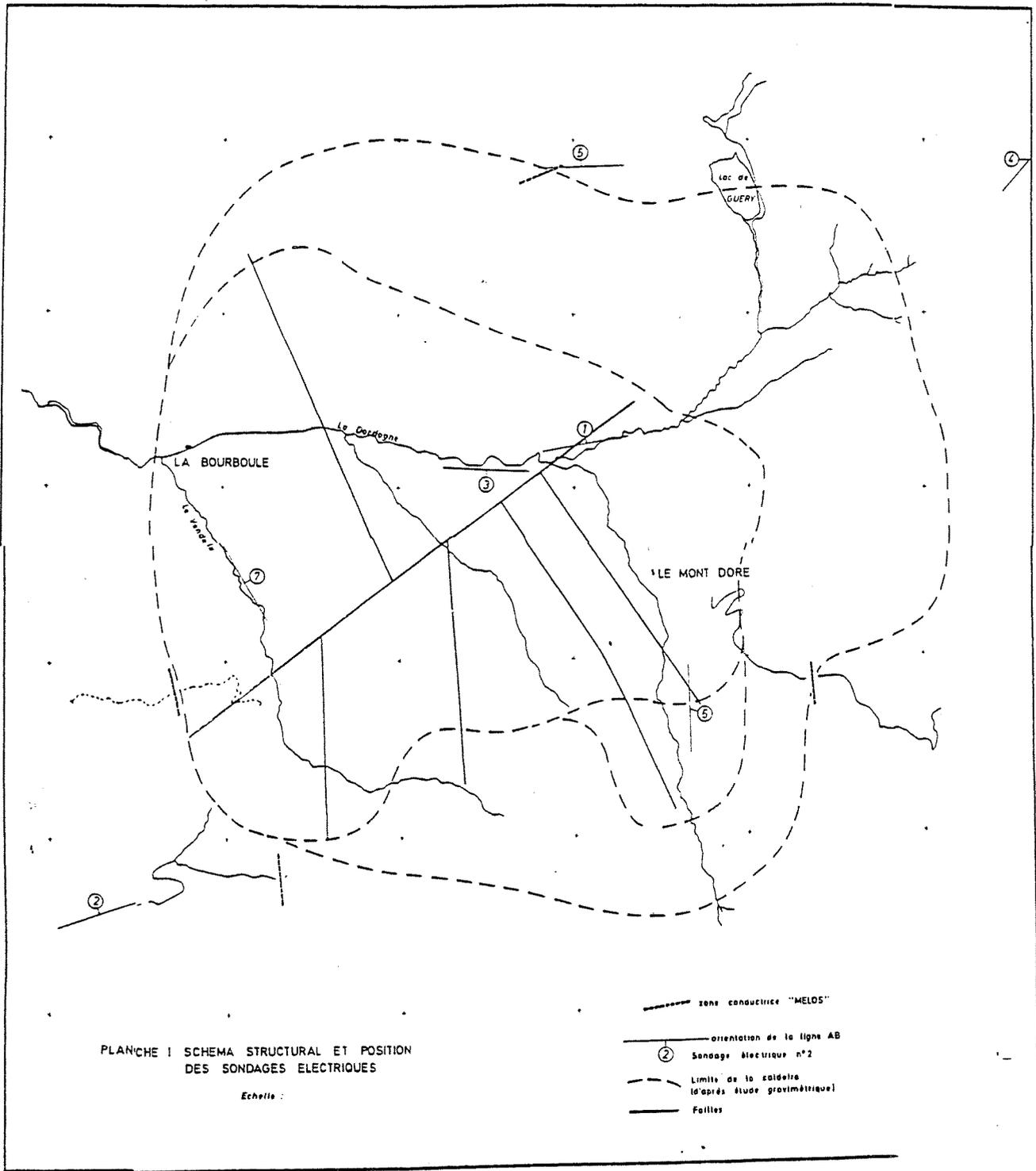
^x R = distance entre centres des dipôles émetteur et récepteur.

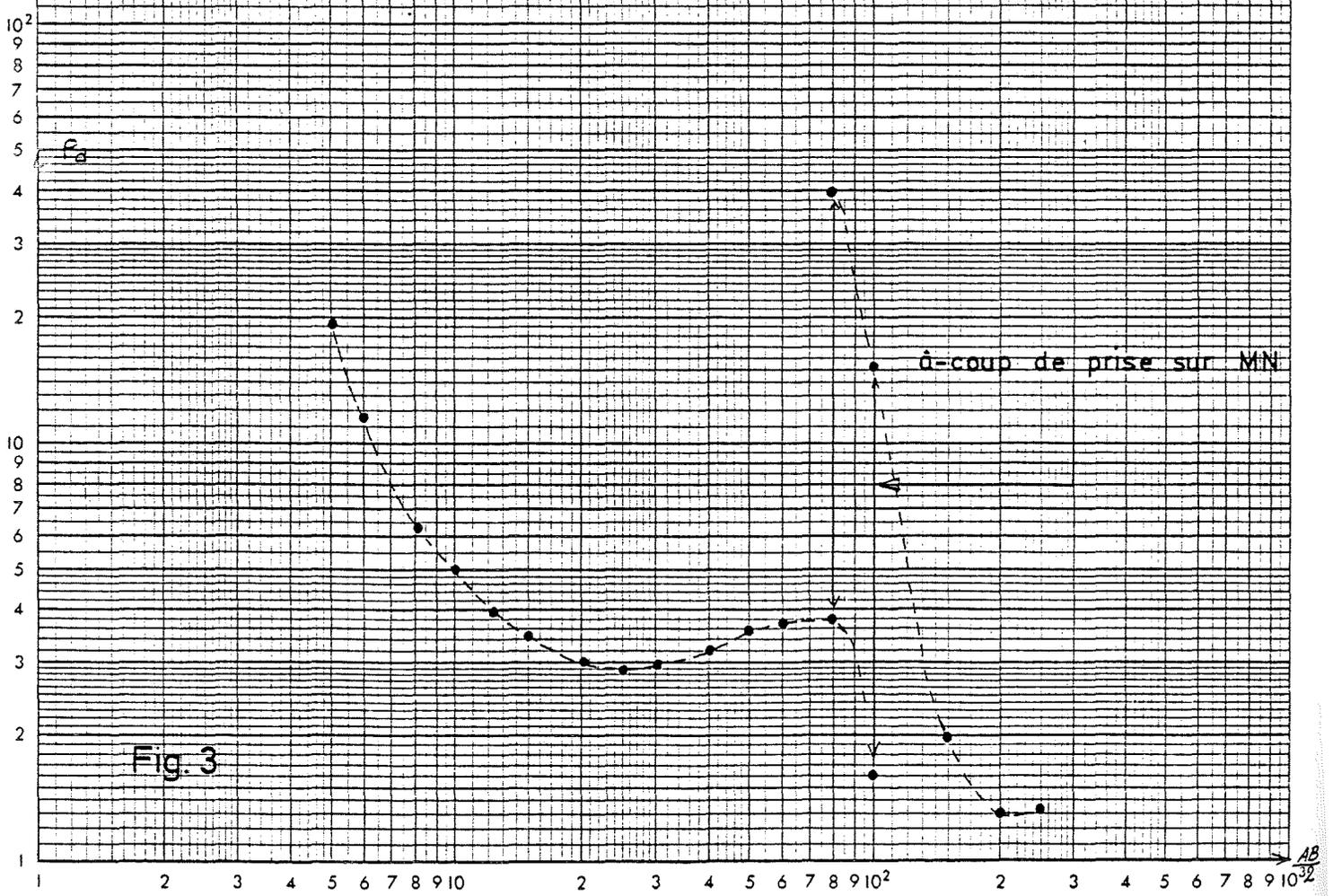
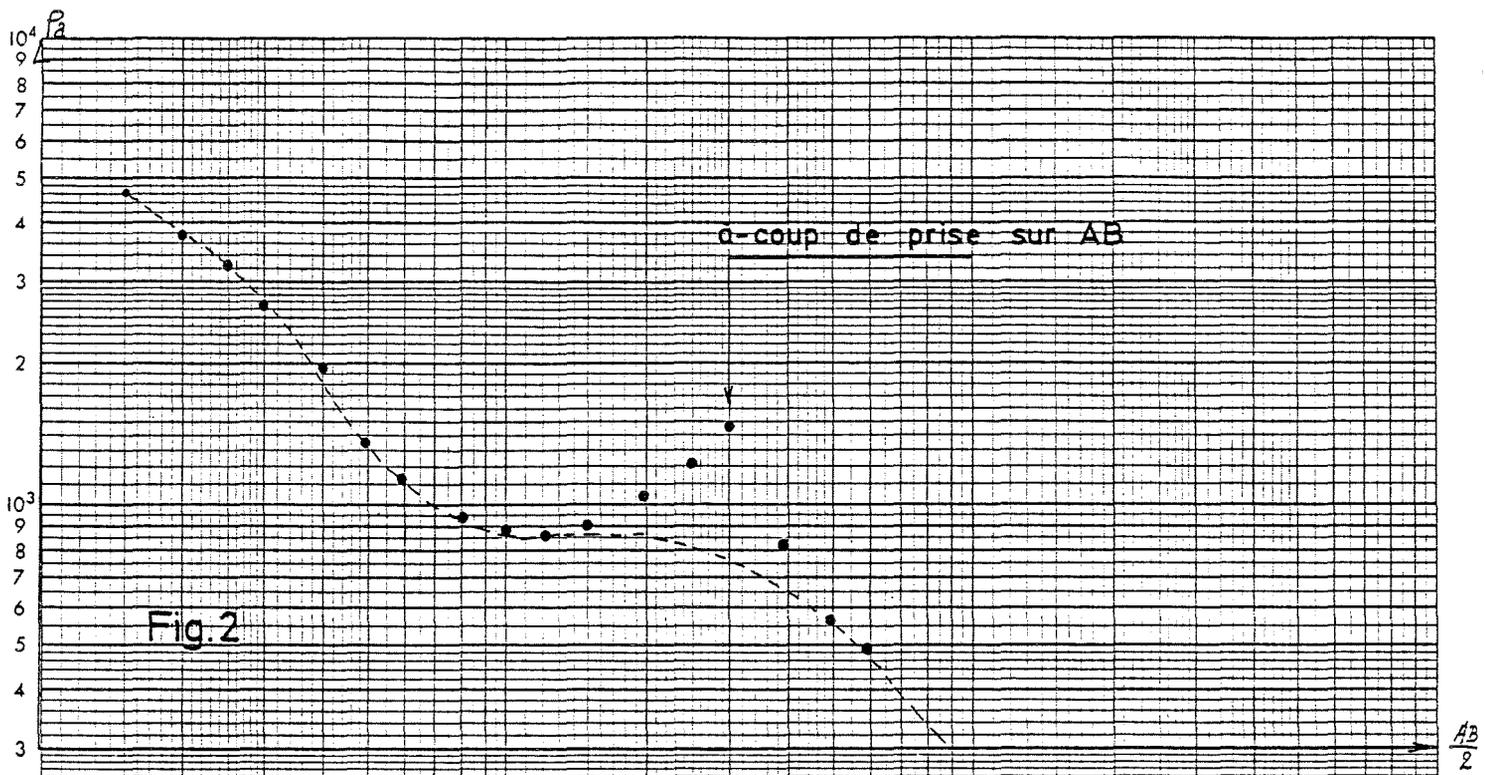
C O N C L U S I O N S

L'étude par sondages électriques a fourni de bons résultats dans la vallée de Vendeix. C'est au niveau de ce sondage qu'ont été enregistrées les plus faibles résistivités (1000m). La profondeur du toit du socle sain (- 600 m) a été déterminée avec une précision acceptable ; cette profondeur étant la plus grande que nous ayons relevée.

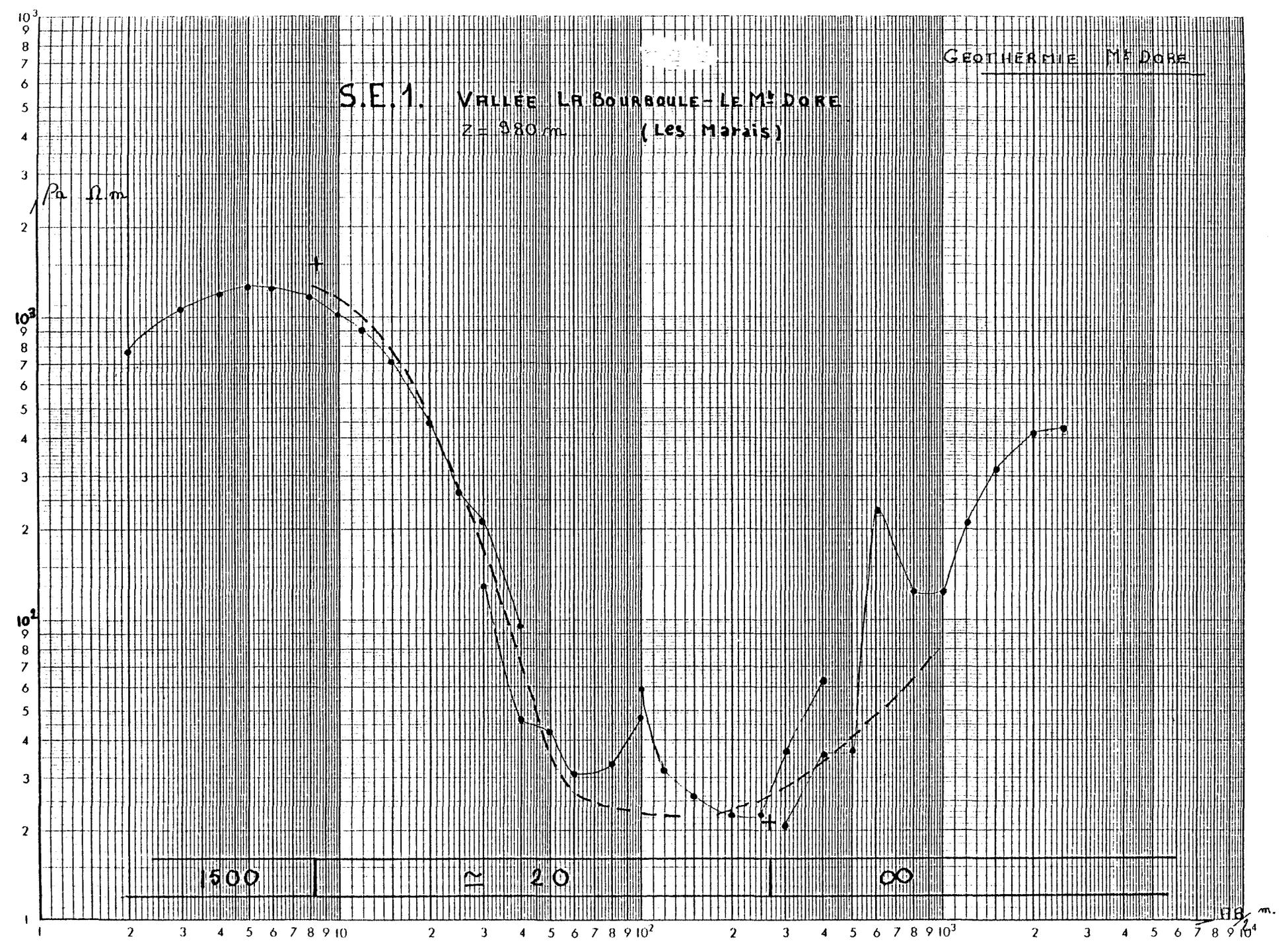
L'utilisation des méthodes électriques (sondages électriques, sondages Mélos) s'est heurtée à l'absence de tabularité des terrains, ce qui explique les interprétations souvent sommaires que nous avons données des différents sondages, car il était illusoire de vouloir interpréter quantitativement des diagrammes de sondages à l'aide d'abaques calculés pour des terrains horizontaux et parallèles ; cette non-tabularité nous est apparue seulement au cours de la campagne de terrain, lorsque des à-coups de prise (pour les S. E.) et des à-coups de boucles (pour les sondages Melos) ont été observés.

A l'intérieur de la Caldera, c'est le panneau ouest qui est le plus affaissé et qui possède l'unité lithologique la plus conductrice. De ce fait, cette zone mériterait d'être retenue comme favorable à la production d'eaux géothermales. Les données des sondages électriques, particulièrement en ce qui concerne la profondeur de la fosse, pourraient être confirmées par d'autres méthodes, en particulier par la sismique réfraction.



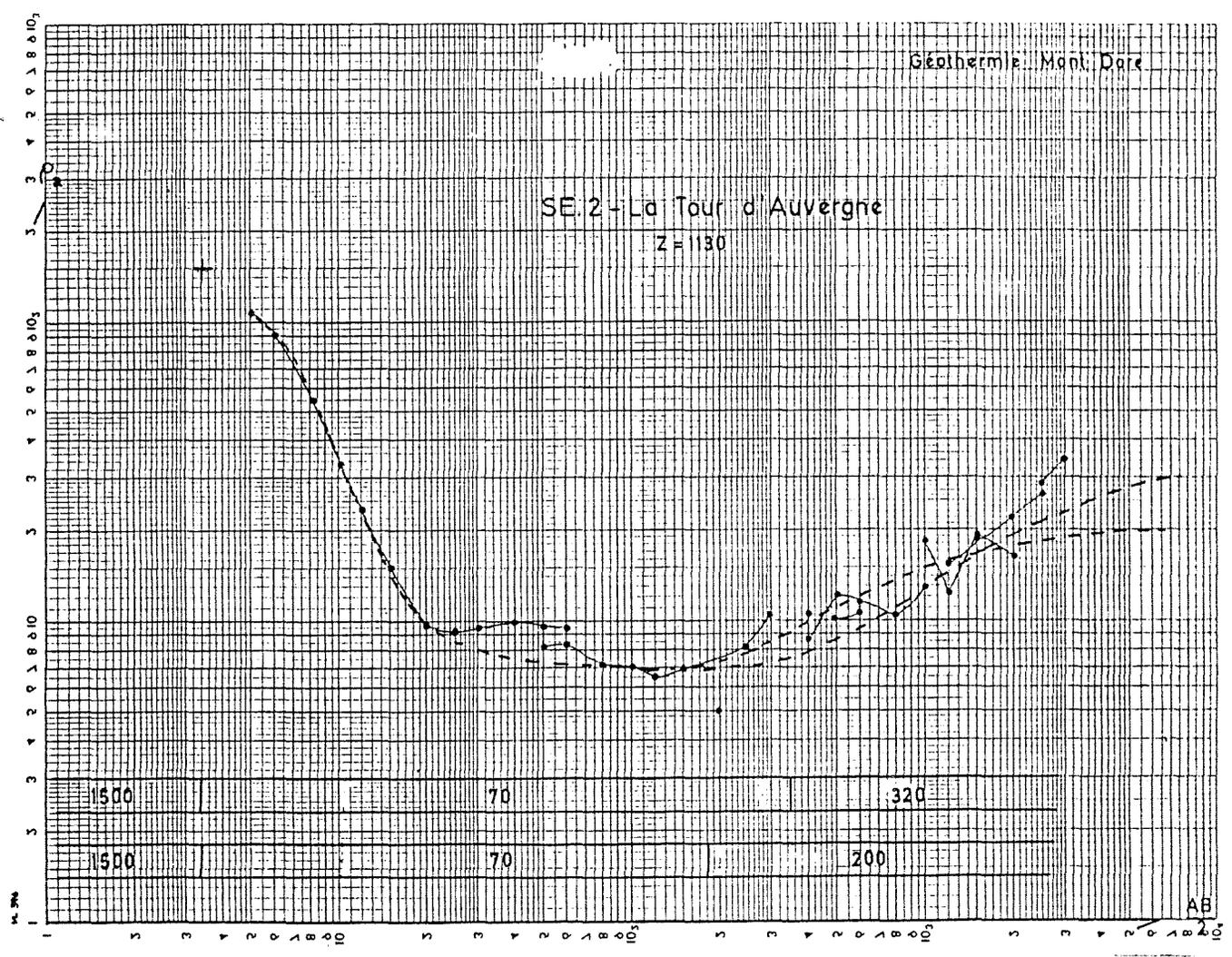


S.E.1. VALLÉE LA BOURBOULE-LE MÈ DORE
Z = 980 m (Les Marais)



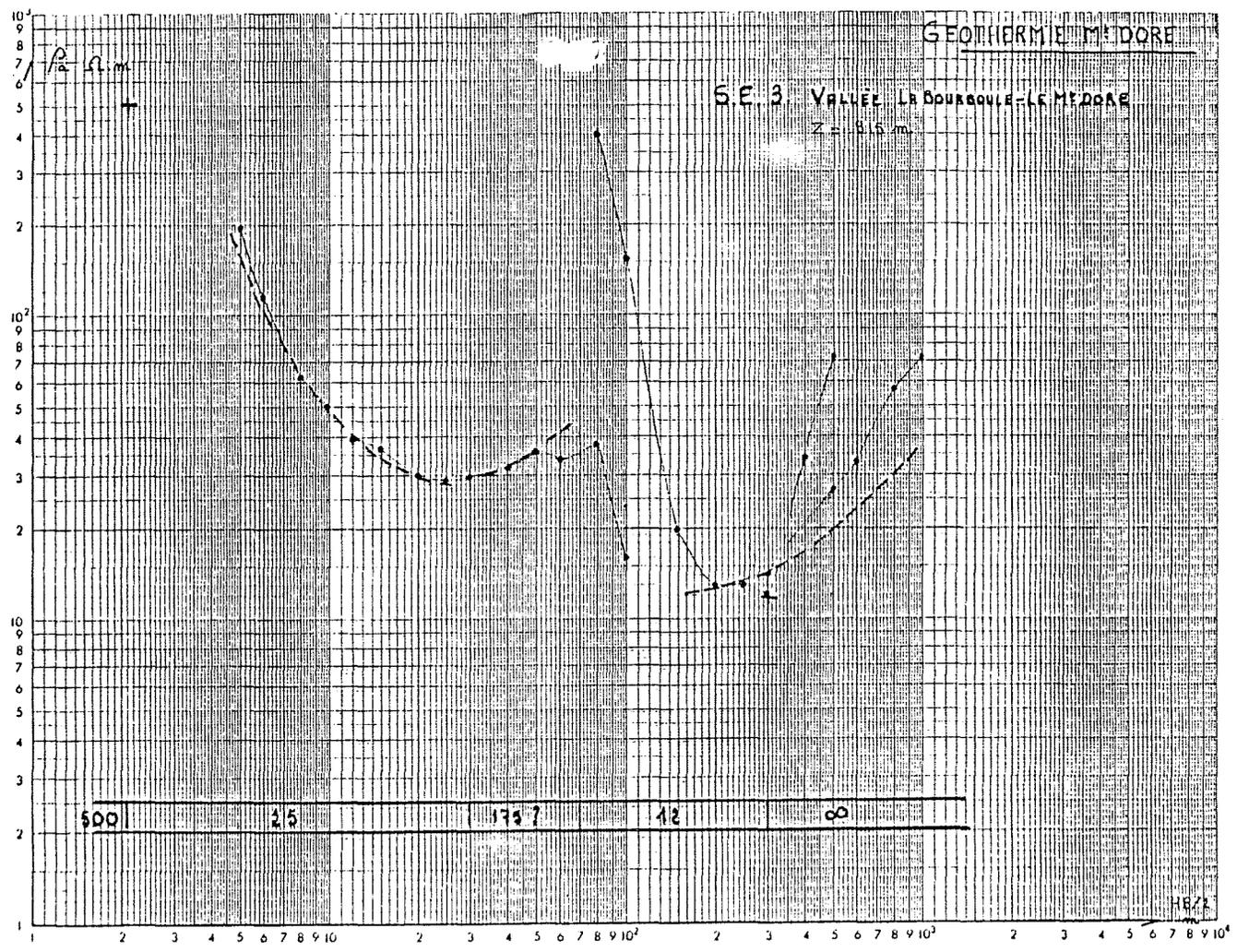
SE.2 - La Tour d'Auvergne

Z = 1130



S.E.3. Vallée La Bourgonie - Le Mont Dore

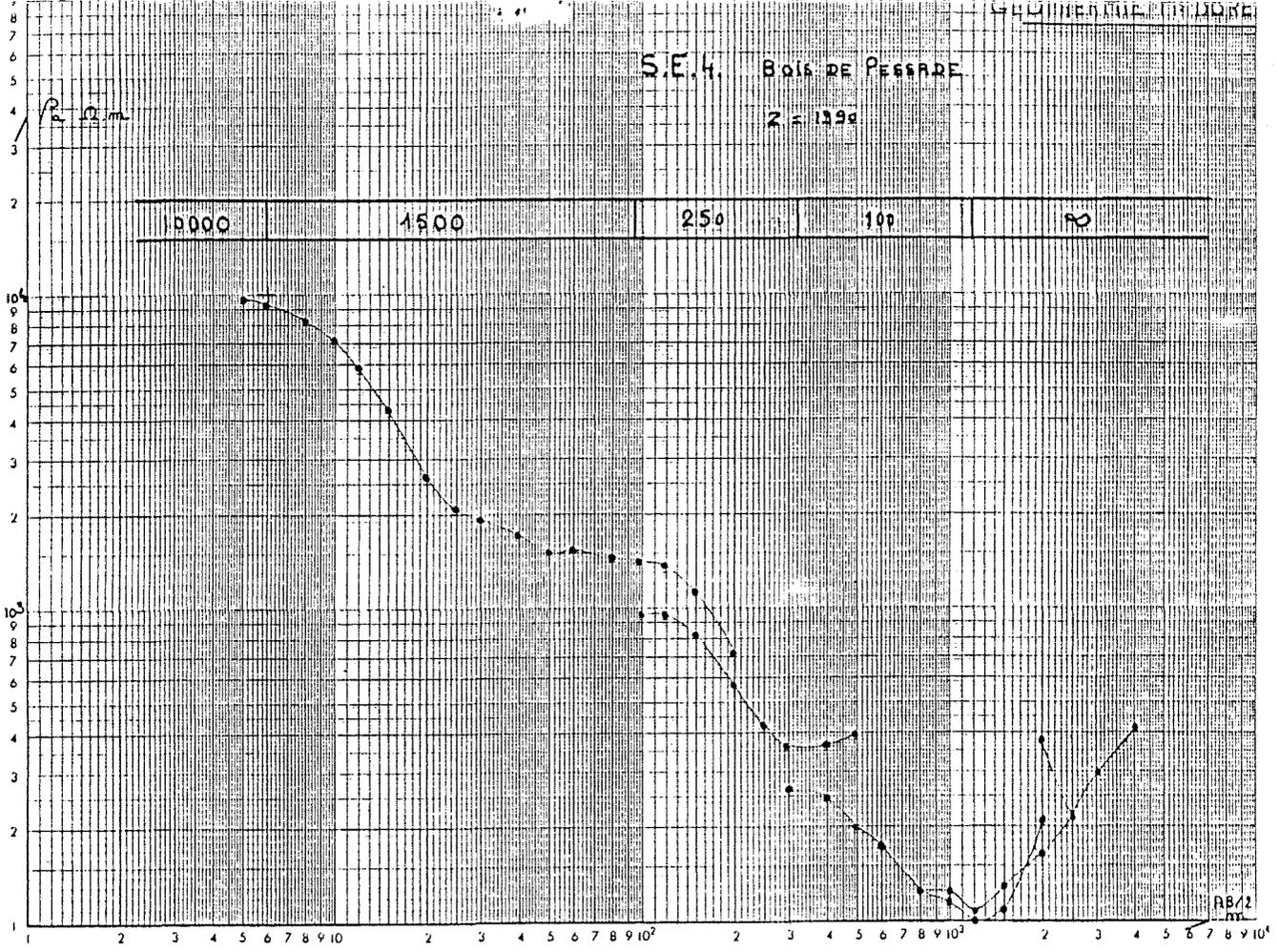
Z = 815 m



S.E.H. BOIS DE PESSAÏRE

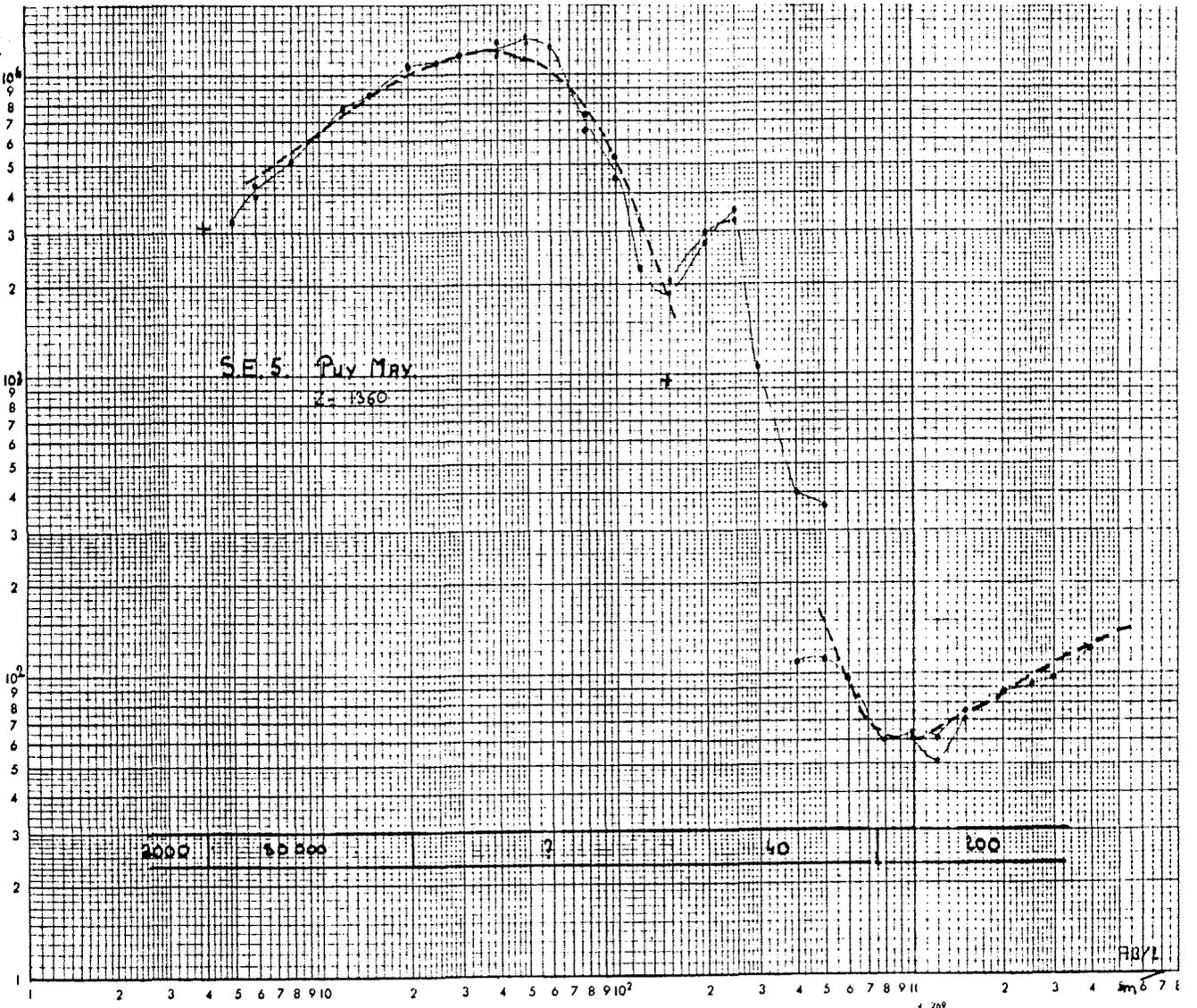
Z = 1396

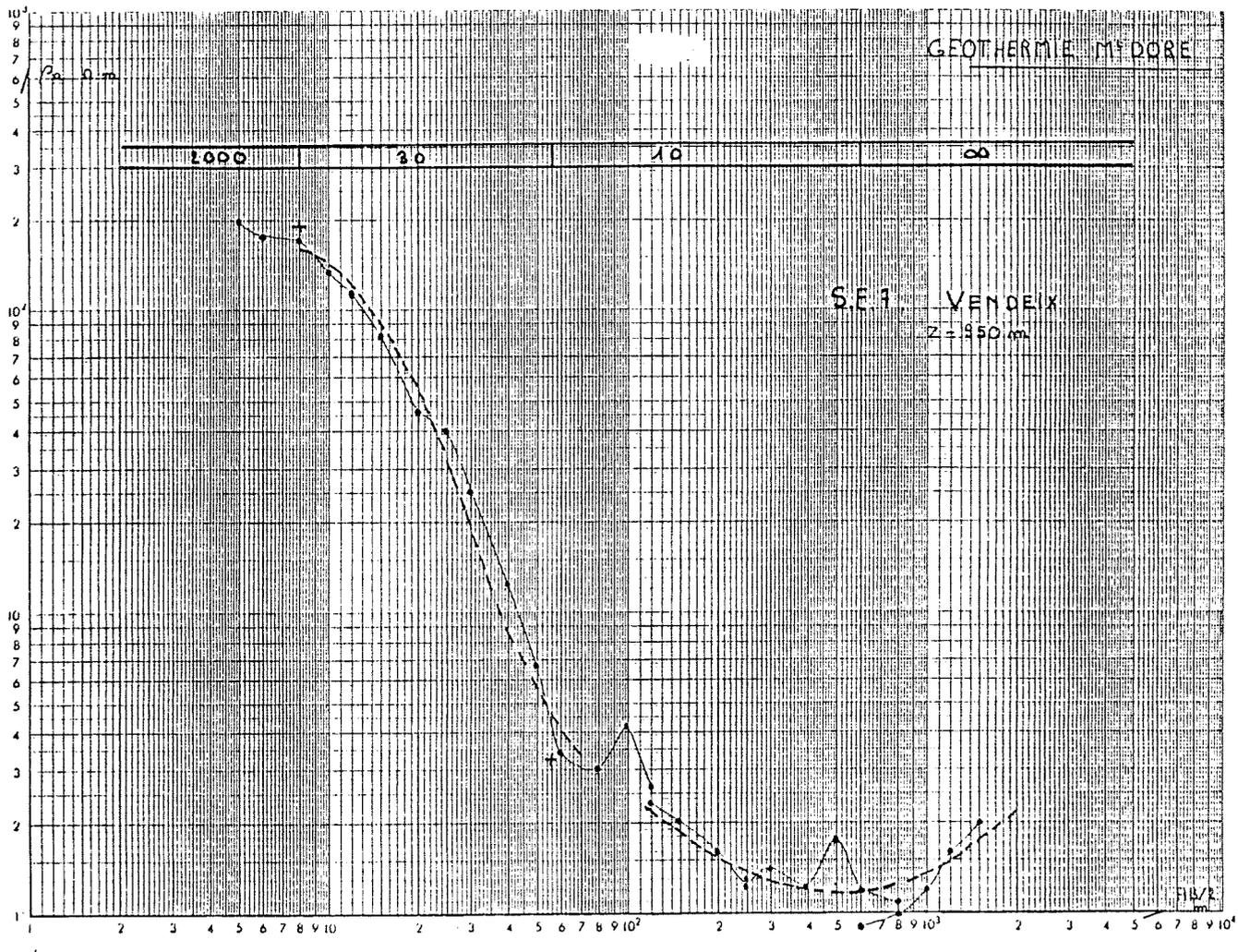
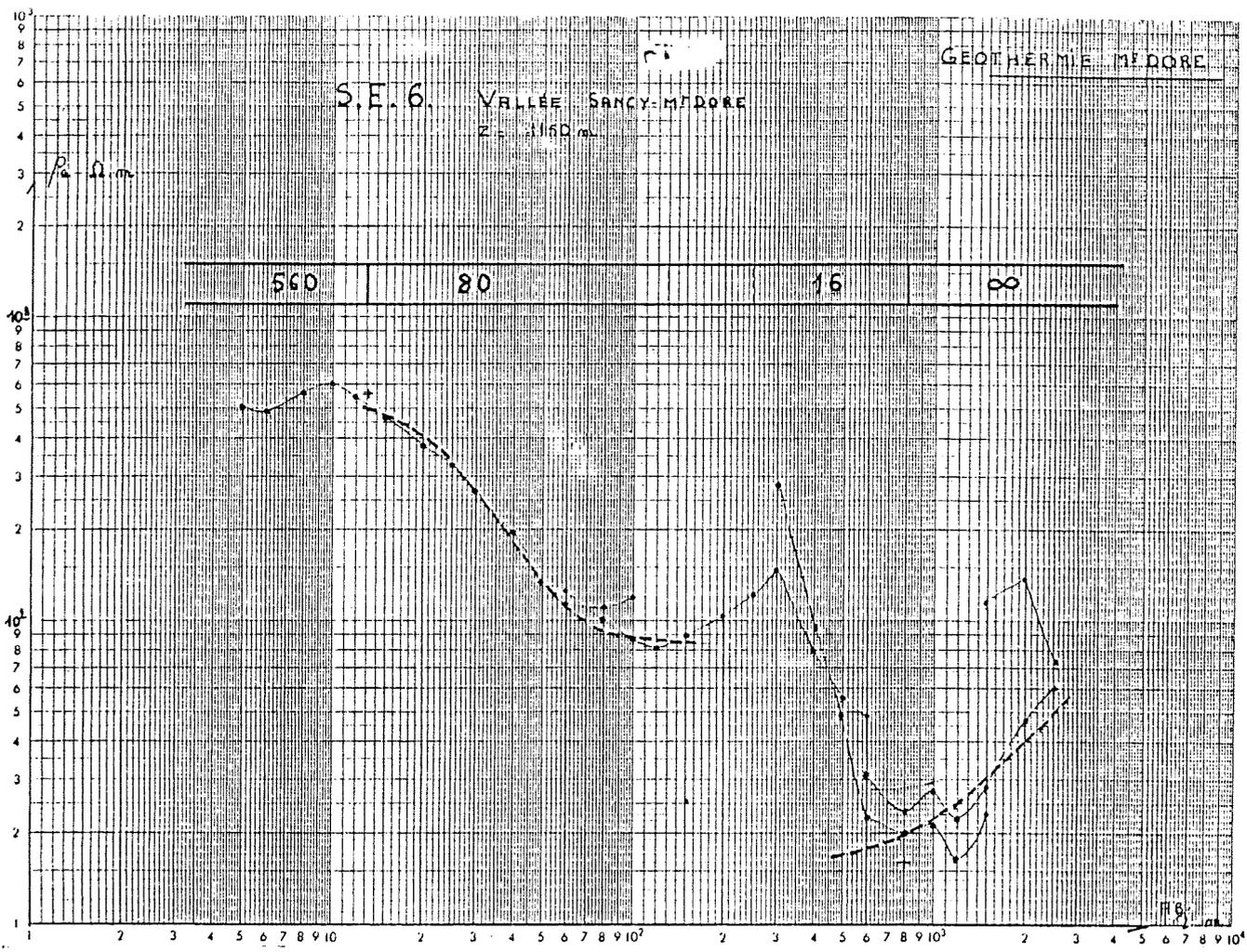
R. P. m.



S.E.S. PUY MARY

Z = 1360





Sondages et profilages électromagnétiques MELOS

par

S. LALLIER

1. RENSEIGNEMENTS STATISTIQUES

Du 21 au 26 septembre 1978

. Participants :

CARRIVE	Stagiaire	B.R.G.M.	4 - 27.9.78
FROIDEVAUX	Géophysicien	BEICIP	28 - 23.9.78
LALLIER	"	B.R.G.M.	4 - 27.9.78
LENAT	"	I.P.G.	4 - 27.9.78
MILLON	"	B.R.G.M.	21 - 23.9.78

. Matériel :

1 équipement "MELOS basse fréquence" complet ;
1 véhicule laboratoire Estafette ;
1 véhicule de liaison R 4.

. Travaux réalisés :

4 profils, soit un total de 35 stations ;
5 stations doubles au droit des sondages électriques.

2. PRESENTATION DE LA METHODE

2.1. Intérêt de la méthode

La mise en oeuvre est simple, rapide et particulièrement bien adaptée aux zones d'accès difficile. Le dispositif de mesure n'utilisant que deux électrodes fixes pour la mesure de la composante E_y du champ électrique, il n'y a pas de problèmes d'à-coups de prise, mais par contre les positions de la boucle émettrice et du dispositif récepteur ont une influence lorsque le terrain n'est pas tabulaire et on peut alors parler d'à-coups de boucle.

2.2. Limites de la méthode

La méthode est sensible aux bruits parasites d'origine industrielle, bien que les fréquences utilisées soient nettement différentes de la fréquence 50 Hz et de ses harmoniques. Près des zones habitées, bruits industriels et concentrations de conducteurs de toute nature rendent les mesures impossibles.

Le rapport signal/bruit décroît lorsque la distance émetteur-récepteur augmente, surtout vers les basses fréquences. La fréquence 1,09 Hz n'a jamais été utilisable. Les fréquences 2,19 Hz et 4,37 Hz donnent des résultats parfois médiocres. En un site donné, on juge la qualité de la mesure en comparant les mesures faites avec et sans émission.

L'impossibilité d'utiliser les fréquences basses limite la profondeur d'investigation.

. Influence des effets latéraux :

Les discontinuités lithologiques latérales ont un effet sur les sondages. On jugera l'importance de ces effets en se reportant aux sondages S4 et S'4 du profil de la Tour d'Auvergne, où les deux diagrammes représentent le même sondage réalisé avec une boucle d'émission située en deux endroits différents. A l'inverse, les sondages 3 de la Croix Saint Robert donnent des résultats très comparables. Compte-tenu de ces remarques, il serait vain de proposer une interprétation quantitative (basée sur le modèle de terrains tabulaires). Nous nous limiterons donc à une interprétation qualitative., sous forme de profils.

2.3 Choix du site des sondages et des profils

Tous les sondages électriques ont été doublés de sondages MELOS (en général 2) principalement pour confirmer la présence de conducteurs.

Quatre profils MELOS ont été réalisés. Les premiers résultats de la méthode magnéto-tellurique mise en oeuvre par le C.G.R. de Garchy et les résultats du premier lever gravimétrique nous ont guidé dans l'implantation des profils.

2.4. Résultats

Deux composantes Hx et Hz du champ magnétique et la composante Ey du champ électrique sont mesurées et permettent le calcul de deux résistivités apparentes P_a et P_a' :

$$P_a = f \left(\frac{EY}{Hx} \right)^2 K C \quad (\text{méthode d'impédance})$$

$$P_{a'} = f \frac{R^2}{\left(\frac{Hx}{Hz} \right)^2} K' C' \quad (\text{méthode d'inclinaison du champ})$$

où R : distance du centre de la boule d'émission aux capteurs magnétiques.

C C' : coefficients.

f : fréquence

K K' : sont des fonctions de Hx/Hz

En pratique on utilise les courbes $P_a = f (T)$ tracées sur diagramme bilogarithmique.

2.4.1. - Sondages Mélos réalisés sur les sites des sondages électriques.

Les courbes de résistivité P_a , sont toutes décroissantes et ne traduisent pas l'influence d'un horizon résistant, peut-être parce qu'on ne descend pas assez en fréquence compte-tenu de la profondeur importante du socle. A l'inverse, certaines courbes P_a indiquent par leurs remontées aux basses fréquences, l'influence d'un socle résistant, à moins qu'il ne s'agisse d'un effet latéral proche (dyke) ou d'un rapport signal sur bruit trop faible aux basses fréquences.

La présence constante d'un horizon intermédiaire plus conducteur qui avait été révélée par les sondages électriques, se trouve confirmée par les sondages MELOS.

- sondages Melos des Marais :

Ces sondages ne font pas apparaître le socle résistant mis en évidence par le sondage électrique SE 1, probablement à cause du mauvais rapport signal/bruit aux basses fréquences.

- sondages Melos de la Tour d'Auvergne

La différence entre les sondages S1 et S2 est probablement due à la présence d'une ligne électrique à proximité de S1. Aux fréquences élevées, les résistivités apparentes obtenues en méthode d'inclinaison de champ (P_a') sont différentes de celles obtenues en méthode d'impédance, probablement parce que l'on néglige l'influence des courants de déplacement ; c'est le cas du S2 où les diagrammes de résistivité P_a et P_a' donnent des résultats contradictoires.

- Sondages Melos de Rigolet bas :

Les sondages Melos et le sondage électrique SE 3 montrent l'existence d'un terrain conducteur en profondeur ; la présence d'à-coups de prise sur MN rend délicate toute autre comparaison.

- Sondages Melos du Bois de Pessade :

A propos de ces deux sondages, on peut formuler les mêmes remarques que précédemment. Les courbes P_a confirment les résultats du sondage électrique SE 4 : séquence résistant - conducteur - résistant.

- Sondages Melos du Puy May :

Les diagrammes P_a et P_{a1} du sondage n° 1 donnent des résultats comparables^a : un premier horizon de 80Ω m qui surmonte un horizon conducteur. Ces valeurs diffèrent de celles du sondage électrique SES, sondage perturbé par la proximité de la bordure de la Caldera.

- Sondages Melos du Sancy :

Les observations des sondages de Rigolet Bas s'appliquent également au sondage Melos du Sancy ; sur ces deux derniers sites, les sondages Melos sont comparables ; il en est de même des sondages électriques SE 3 et SE 6.

- Sondages Melos du Ravin de Vendeix :

Les sondages de Vendeix, particulièrement le sondage 2, sont en bon accord avec les résultats du sondage électrique SE 7 ; encore que la remontée des courbes Melos ne soit pas forcément due au socle résistant.

2.4.2. Etude des profils :

Avant d'aborder l'interprétation de ces profils, il est nécessaire de souligner qu'une anomalie conductrice peut être causée soit par une zone conductrice, soit par un contact, car c'est le contraste de résistivité qui donne l'anomalie.

- Profil de la Croix Robert :

Les profils de résistivité apparente ont été tracés pour les fréquences 560, 140, 35 et 8,75 Hz. Le profil de la Croix Robert fait apparaître une zone conductrice au niveau du sondage 3. Il s'avère que ce sondage se situe en bordure du premier effondrement tel que le fait apparaître la carte structurale. Cette anomalie conductrice peut correspondre à une zone faillée et altérée bordant l'effondrement ou tout simplement à une anomalie de contact.

- Profil de la Tour d'Auvergne :

Les profils sont tracés pour les fréquences 560, 140, 35 et 8,75 Hz. Comme dans le cas précédent, une zone nettement conductrice s'individualise au niveau du sondage 6 ; une seconde, moins nette est probable entre les sondages 1 et 2. Ce profil se situe à l'extérieur de la fosse d'après la carte structurale. Si l'on explique cette zone conductrice par la présence d'une fracturation ou d'une anomalie de contact, il faut décaler la position de la faille bordière de 500 m vers le Sud. Une seconde fracture peut expliquer la deuxième anomalie conductrice des sondages 1 et 2.

- Profil de la Charbonnière :

Ce profil ne se compose que de cinq stations dont quatre régulièrement espacées et une à 750 m à l'Est. Pour toutes les fréquences reportées, on note une très nette chute de la résistivité apparente P_a entre les stations 4 et 1 ; chute que peut expliquer la bordure de la fosse. Dans ce cas le sondage 1 coïncide avec la bordure de la structure qu'a révélée l'étude structurale.

- Profil du Puy May :

Dix sondages ont été effectués, mais seulement neuf composent le profil, le sondage S1 étant trop éloigné de l'axe du profil. Ce profil traverse diamétralement le Puy May, coupe le premier gradin de l'effondrement et l'anomalie circulaire mise en évidence par l'étude de photographies ERTS. Le profil de résistivité P_a révèle deux anomalies conductrices au niveau des sondages 2.5 et 8 ; anomalies imputables à deux contacts selon les schémas suivants :

- . une zone résistante entre les sondages 5 et 8, encadrée par des terrains conducteurs,
- . une zone conductrice entre les sondages 5 et 8, encadrée par des formations plus résistantes, hypothèse que confirmeraient les courbes de résistivité P'_a .

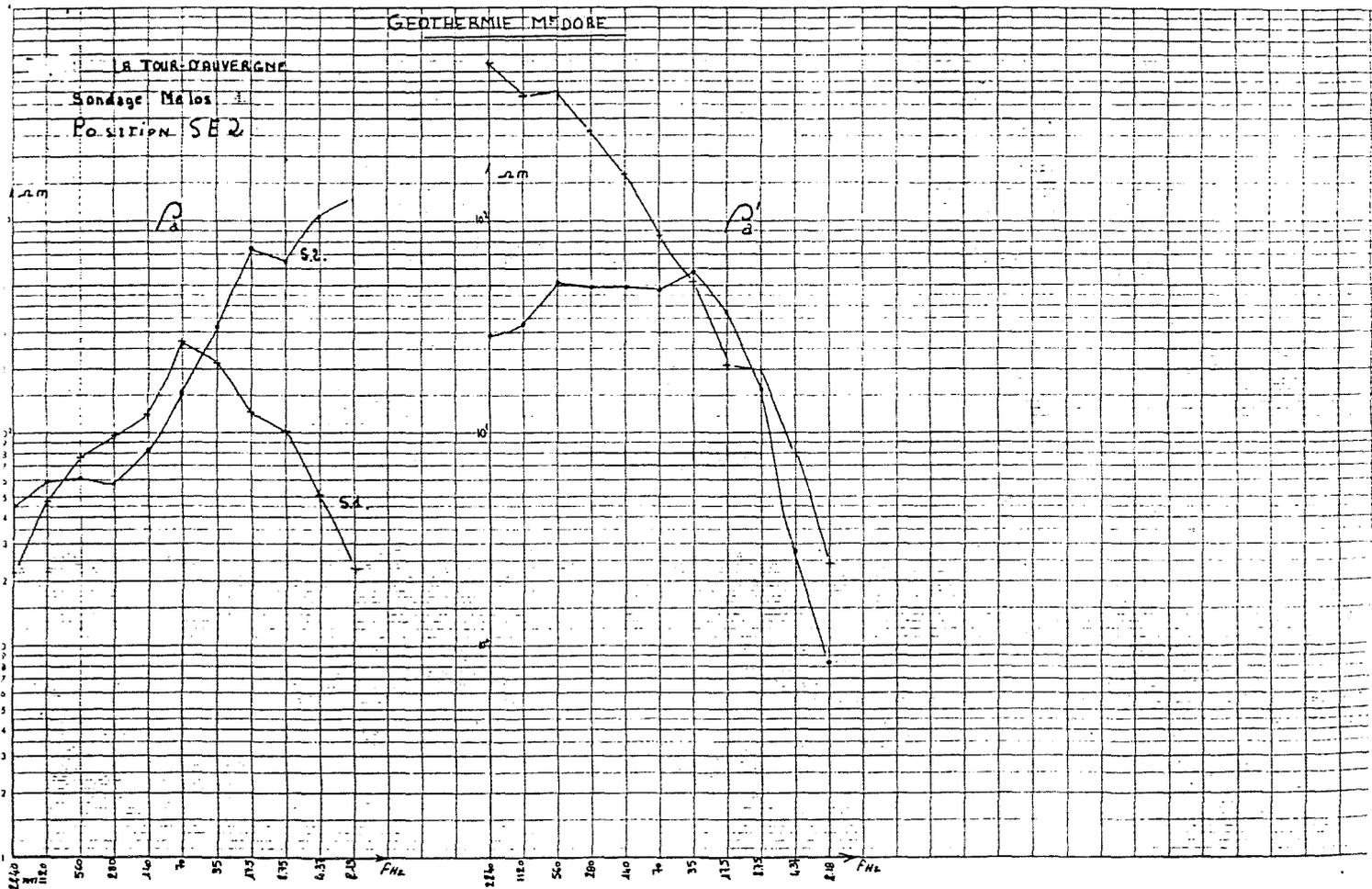
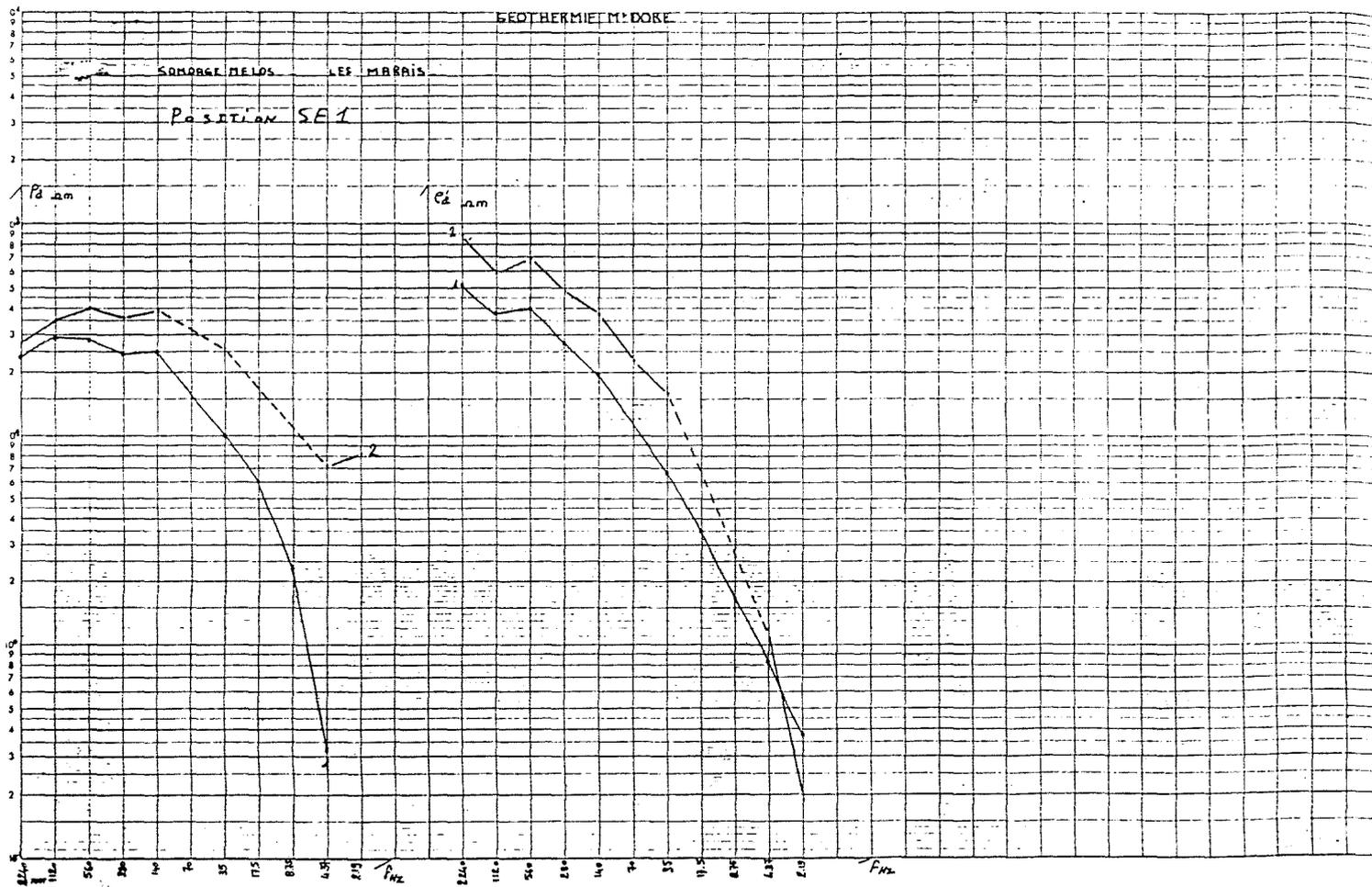
La pseudo-coupe de résistivité apparente qui est proposée peut être interprétée selon le schéma suivant ; corps intrusif qui atteint la surface topographique entre les sondages 4 et 8, souligné par la zone conductrice qui résulte du contraste de résistivité entre l'encaissant et l'intrusion. Il est intéressant de noter que la structure circulaire révélée par l'étude photogéologique coïncide approximativement avec la zone comprise entre les sondages 4 et 8, zone qui est également le siège d'une anomalie gravimétrique.

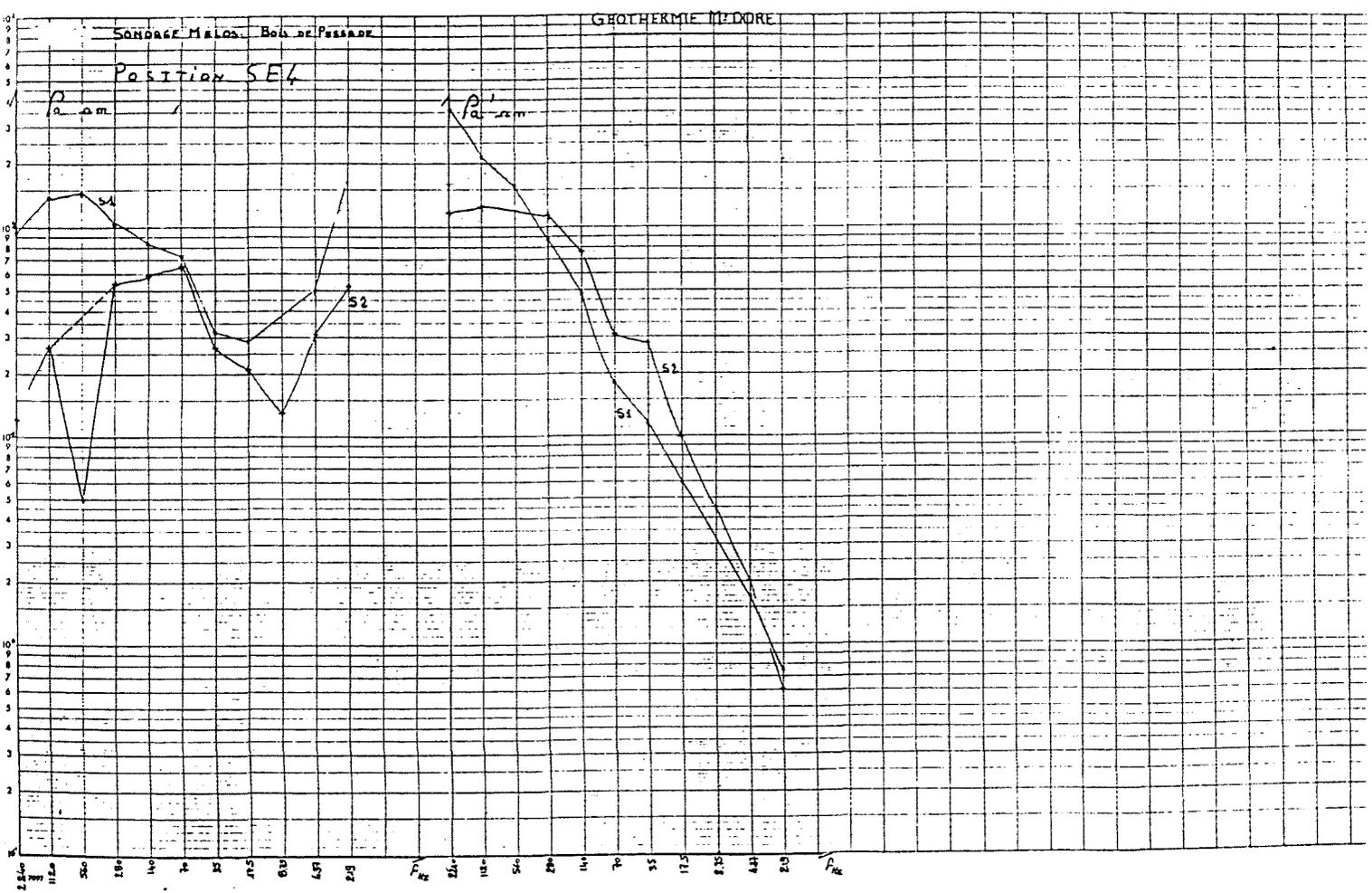
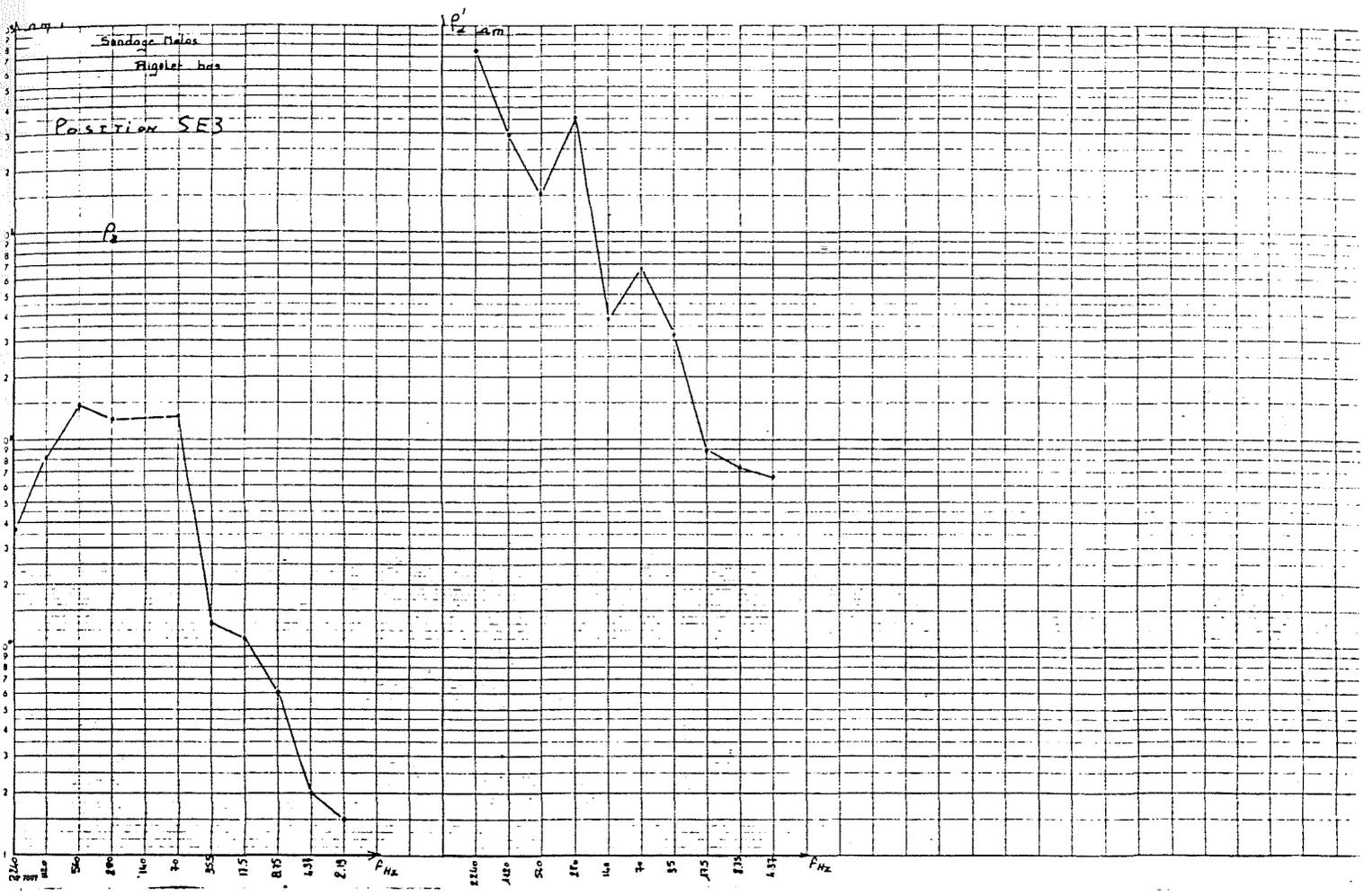
D'après les courbes d'isorésistivités apparentes, l'intrusion semble s'étaler en profondeur vers les sondages 8 et 9, c'est-à-dire sous le Puy May ; à l'inverse, vers le NNW, le contact est d'apparence vertical (sondages 4 et 5) et peut s'interpréter comme étant la bordure nord de la Caldera. Il est donc logique de penser que l'intrusion est liée à la zone de faiblesse due à la fracturation de bordure de la fosse.

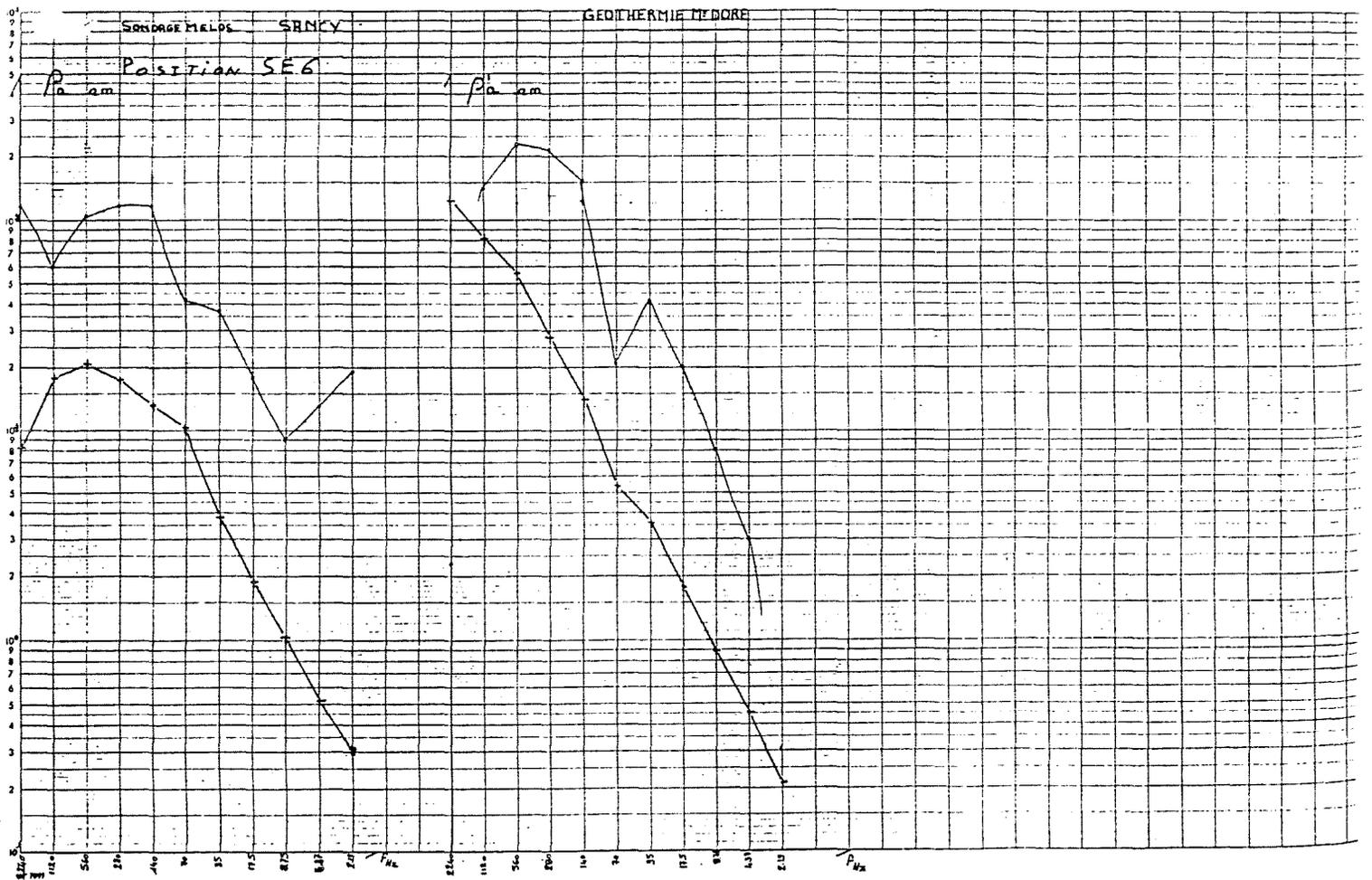
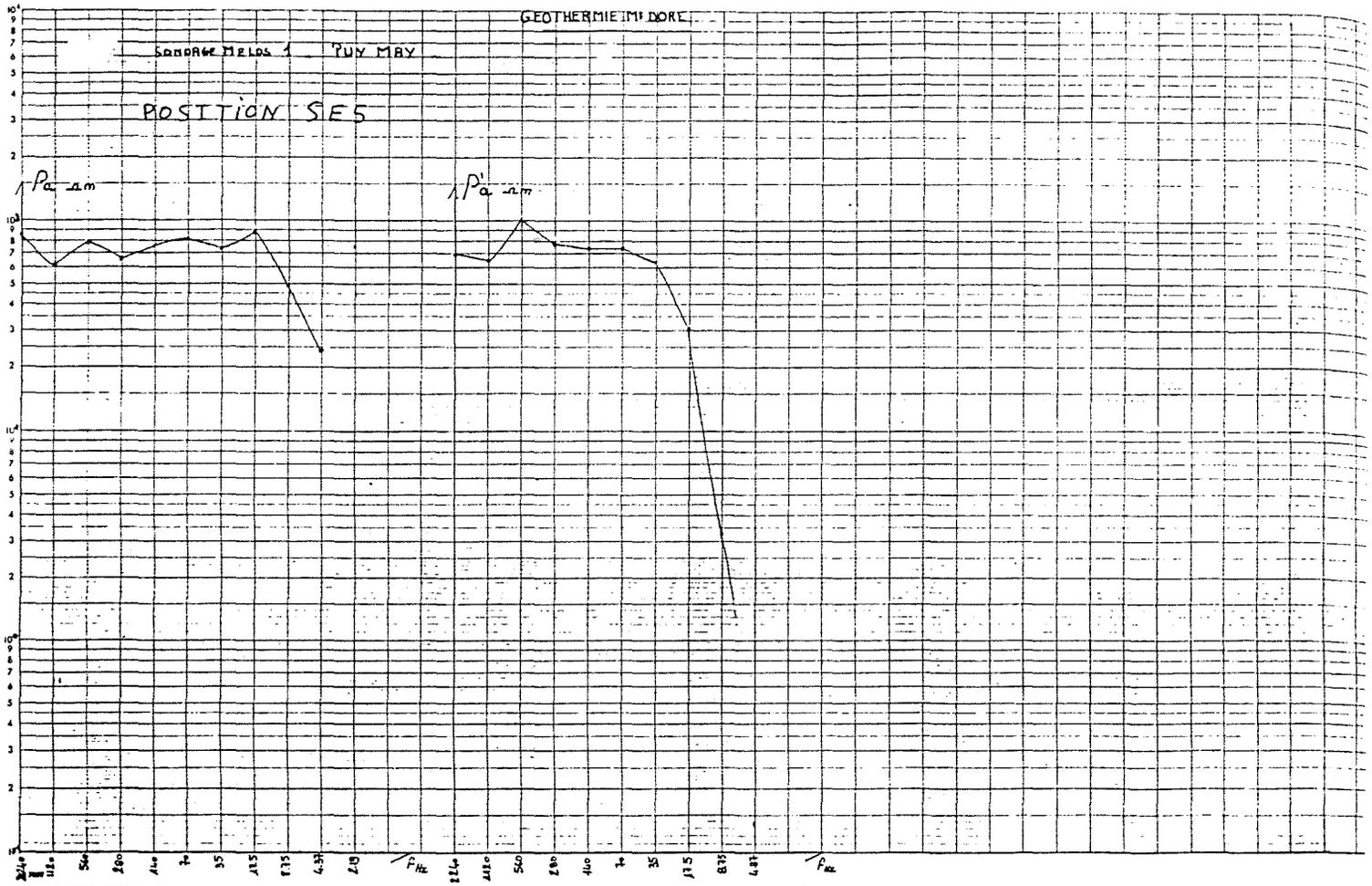
3. CONCLUSION

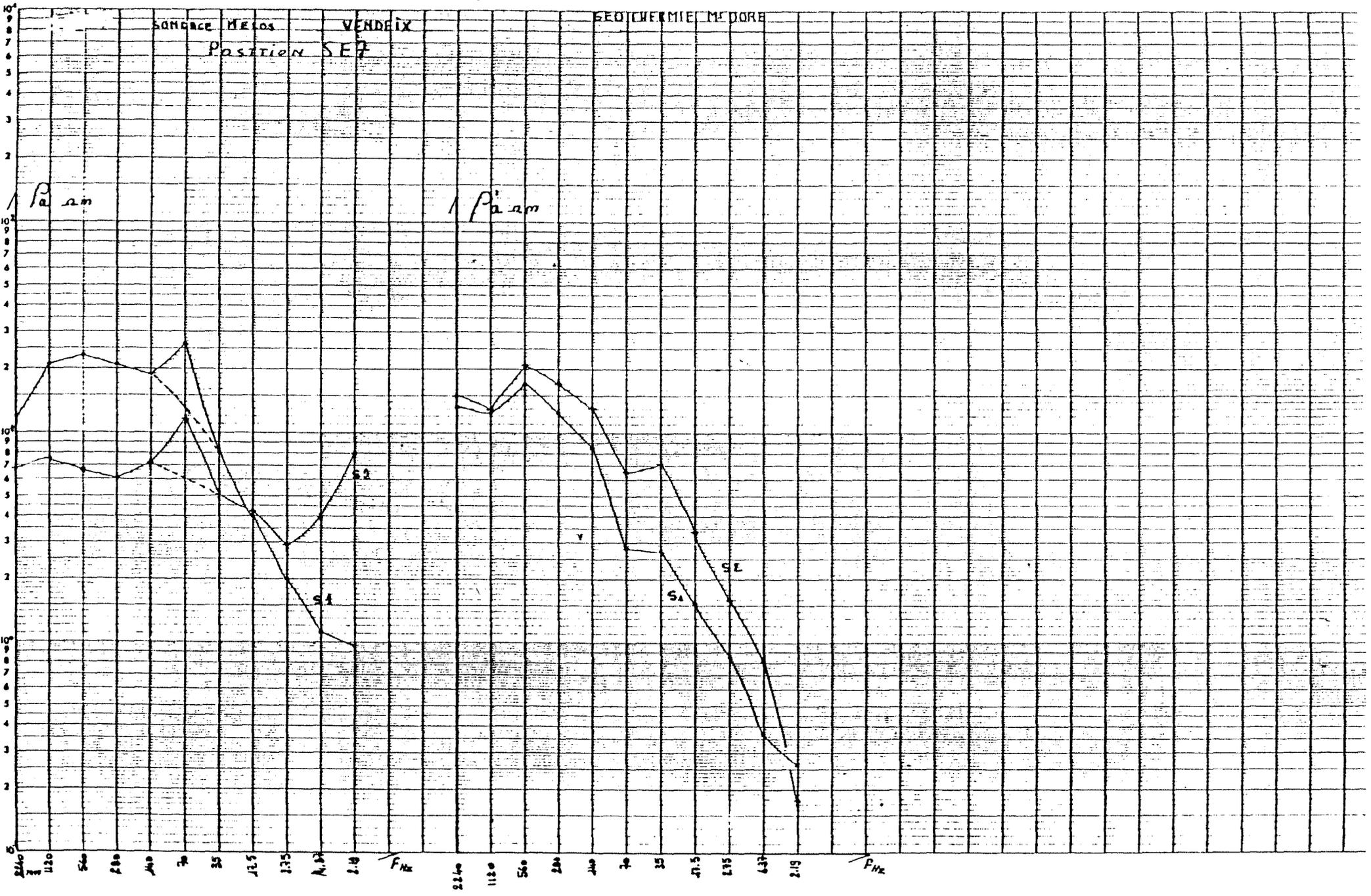
L'acquisition de données quantitatives à grande profondeur s'avère toujours délicate dans le cas de structures de dimensions réduites comme la Caldera du Mont-Dore.

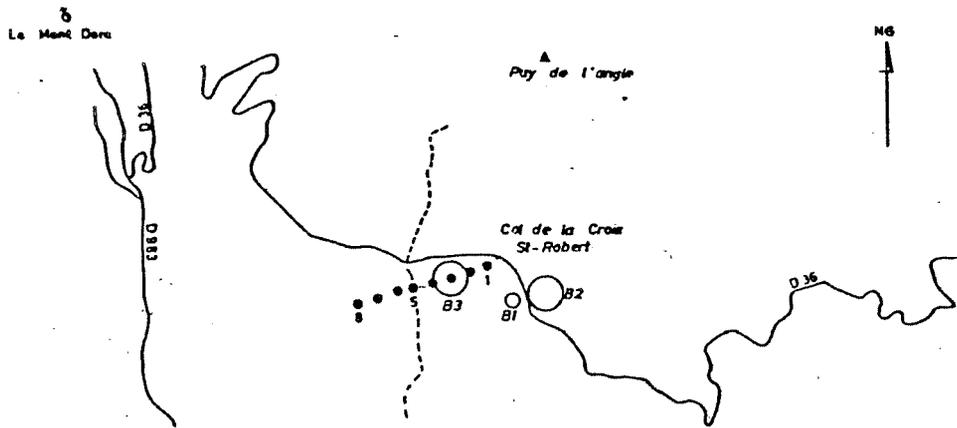
La méthode électromagnétique "Melos", de mise en oeuvre aisée, apporte, par la technique du profilage, des précisions d'ordre structural. Elle complète l'étude gravimétrique et magnétique en ce qui concerne la localisation précise des accidents. Pour l'étude du Mont-Dore, nous avons observé une bonne corrélation entre les anomalies pseudo-conductrices et la position de la bordure de la fosse obtenue par l'étude gravimétrique et magnétique. Le profil de la Tour d'Auvergne permet d'envisager un décalage de 500 m vers le Sud, au bord de la fosse, au droit de ce profil. La méthode Melos est par contre inopérante pour ce qui est de la détection du toit (trop profond pour les fréquences utilisées) sous un recouvrement conducteur, ce dernier point devant être résolu par les sondages électriques.



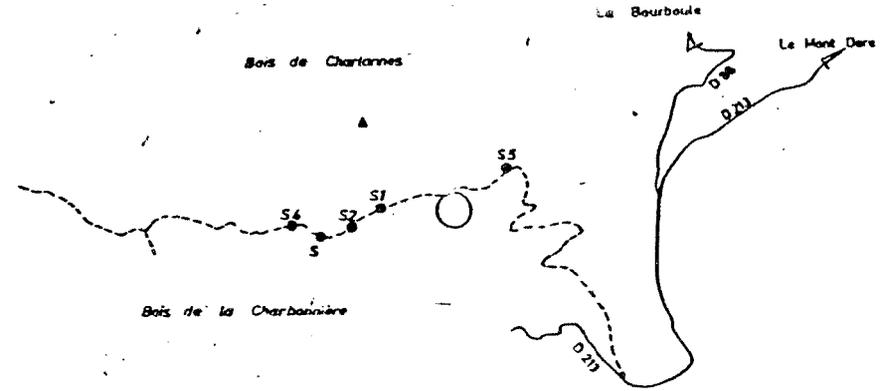






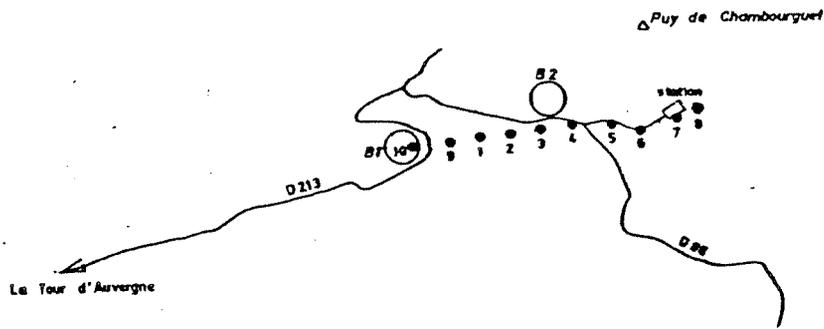


Col de la Croix St-Robert



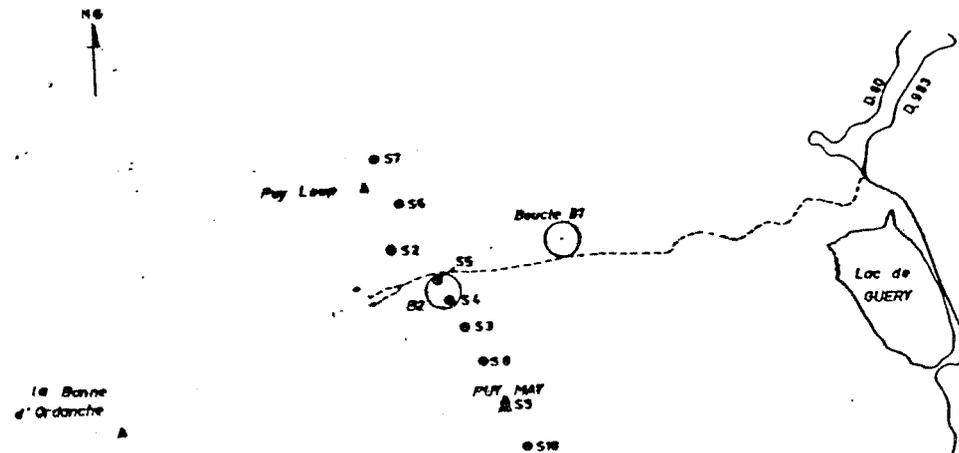
Bois de la Charbonnière
Position des sondages MELOS

d'après cartes IGN 1/25 000



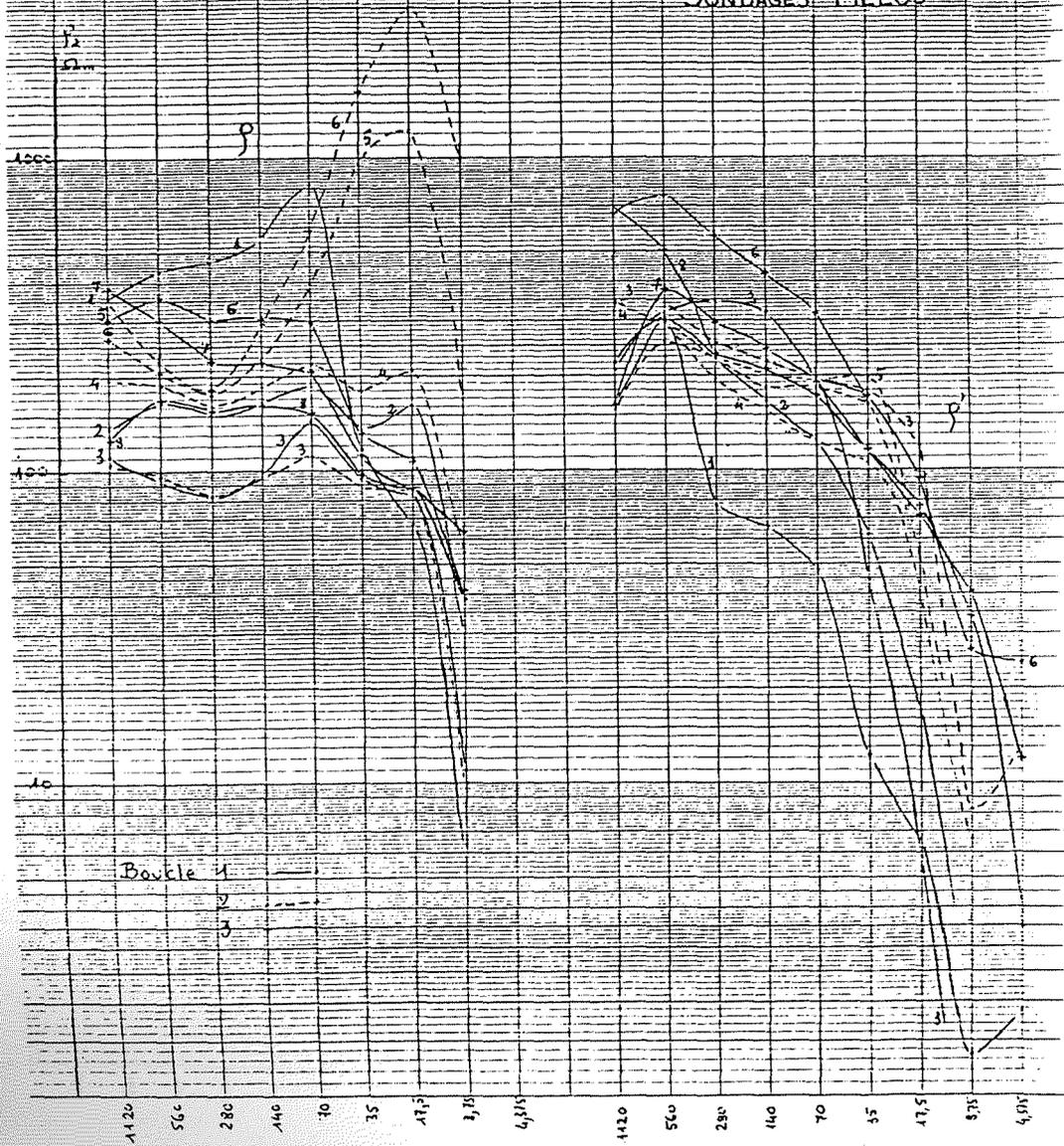
La Tour d'Auvergne
Position des sondages MELOS

d'après carte IGN 1/25 000

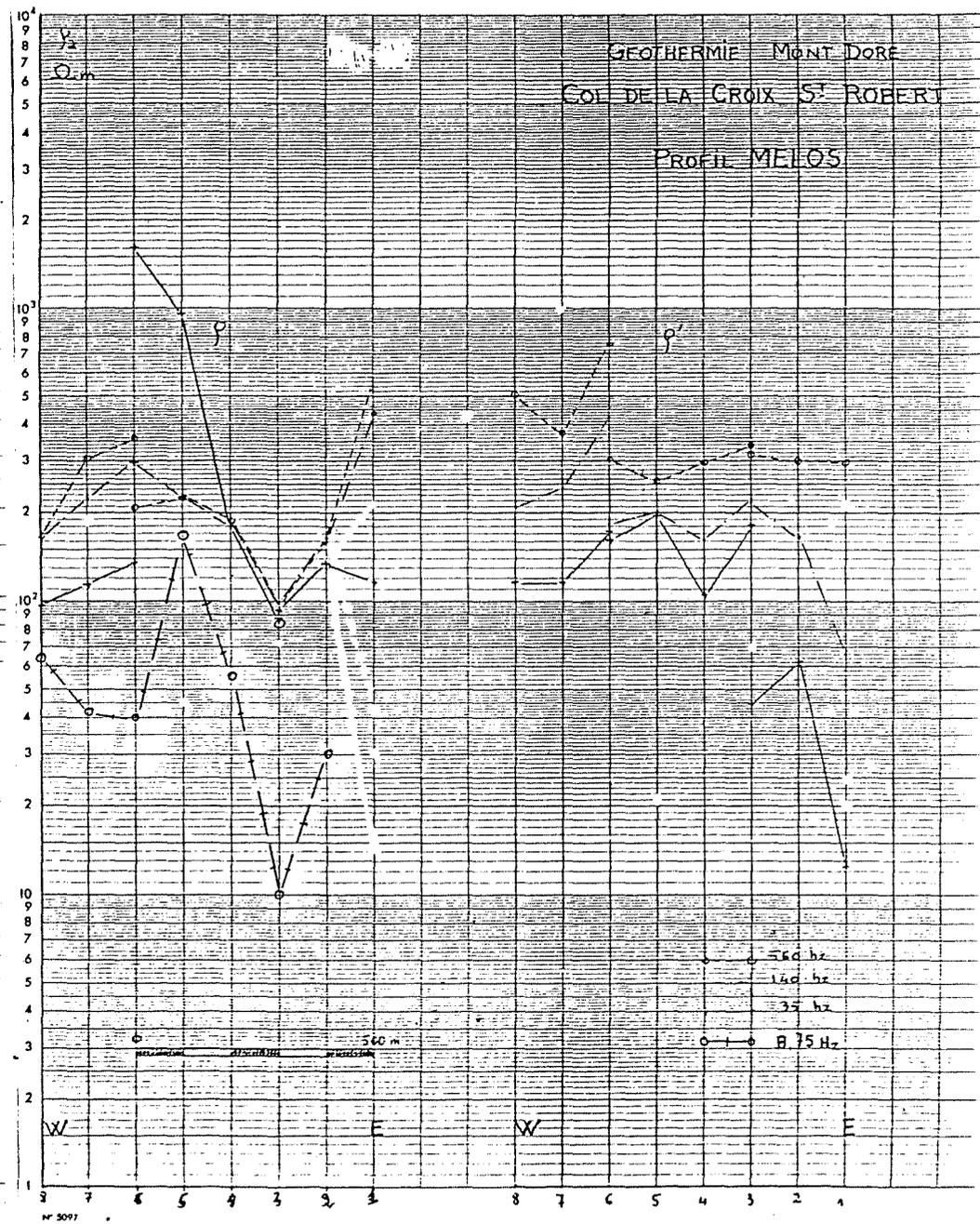


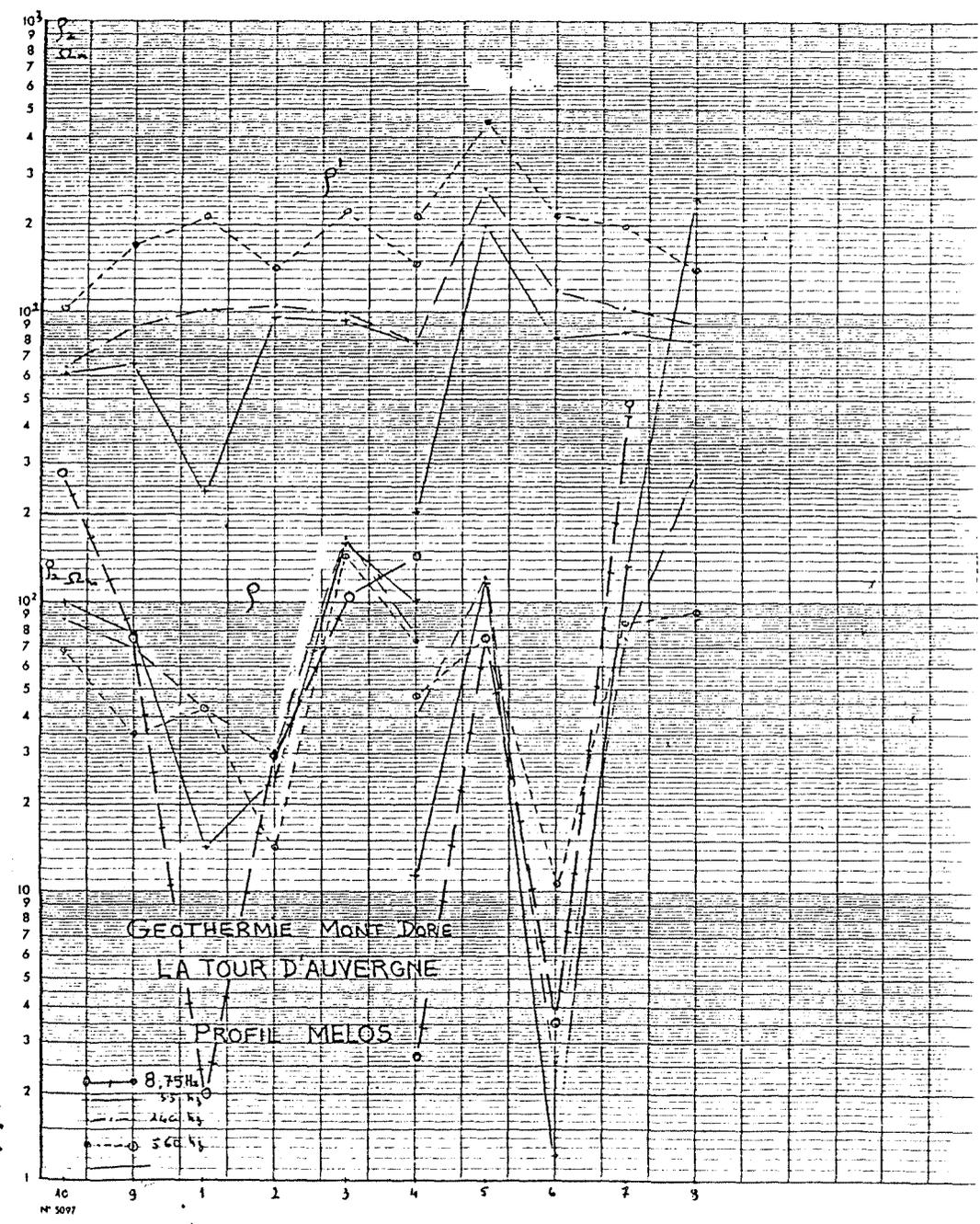
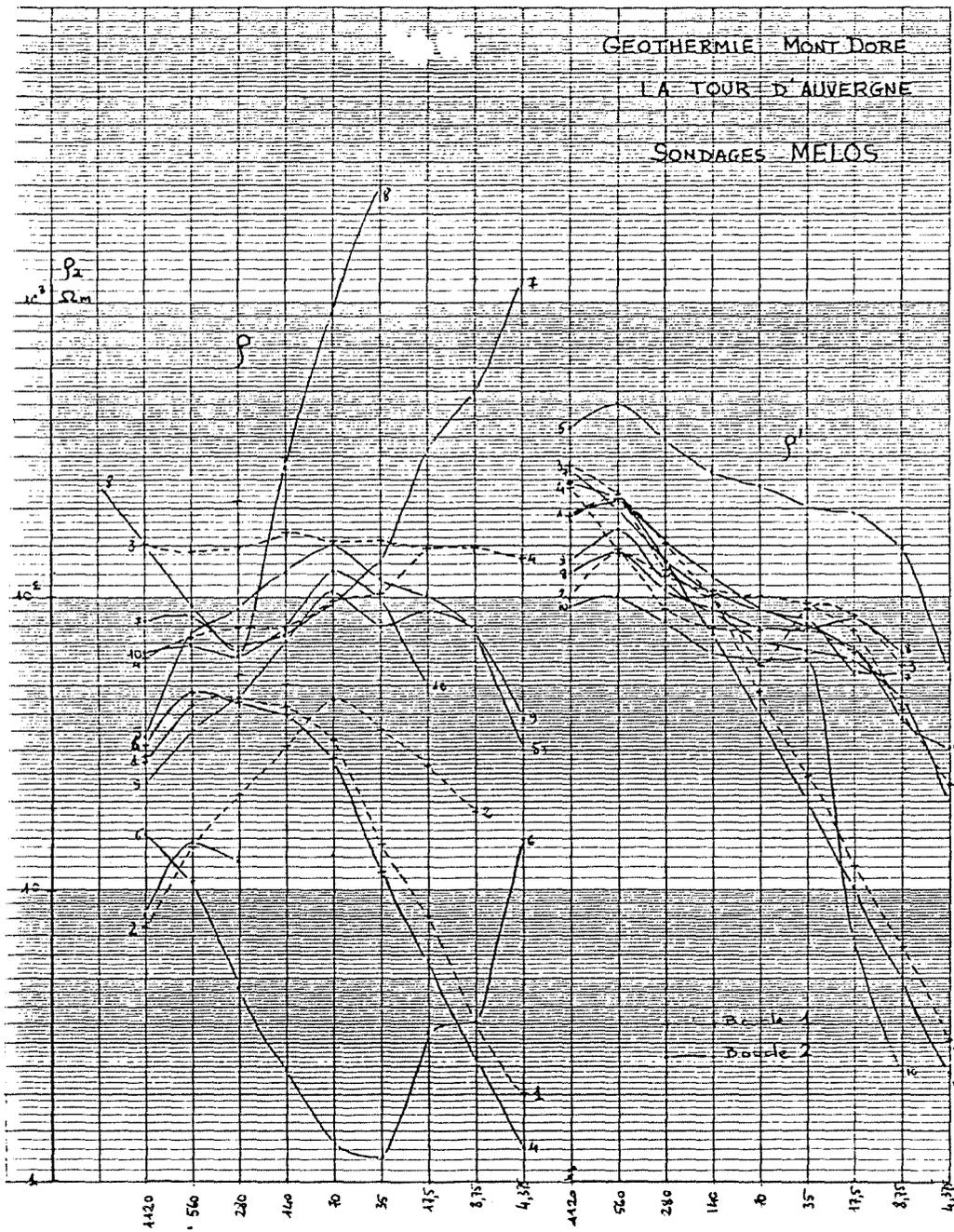
Le Puy May - Position des sondages MELOS

GÉOTHERMIE MONT DORE
 COL DE LA CROIX S^t ROBERT
 SONDAGES MELOS



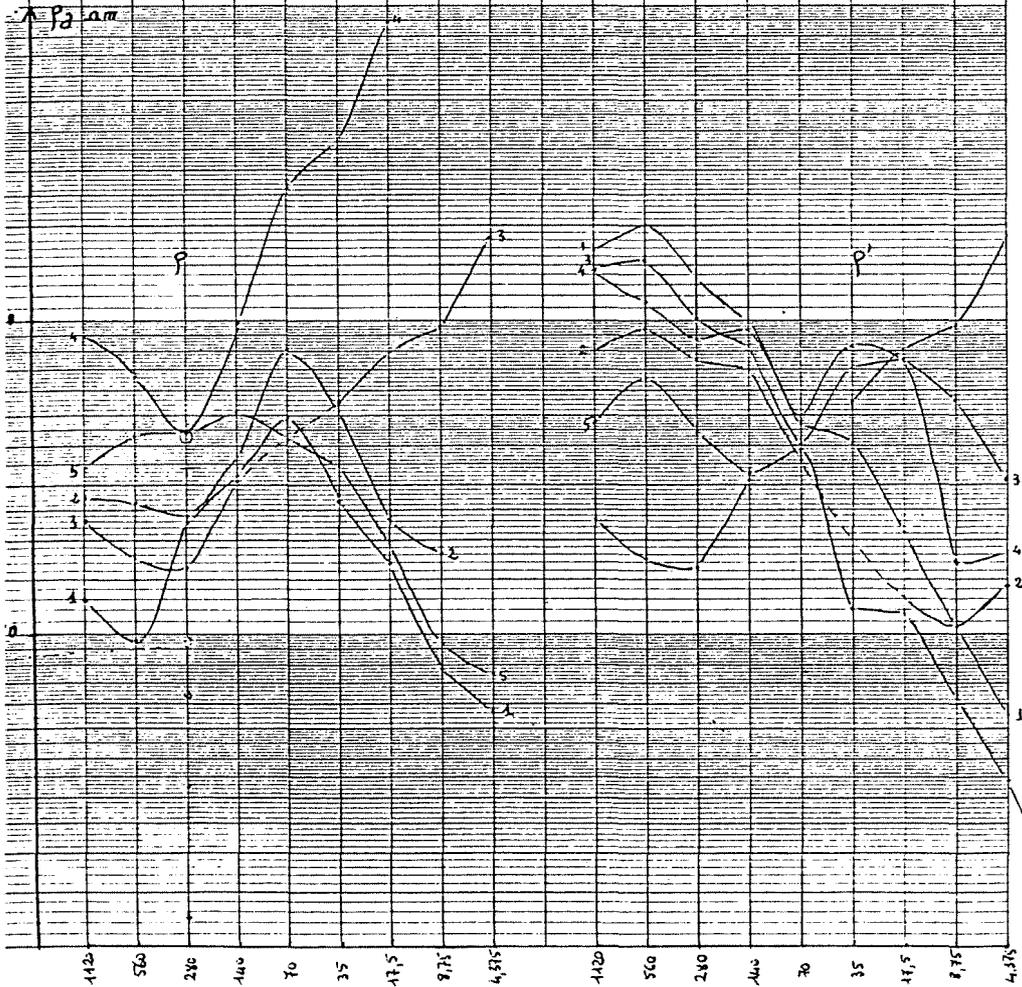
GÉOTHERMIE MONT DORE
 COL DE LA CROIX S^t ROBERT
 PROFIL MELOS





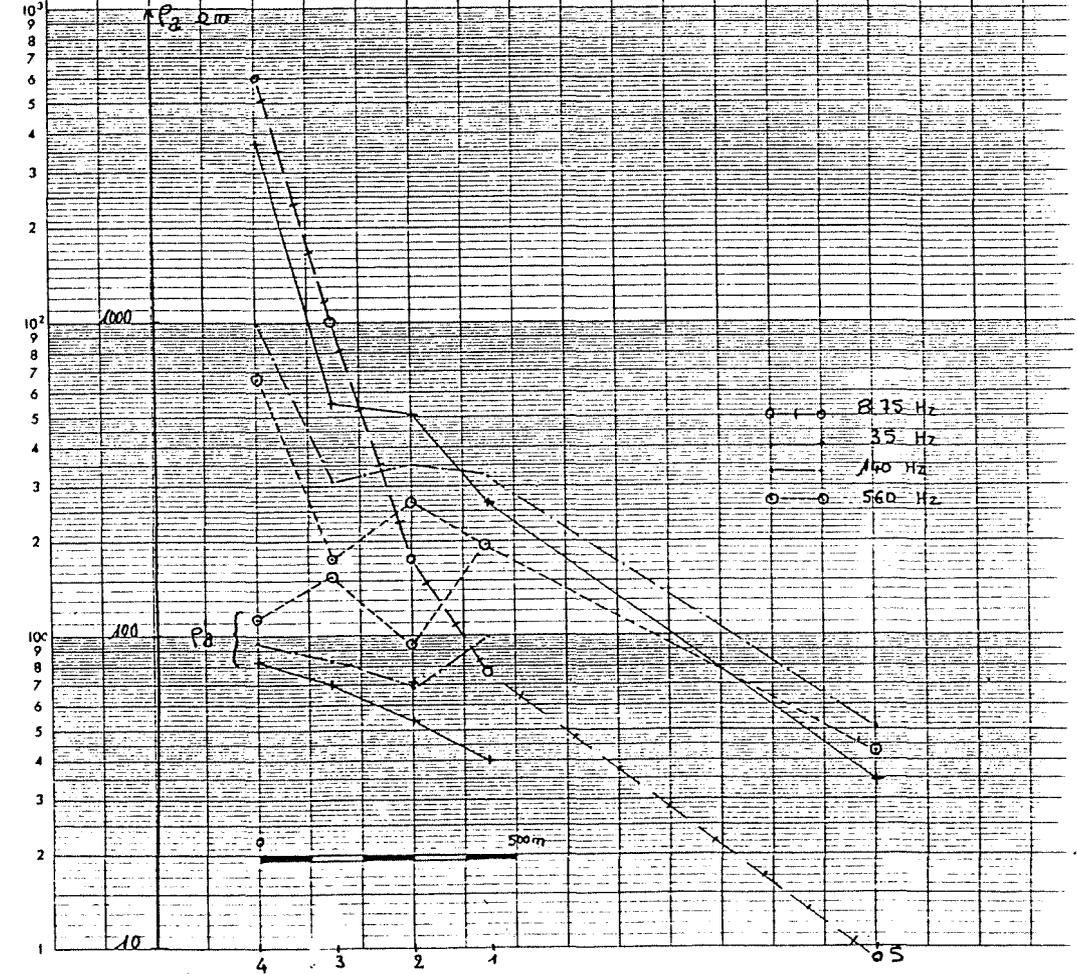
GÉOTHERMIE MONT DORE
LA CHARBONNIERE

SONDAGES MELOS

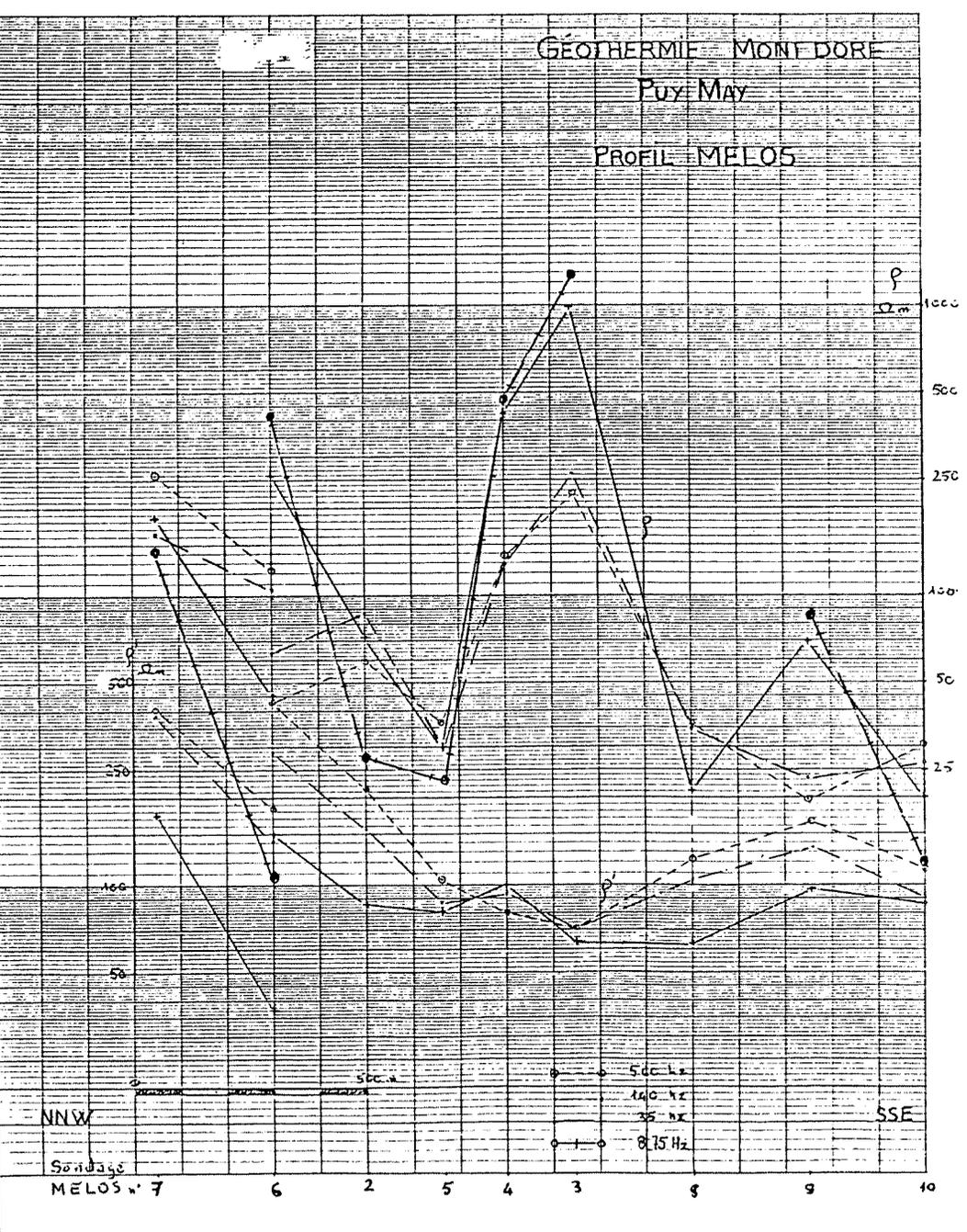
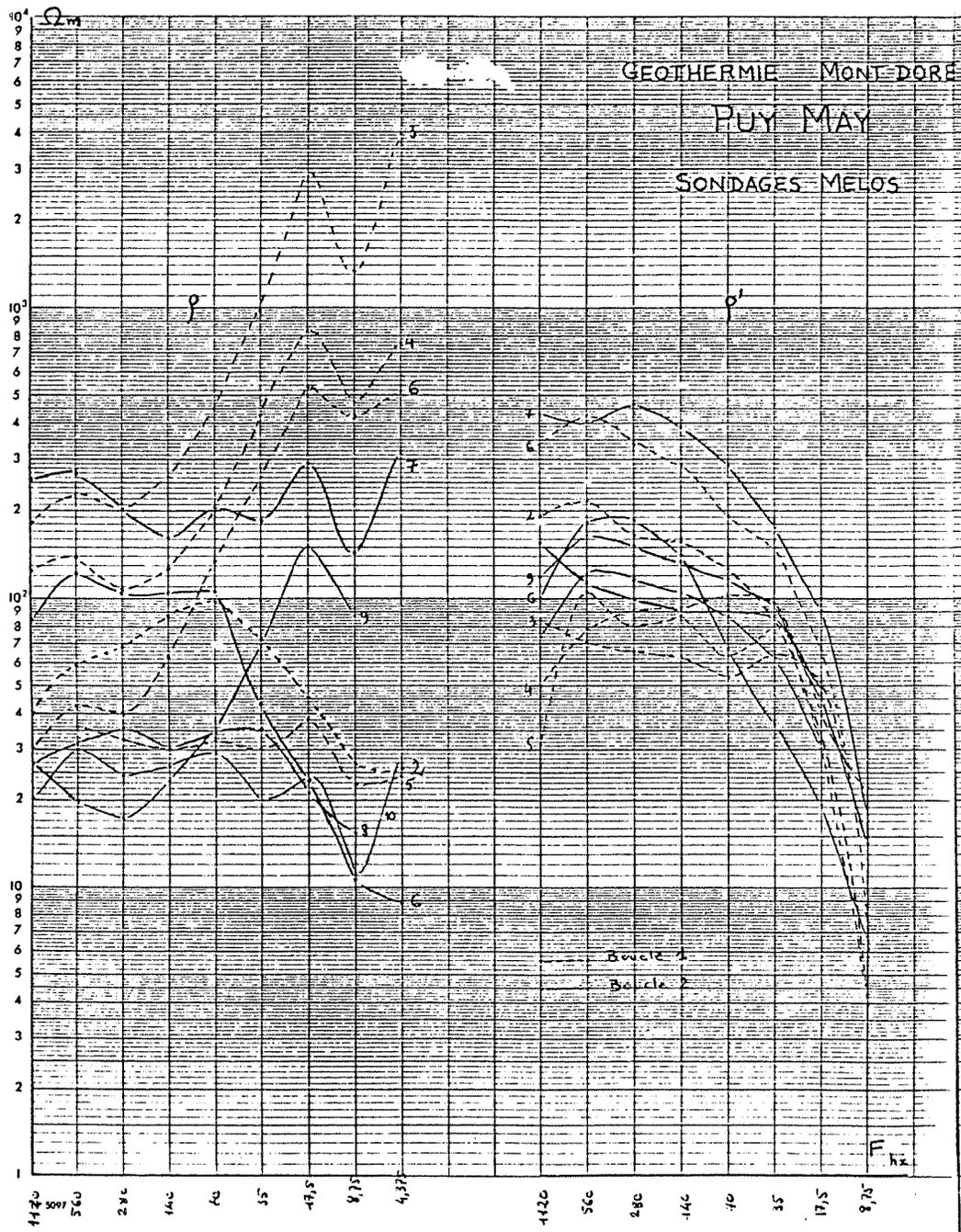


Géothermie Mont Dore
La CHARBONNIERE

PROFIL MELOS



nr. 5097

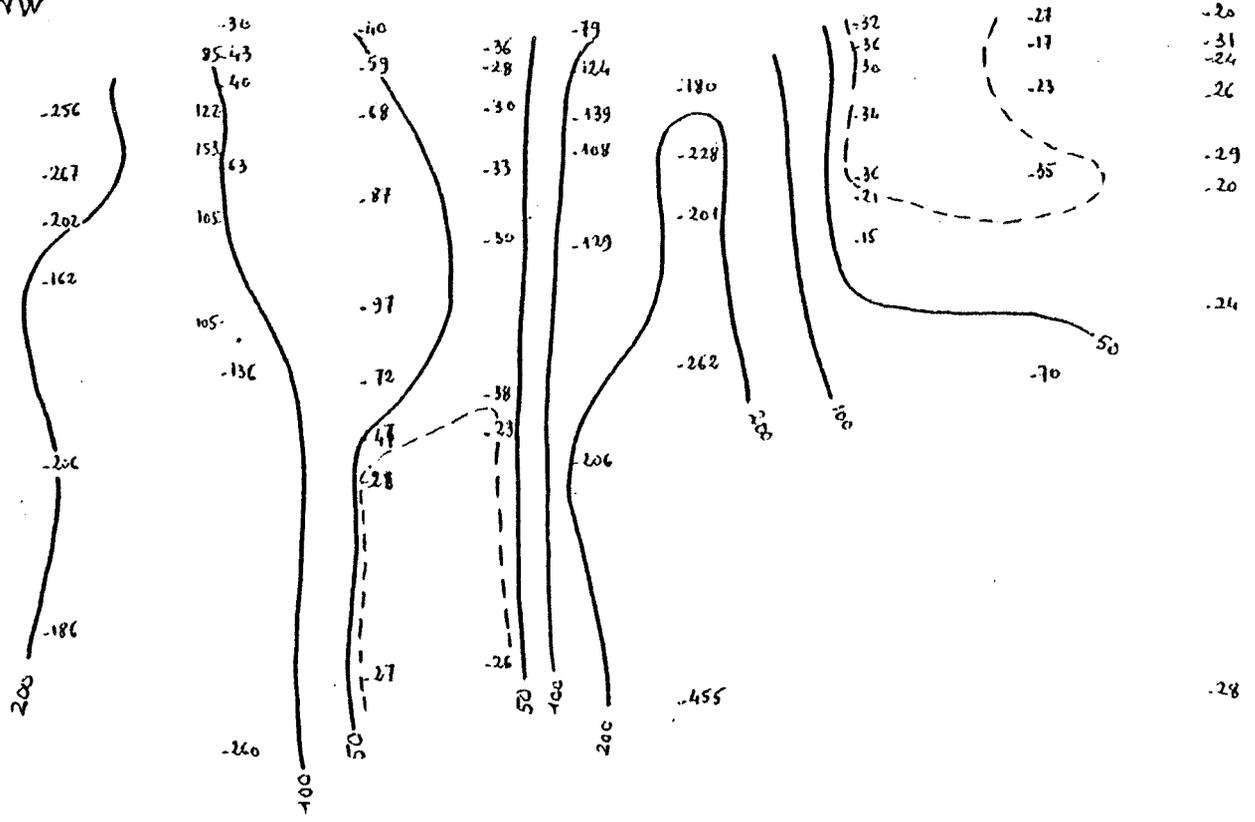


Sondage Melos n°

7 6 2 5 4 3 8 9 10

NNW

SSE



PROFIL : PUY MAY

A N N E X E 4

CAMPAGNE DE POLARISATION SPONTANEE

SUR LA CALDERA DU MONT DORE

(Puy de Dôme)

A. GERARD - P. PUVILLAND

avec la collaboration de Y. BOURRET

CAMPAGNE DE POLARISATION SPONTANEE

sur la CALDERA du MONT DORE

(Puy de Dôme)

par

A. GERARD - P. PUVILLAND

avec la collaboration de Y. BOURRET

79 GPH 060

Nov 79

Confidentiel

RESUME

A la demande du département Géothermie, nous avons effectué une campagne de Polarisation Spontanée sur la Caldera du Mont Dore (Puy de Dôme) afin de tester cette méthode dans le cadre de la recherche d'un site géothermique.

Ce travail fait suite à une série de missions géophysiques (gravi, mag, magnéto-tellurique hautes et basses fréquences, sismique et écoute sismique) qui ont abouti à la détermination d'une zone favorable.

- Les contours de la Caldéra sont marqués par de très fortes anomalies P.S., positives et négatives (de - 600 à + 700 mV).

- Le centre marque en négatif (de - 50 à - 120 mV).

- La seule anomalie positive au sein de la Caldéra se situe sur la zone favorable, ce qui donne à la méthode un intérêt particulier dans le cadre de la prospection géophysique appliquée à la géothermie.

Ce rapport contient : 6 pages de texte

5 pl. dans le texte

SOMMAIRE

	Page
<u>RESUME</u>	
<u>INTRODUCTION</u>	1
I - <u>MOYENS</u>	1
I - 1. <u>Matériel</u>	1
I - 2. <u>Personnel</u>	2
I - 3. <u>Rendement</u>	2
II - <u>METHODE</u>	2
II - 1. <u>Mise au point de la méthode</u>	1
II - 2. <u>Qualité des mesures</u>	3
III - <u>CARTOGRAPHIE</u>	4
IV - <u>INTERPRETATION</u>	4
IV - 1. <u>Les limites de la Caldéra</u>	4
IV - 2. <u>L'intérieur de la Caldéra</u>	5
IV - 3. <u>L'anomalie de la "Barguera"</u>	5
<u>CONCLUSION</u>	6

INTRODUCTION

Une campagne de Polarisation Spontanée a été effectuée du 3.9 au 13.10.79, à la demande du département géothermie, sur la Caldéra du Mont-Dore, dans le but de tester la méthode sur une zone pouvant présenter un intérêt géothermique.

Cette campagne vient à la suite d'une série d'autres prospections géophysiques (gravi, mag, magneto-tellurique hautes et basses fréquences, sismique et écoute sismique) qui ont permis de délimiter la Caldera ainsi qu'une zone favorable en son sein.

Robert F. Corwin et Donald B. Hoover (1978) font état d'anomalies P.S., relevées sur des champs géothermiques connus, pouvant aller de 50 mV à plus de 2 V et d'extension comprise entre 100 m et 10 km. Ces anomalies seraient liées à un couple thermo-électrique.

I - MOYENS

Cette méthode, nécessitant des moyens réduits en personnel et en matériel, a l'avantage d'être d'un coût réduit pour un rendement important.

I - 1. Matériel

Nous avons utilisé principalement :

- un P.S.-mètre B.R.G.M. ;
- des électrodes type Garchy au Plomb-Chlorure de Plomb.

Elles sont sèches, de dérive très faible (< 1 mV/h) et très peu sensibles aux variations de température ;

- un volt-mètre enregistreur pour les stations de référence.

I - 2. Personnel

- 1 ingénieur ;
- 1 stagiaire ;
- 4 manoeuvres.

I - 3. Rendement

Nous avons effectué 2000 mesures en 25 jours, soit 80 mesures par jour, représentant 4 km de profil.

II - METHODE

II - 1. Mise au point de la méthode

Nous avons consacré la première semaine à la mise au point de la méthode.

Notre premier soin a été d'enregistrer les variations du champ tellurique sur deux composantes perpendiculaires entre deux électrodes espacées de 500 m. Devant l'absence totale de variation, nous avons décidé d'abandonner l'enregistrement continu (monopolisant 1 véhicule et une personne) pour nous contenter d'un enregistrement sur une seule composante, un jour sur trois ou quatre. Le temps a été splendide tout au long de la mission (à part 2 ou 3 jours) et nous n'avons jamais relevé de variations supérieures à 5 mV.

Nous avons fait des essais comparatifs entre la méthode dite du "saute-mouton" qui consiste à progresser par déplacement d'un dispositif de longueur fixe (une électrode servant de référence pour deux mesures) et la méthode "grande ligne" qui consiste à s'éloigner par sauts constants d'une électrode de référence fixe. Dans ce genre de méthode, la source d'erreur la plus importante est liée aux déplacements de l'électrode de référence. Dans le cas du "saute-mouton", ce déplacement a lieu toutes les

D. R. G. M.

BORDEREAU DE DONNEES P.S.

ND : numéro de Base
 NP : numéro de Profil
 NI : numéro de Mesure
 H : heure T.U.
 M : minutes
 ΔVD : mesure brute (en 10⁻¹ mV)
 CIE : correction embrayage
 C2P : correction polarisation
 C3B : correction base référence
 C4B : correction dérive
 ΔVF : valeur corrigée
 G : géologie d'après carte

Convention :
 1 : 6 :
 2 : 7 :
 3 : 8 :
 4 : 9 :
 5 : 10 :

PE : pédologie
 P 1 : meuble E 0 : décaortique
 2 : caillou- 1 : sec
 teux 2 : humide
 3 : dur 3 : mouillé
 4 : marécageux

PL : pluie
 0 : soleil 4 : pluie forte
 1 : nuageux 5 : orageux sec
 2 : couvert 6 : orage
 3 : pluie fine 7 :

V : vent
 0 : calme plat 2 : moyen
 1 : briso 3 : fort

T : température
 0 : < 0° C 2 : de 10 à 20°
 1 : de 0 à 10° C 3 : > 20°

PER : perturbations industrielles
 PE : (deux chiffres)
 0 : nul 5 : usine
 1 : route 6 : habitation
 2 : canalisation 7 : terrain
 3 : ligne H.T. aménagé
 4 : ligne S.H.C.F. 0 : cours d'eau
 proche
 9 : câbles électriques

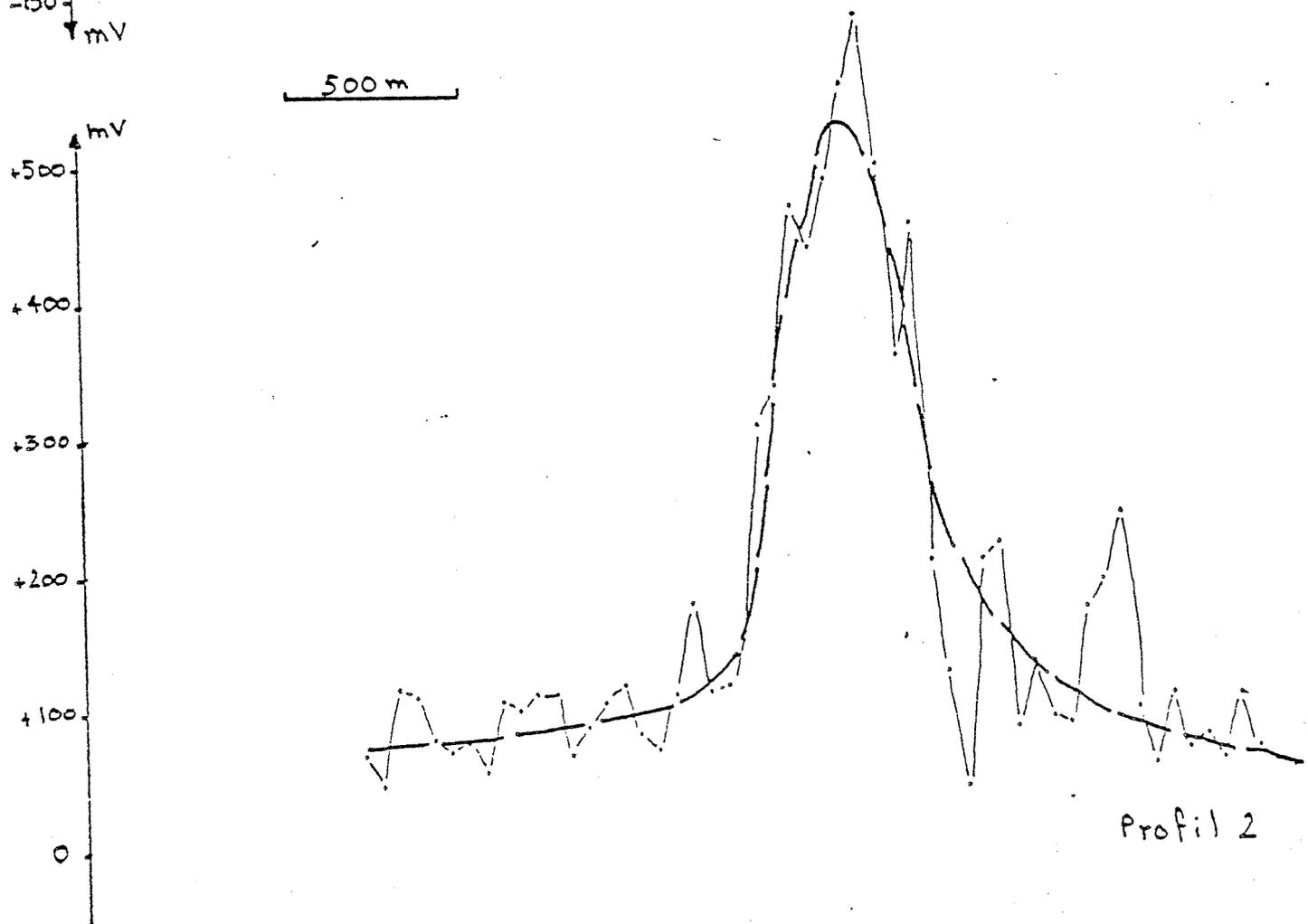
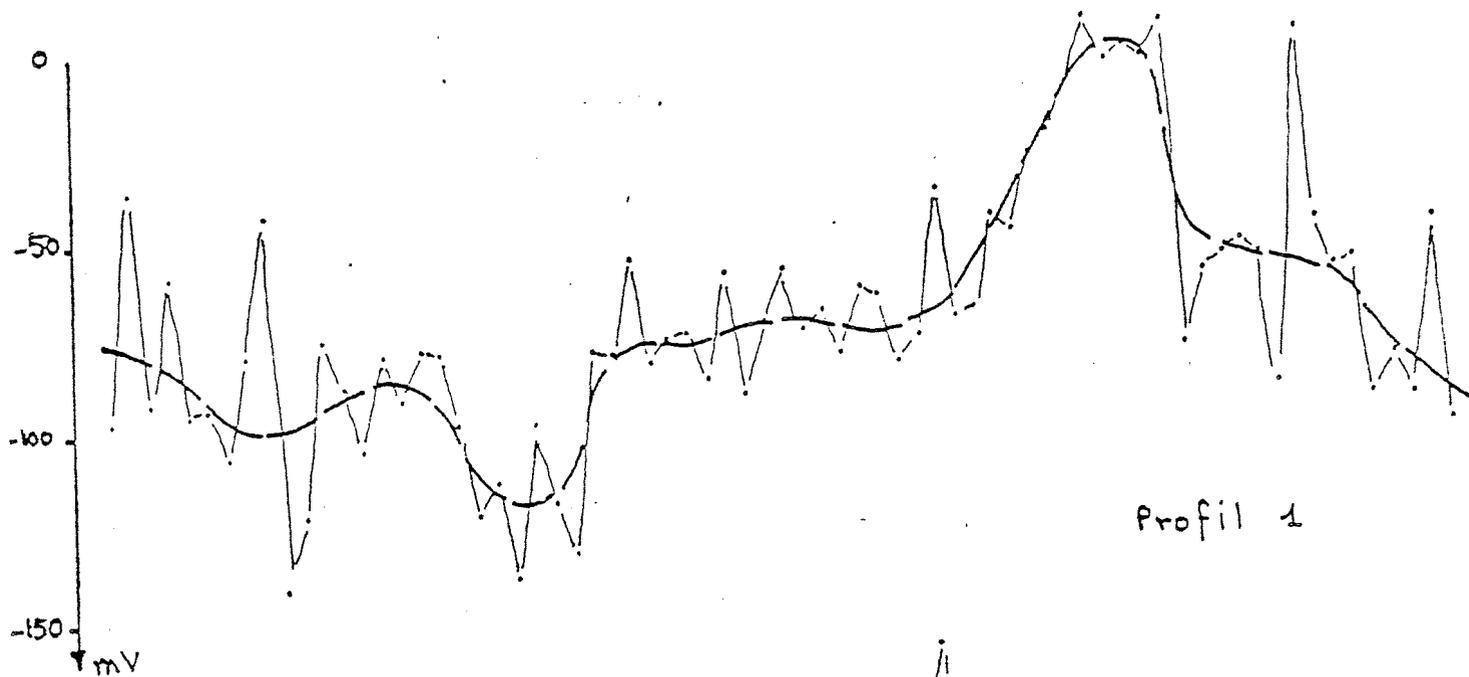
R : indice d'appréciation des perturbations
 0 : négligeable 2 : moyenne
 1 : douteuse 3 : évidente

VE : végétation
 1 : friche 1 : éparses
 2 : culture 2 : clairsemées
 1 : récolte faite
 2 : récolte à faire
 3 : forêt 1 : résineux
 2 : feuillus
 3 : mélangés
 4 : prairie 1 : pâturage
 2 : pré à faucher

1	CHANTIER					OPERATEUR							page de				DATE						
	NB	NP	NM	H	M	ΔVB	CIE	C2P	C3B	C4B	ΔVF	G	PE	PL	V	T	PER	VE	ΔVT1	ΔVT2	ΔL	A	
1																							
2																							
3																							
4																							
5																							
6																							
7																							
8																							
9																							
10																							
11																							
12																							
13																							
14																							
15																							
16																							
17																							
18																							
19																							
20																							
21																							
22																							
23																							
24																							
25																							
26																							
27																							
28																							
29																							
30																							

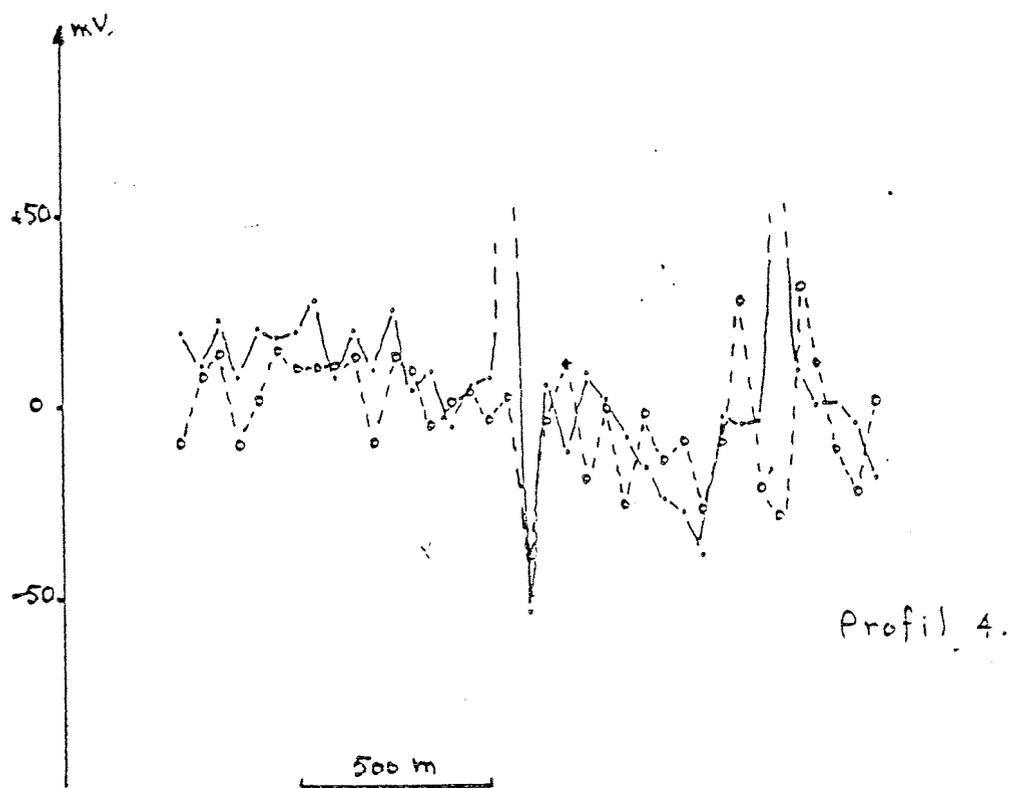
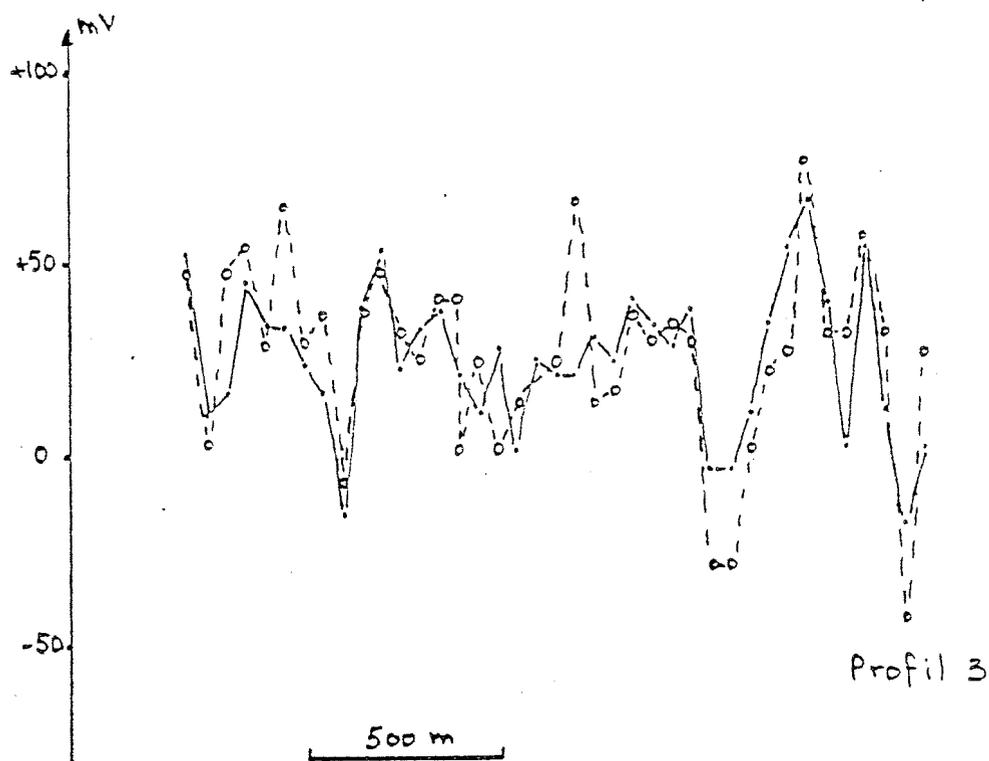
ΔVT1 : variation tension base NS
 ΔVT2 : variation tension base EW
 ΔL : distance base-électrode
 A : azimuth base-électrode

Planche.2



Répétitivité des mesures

Planche 3



deux mesures. Les erreurs s'accumulent donc, sans possibilité de les éliminer. Nous avons pu constater une très grande dispersion des mesures effectuées en "saute mouton" par rapport à celles relevées par la méthode "grande ligne".

Nous avons donc opté pour la méthode "grande ligne" avec des lignes de 1000 m, une mesure tous les 50 m et un recouvrement de 3 mesures à chaque déplacement de l'électrode de référence.

La planche 1 présente une feuille de mesure informatisée sur laquelle sont reportées, après codage, la plupart des perturbations possibles.

II - 2. Qualité des mesures

La méthode P.S. est généralement utilisée sur des zones d'extension très réduite et présentant de ce fait une topographie très calme. Ce n'est plus du tout le cas pour notre zone de 10 km de diamètre et dont les altitudes varient entre 900 et 1700 m.

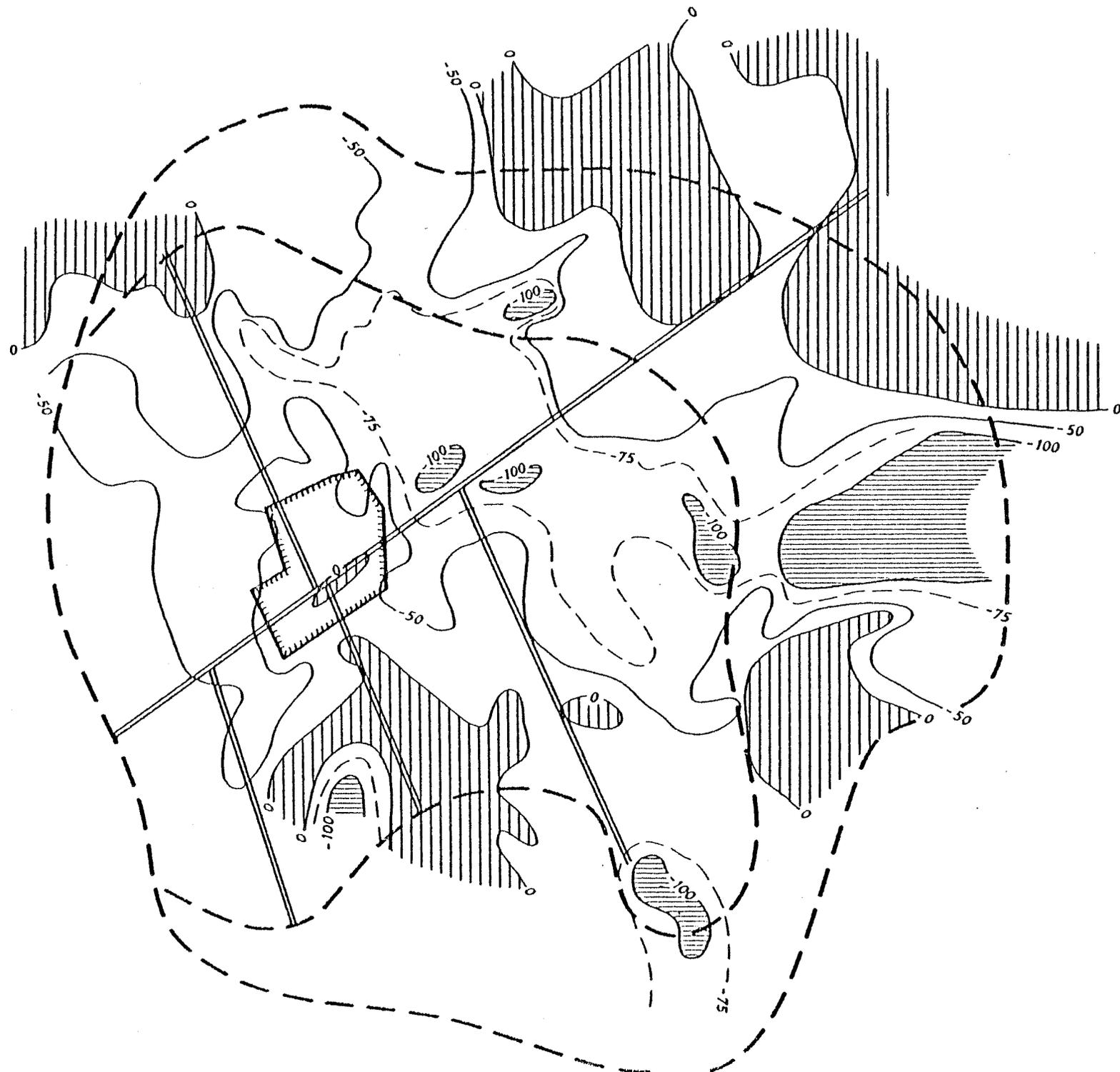
La planche 2 présente les valeurs de P.S. le long des deux profils 1 et 2. On remarque que les mesures sont assez perturbées. Le bruit de fond est de l'ordre de ± 15 mV en moyenne, dépassant localement largement ces valeurs.

Ce bruit assez fort rend nécessaire un lissage puissant. Il est important de noter que plus les mesures seront serrées (50 m) plus le lissage effectué aura des chances de rendre compte au mieux de la réalité physique.

La planche 3 donne une idée de la répétitivité des mesures. Bien que point à point, cette répétitivité ne soit pas toujours assurée, on peut tout de même noter la très bonne similitude entre les courbes lissées.

planche 4

POLARISATION
SPONTANEE

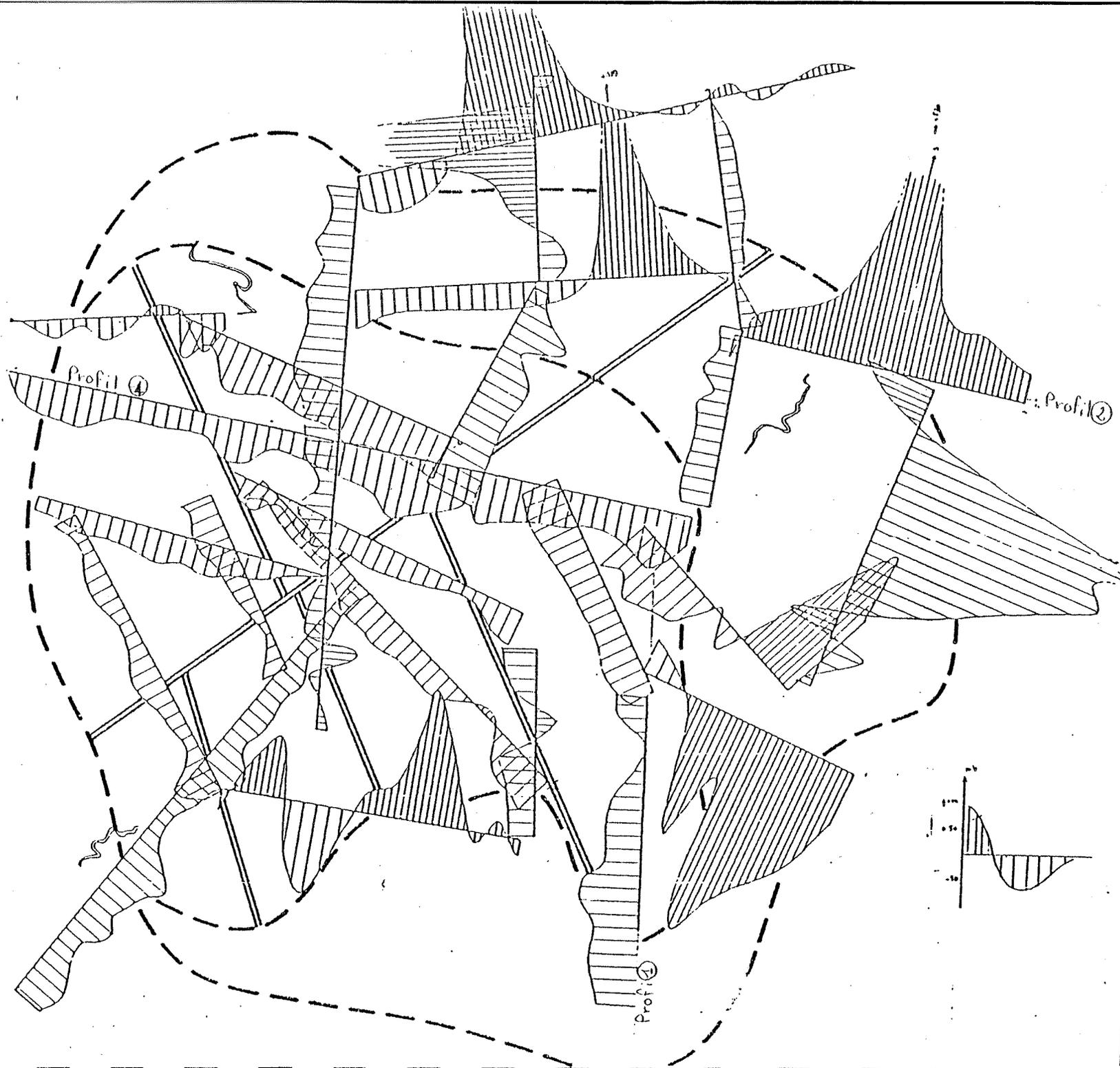


-  Limites de la caldera
-  Failles internes probables
-  Zone sélectionnée pour forages

Planche 5

POLARISATION
SPONTANEE

PROFILS
RABATTUS



0 1 km

III - CARTOGRAPHIE

Les valeurs mesurées sont tout d'abord corrigées de la polarisation entre électrodes, puis les différentes lignes de 1000 m sont raccordées, grâce au recouvrement de 3 mesures, au sein d'un même profil. Plusieurs profils forment une boucle que l'on pondère, ligne par ligne si besoin est.

La carte des anomalies P.S. est obtenue à partir de la digitalisation des courbes lissées, avec un pas de 250 m.

De cette façon, seules les anomalies ayant une longueur d'onde supérieure à 500 m subsisteront et auront des chances d'être recoupées par 2 profils.

La planche 4 représente la carte des isovaleurs P.S., tracée avec un espacement logarithmique.

La planche 5 présente les mêmes valeurs tracées en profils rabattus. Elle permet, compte-tenu de la répartition irrégulière des points de mesure, une analyse plus objective de la carte.

IV - INTERPRETATION

On remarque sur la carte des anomalies P.S. trois zones très distinctes.

IV - 1. Les limites de la Caldéra

L'auréole d'anomalies fortement positives ou négatives (comprises entre - 600 et + 700 mV) marquent bien les limites gravi extérieures de la Caldéra dans sa partie Nord et Est. Au Sud, les anomalies intenses marquent la limite gravi intérieure. L'absence de mesures plus au Sud ne permet pas de se prononcer sur la limite extérieure. Le flanc Ouest ne présente pas d'anomalies marquées.

Ces fortes anomalies bipolaires pourraient être dûes à des infiltrations d'eau très importantes le long de failles connues.

IV - 2. L'intérieur de la Caldéra

Il marque en négatif avec des valeurs comprises entre - 50 et - 120 mV. Le minimum s'aligne sur la vallée de la Dordogne et semblerait être en relation avec la forte anomalie négative du flanc Est de la Caldéra, l'ensemble formant d'ailleurs un axe de symétrie remarquable de cette carte.

Cette plage négative pourrait être due à l'électro-filtration au sein d'un milieu relativement homogène que constituent les ponces remplissant la Caldéra.

IV - 3. L'anomalie de la "Barguera"

La seule anomalie positive et son extension ($> - 50$ mV) au sein de la Caldéra est celle située sur "la Barguera". Elle coïncide de façon remarquable avec la remontée importante d'un très fort conducteur, mise en évidence par les méthodes de magnéto-tellurique. Le top de cette anomalie s'aligne le long d'une faille connue.

On pourrait attribuer la polarité de cette anomalie à la remontée des eaux le long de ce conducteur.

CONCLUSION

Malgré un bruit de fond souvent important, la carte des anomalies P.S., issue des valeurs lissées est suffisamment homogène pour être crédible et apporter des éléments intéressants à la reconnaissance géologique de cette zone.

Elle appuie de façon remarquable l'interprétation issue des autres méthodes géophysiques. Son pôle d'intérêt demeure l'anomalie de "la Barguera" qui, même si elle n'est pas directement liée à des phénomènes électrothermiques, tend à montrer que la circulation des eaux à cet endroit est régie par un système différent.