

Forage scientifique de Sancerre-Couy : interprétations et modélisations magnétiques

Raymond MILLON ⁽¹⁾

Mots-clés : Anomalie magnétique, Interprétation, Modèle.
Cher département (Sondage GPF Sancerre-Couy), Bassin parisien.

De nombreuses interprétations et réinterprétations du magnétisme ont été faites, ou à la suite de nouveaux levés magnétiques ou à la faveur des premiers résultats du forage de Sancerre-Couy. Ces interprétations ont été parfois couplées avec la gravimétrie, voire avec la sismique-réflexion.

Dans un rapport interne BRGM inédit, R. Millon (1988) avait retracé l'historique de ces interprétations en séparant celles qui avaient été faites avant et après l'implantation du forage. Nous ferons ici une distinction supplémentaire entre les études globales (ensemble de l'AMBP) et locales (région de Sancerre-Couy).

Les interprétations depuis l'origine jusqu'à l'implantation du forage (juin 1986)

La découverte, les mesures au sol et les premières interprétations

C'est T. Moureaux qui découvre cette anomalie il y a près d'un siècle (1885) et en précise les formes par des mesures relativement serrées de la *composante verticale* (1896 et 1904). Ces mesures sont reprises et complétées par Eble et Brazier en 1924, puis par J.-P. Rothe de 1930 à 1935 (fig. 1), qui émet l'hypothèse de

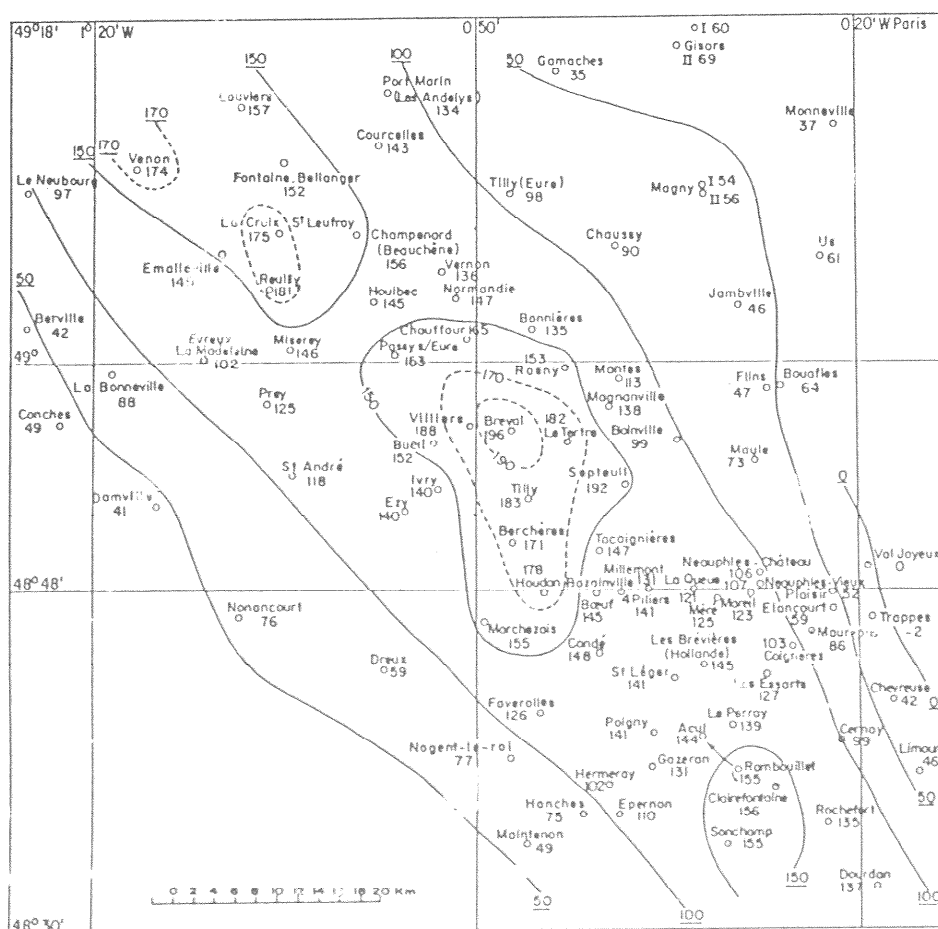


Fig. 1. - Emplacement des stations du réseau 1935 et anomalies en gammas de la composante verticale (lire Houdan, 170, Nonancourt, 60) (d'après J. Rothé, 1937).

(1) BRGM, SGN/Département Géophysique, Orléans.

variations d'amplitude sur certaines parties de l'AMBP (noyaux de variation).

C'est ce dernier qui fait la première ébauche d'interprétation en 1937 et qui trouve une profondeur de l'ordre de 5 km pour le toit de la structure dans la région parisienne.

Il faut attendre encore 27 ans pour qu'une autre interprétation soit réalisée (D. Tournier (fig. 2) - 1964) : en utilisant des abaques pour filons épais infinis vers le bas (champ et dérivée seconde), il trouve des profondeurs de 5 à 6 km pour le toit dans la moitié sud de l'anomalie et une susceptibilité magnétique de l'ordre de $1,5 \cdot 10^{-3}$ uem CGS ($2 \cdot 10^{-2}$ uSI).

Les levés aéroportés

Les années 1960 voient se développer des levés aéroportés qui permettent une meilleure visualisation de l'AMBP (tabl. 1).

Date	Client	Altitude barométrique	Ligne de vol		Traverses		Référence
			Espac.	Orient.	Espac.	Orient	
1964	C.N.R.S.	3 km	10 km	N-S	100 km	EW	Fig.3
1965	CEP-SNEA	520 m	3 km	ENE-WSW	5 km	WNW-ESE	Fig. 4-2
1965	C.N.R.S.	610 m	2 km	EW	5 km	NS	Fig. 4-3
1966	ERAP	1 500 m	3 km		5 km		Fig. 4-1
1972	C.N.R.S.- INAG	1 200 m	2 km	EW	10 km	NS	Fig. 4-4

Tabl. 1.

Tous ces levés ont été réalisés par CGG avec un magnétomètre CSF à vapeur de Cs (pompage optique).

Le levé général de la France 1964, avec des lignes de vol très espacées (10 km) et orientées N-S, était peu propice à une bonne définition de l'anomalie, surtout dans sa partie sud (où sa direction est subméridienne - fig. 3 ci-après et figure 2 du chapitre « Introduction ») ; les levés détaillés qui ont suivi, avec des lignes de vol perpendiculaires à l'anomalie (fig. 4), ont permis d'en obtenir une meilleure image (fig. 5).

Les interprétations jusqu'en 1986

Le tableau chronologique (tabl. 2) montre l'évolution des méthodes d'interprétation et les différents résultats obtenus par de nombreux géophysiciens jusqu'en 1986 sur la moitié sud de l'AMBP.

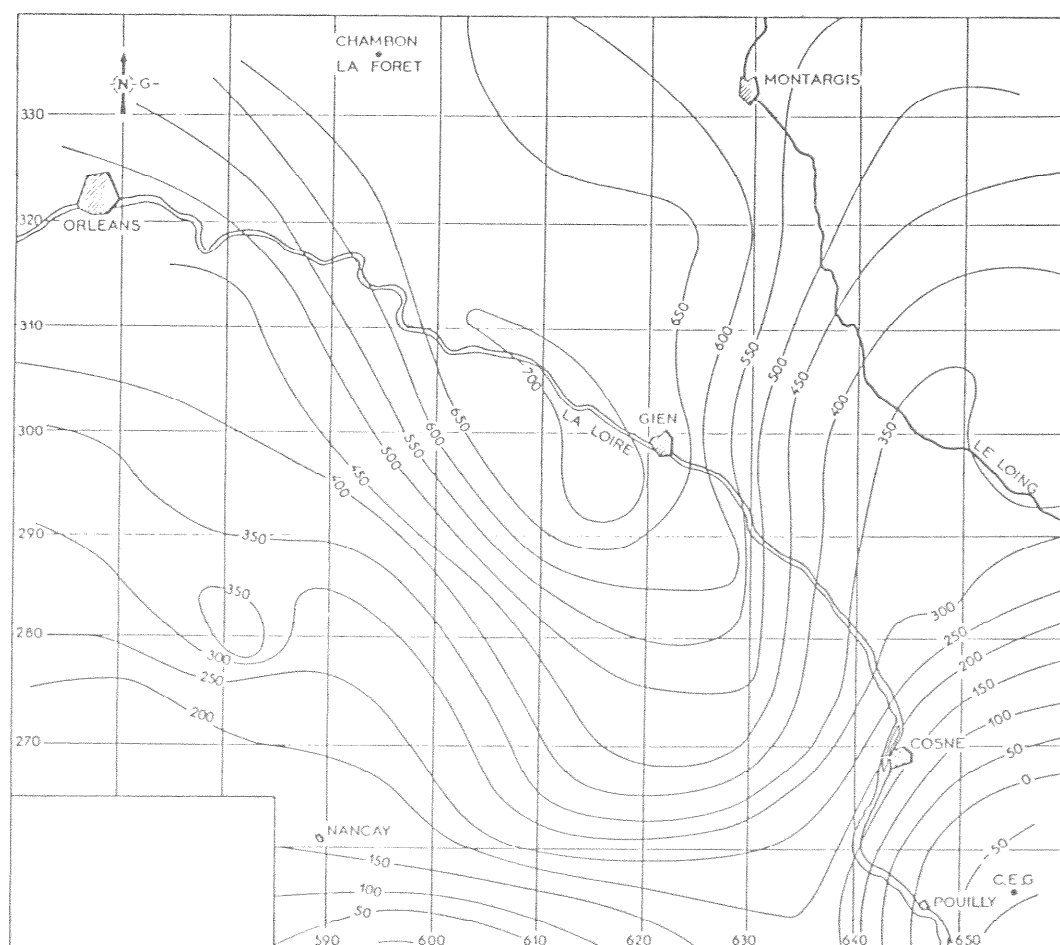


Fig. 2. - Isanomales de la composante verticale Z (D. Tournier, 1964).

Tableau. 2. - Évolutions des interprétations de l'AMBP au fil des ans — gravimétrie magnétique.

Auteur	Date	Nature des données			Méthode d'interprétation	Zone d'application	Forme	Modèle Limite inférieure	Contraste aimantation magnétique	Contraste suscept. magnétique	Interprétation profondeur du toit sous le plan de vol	Largeur	Contraste de densité	Profondeur du socle
		Z = vert. F = total G = gravi	Altitude baro	Profil ou grille										
J.-P. ROTHE	1937	Z, sol, profil			Rapports caractéristiques de la forme de l'anomalie	Rambouillet	Ellipsoïde		A/m	10 ⁻⁸ SI	5 km			
D. TOURNIER	1964	S, sol, profil			Abaques pour filons épais	De Chambon-la-Forêt à Garchy	Filon épais à toit plat infiniment long	∞		2	6-6,5 km			
		Espacement des stations = 2,4 km			Abaques de dérivée seconde pour filons épais	Gien	Filon épais à toit plat infiniment long	∞		2	4,5-5,5 km			
J. CORPEL	1966	F, acro, profil 600 m			Filon épais Abaques de Parker-Gay	Profil Villequiers-Gargny	Filon épais à toit plat infiniment long	∞		3	6 km	12 km		
C. WEBER	1968	F, acro, profil 600 m			Filon épais Abaques de Parker-Gay	reprend l'interprétation de J. CORPEL (1966)								
J. CORPEL C. WEBER	1968	F, acro, profil 600 m			Calcul en bidimensionnel (2D)	Profil passant près de Coucy	Cylindre hori. ∞ long	∞		2,5	6 km			
							Filon à toit plat ∞	∞						
J. L. F. MOUËL	1969	F, acro, profil interpolé 3 km			Hahn : relief couche aimantée	Gien	profondeur moyenne du relief 10 km	aimantation • minimale		2,5	10 km (7 km de profondeur)			
B. LAMBOLEZ	1970	F, acro, profil 600 m			Abaques, formule du filon	Gien			Résultats peu cohérents		• ~ 7 km			
N. DEBEGLIA	1970	F, acro, carte 600 m			Approximations successives en 2,5 D	Sud de l'AMBP	Prismes verticaux		3,6	10	toit à 6 km par hypothèse	11 km		
						Profil passant près de Coucy	Filons épais limités vers le bas	64 km				~ 6 km		
M. OGIER	1971	F, acro, profil 600 m			Calcul en bidimensionnel (2 D)		Cylindre horiz. ∞ à section trapézoïdale	36 km		non déterminés	~ 7 km	4 km au sommet 80 km à la base		
N. DEBEGLIA	1972	G			Spectral Gradient vertical Modèles équivalents	Sud de l'AMBP	Prisme	8 km					0,13	2 km
						Gien	Empilement de plaques polygonales	25 km					0,19	2,8 km
A. GERARD	1973	F, acro, grille 2 x 2 600 m		ou 2 x 1,6 4 profils	Carte du gradient vertical réduit au pôle	Sud de l'AMBP	Corps magnétique large dont le cœur est lourd	∞	0,5		2 km (remontée par- fois jusqu'à 1,2 km)	Corps aimanté : 20 km Aimanté et pesant : 5 km	0,19	
A. GALDEANO	1984	F, acro, grille 3 km 10 x 1 km			Discontinuités du potentiel magnétique • surface de convergence	Sud de l'AMBP	Non imposée		pas d'hypothèse sur 7 km (4 km de prof.) l'intensité d'aimantation 6 km (3 km de prof.)					
N. DEBEGLIA A. GUILLEN V. MENICHIETTI	1984	F, acro 500 m	grille 1 x 1 2 x 2 km		Programmation linéaire en 2,5 D	Région sud de l'AMBP	Non imposée	20 km		1 à 3	2,5 km à 6 km		0,15	
		G	+ 3 profils		Gradient prolongé de 0,5 km vers le haut									
A. GUILLEN	1985	F, acro 500 m			Programmation linéaire en 3 D	Région sud de l'AMBP	Non imposée	si erreur de 30 nT si erreur de 15 nT	> 2,5	• •	h < 3,5 km si h = 2,5 km			
R. BAYER A. GUILLEN C. WEBER	1987	F, acro 500 m - forage sismique gravimétrie			Inversion stochastique	Région sud de l'AMBP	Non imposée	20 km	0,7 ± 1,4 > 1,5 km		structure dense et aimantée 2,5 - 3,5 km 7 km			
P. MOUGÉ	1991	F, acro 500 - 3 000 m			gradient vertical	Région sud de l'AMBP					3,6 - 5,5 km			

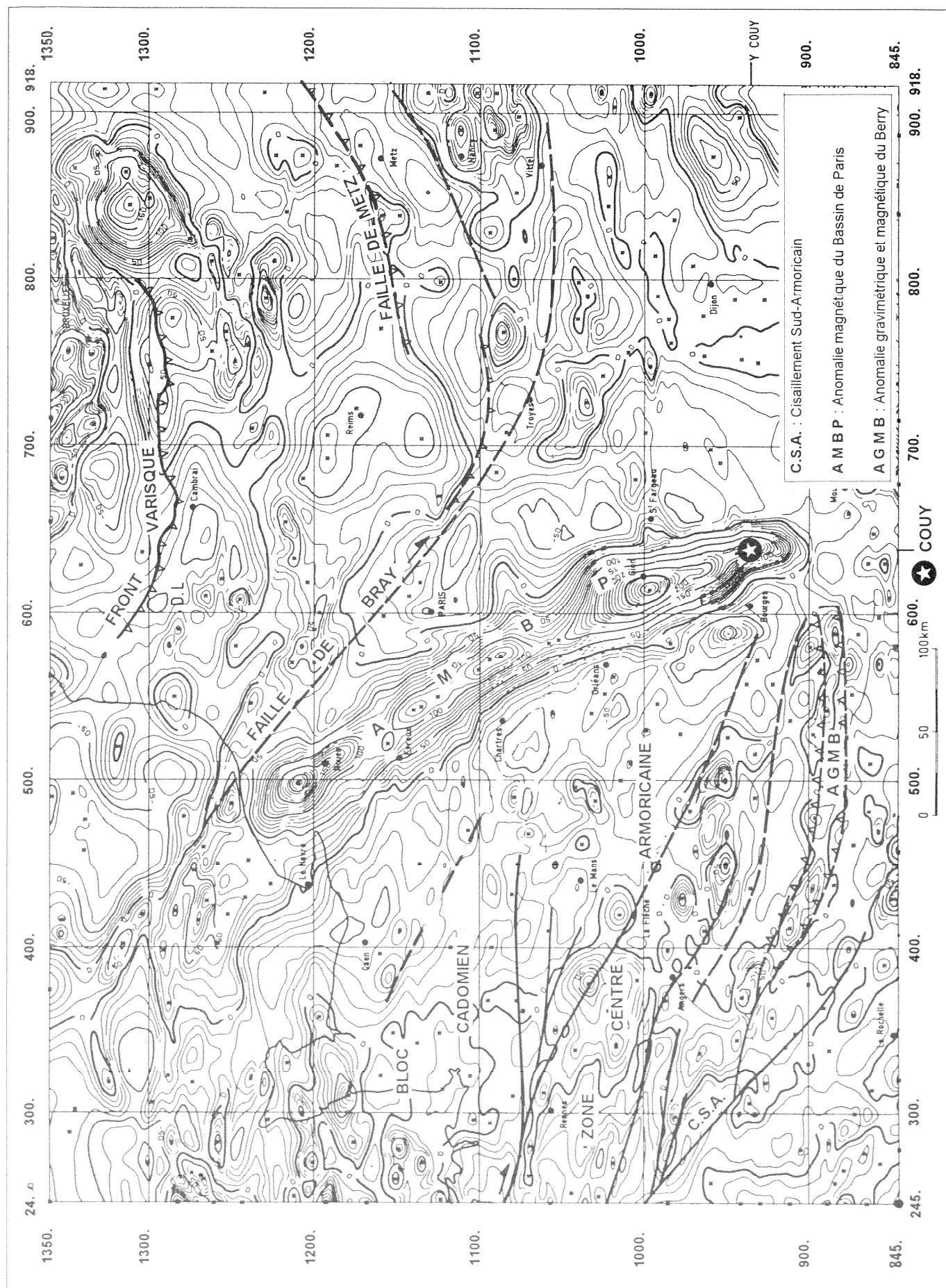


Fig. 3. - Carte des anomalies magnétiques du bassin de Paris d'après le vol acquisition à 3 000 m (d'après P. Mouge *et al.*, 1991).

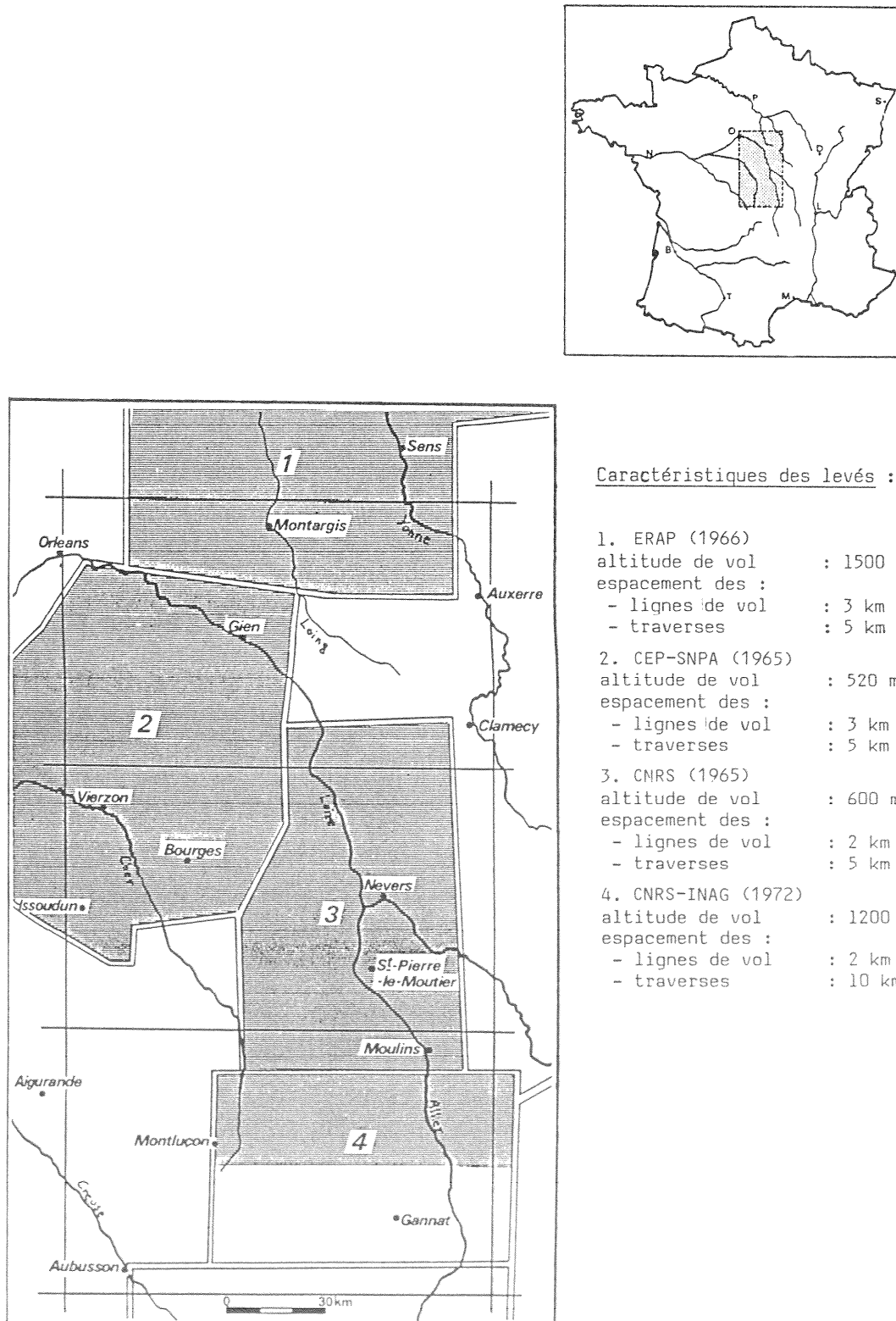


Fig. 4. - AMBP - Données géophysiques - situation géographique. Le découpage des cartes gravimétriques à 1/200 000 est indiqué ainsi que les différents levés aéromagnétiques de détail (hachurés).

Deux interprétations sont faites à partir des données du levé général de la France : J. Le Mouél (1969) et A. Galdeano (1984). Le premier a utilisé la méthode HAHN (relief d'une couche aimantée) qui permet de trouver, pour un secteur donné, la profondeur minimale du toit du corps en fonction de l'aimantation minimale choisie (fig. 6) : il trouve ainsi une profondeur de 7 km avec une aimantation de

100 nT (1 A/m) pour l'anomalie de Gien. Le second s'est servi des discontinuités correspondant au toit de la structure. Il trouve ainsi des profondeurs de 3 à 4 km respectivement pour Gien et l'extrémité sud, sans faire d'hypothèse sur l'aimantation : il reconnaît d'ailleurs que l'orientation N-S des lignes de vol et leur grand espacement ne sont pas favorables pour l'interprétation.

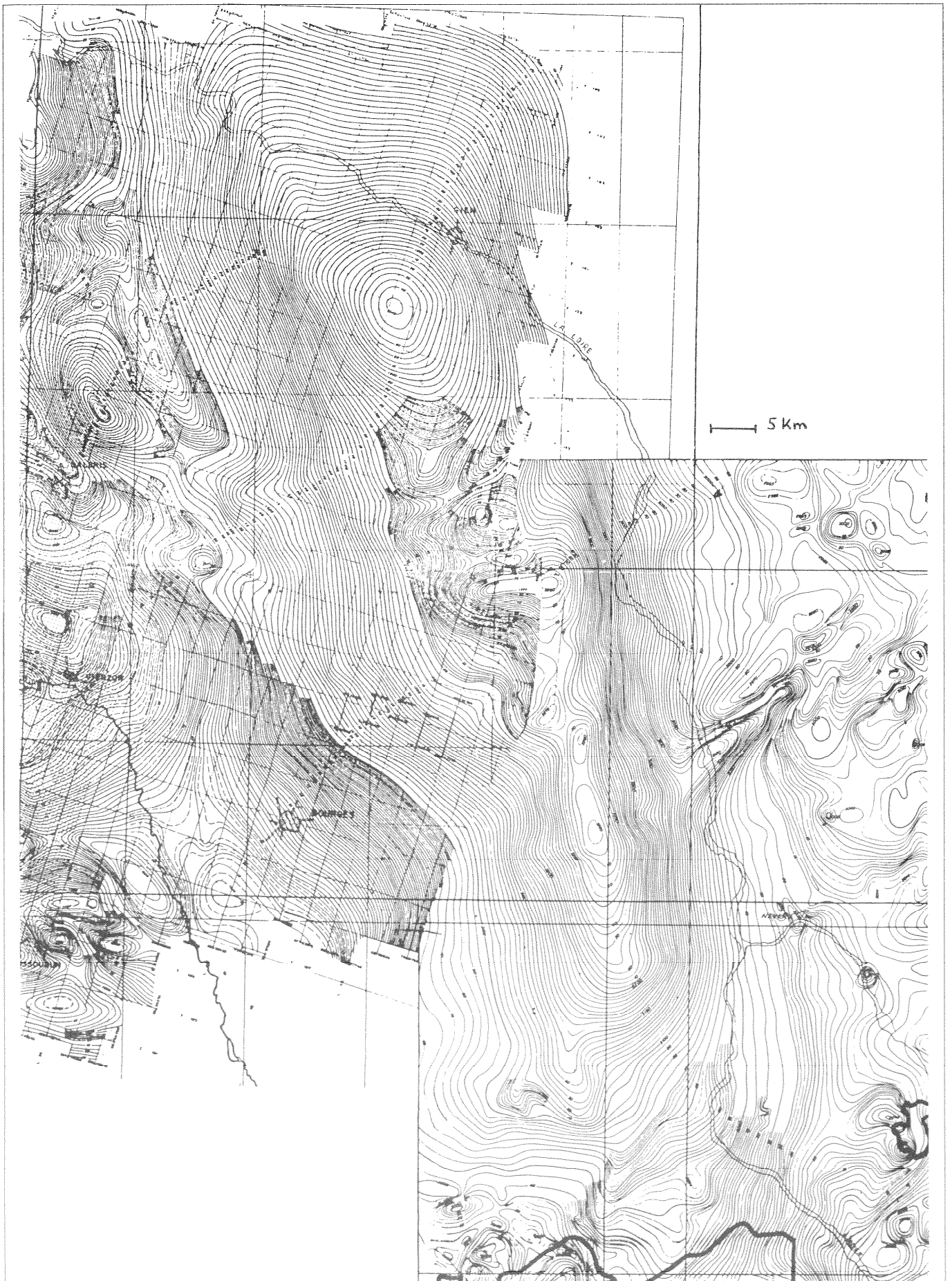


Fig. 5. - AMBP - Levé aéromagnétique détaillé de la partie sud.

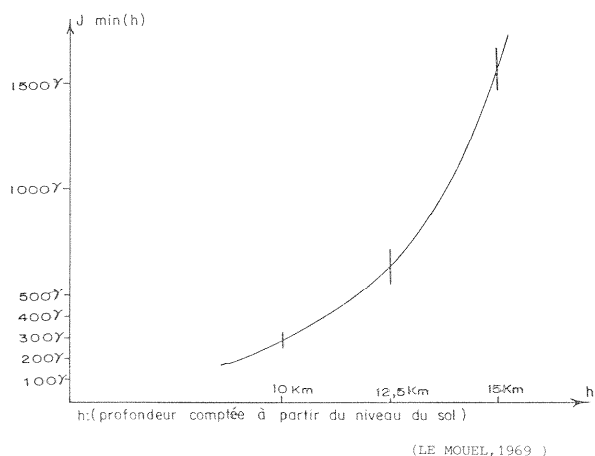


Fig. 6. - Profondeur minimale du toit du corps en fonction de l'aimantation minimale choisie (J. Le Mouél, 1969).

Tous les autres géophysiciens ont utilisé les levés détaillés où les lignes de vol sont plus serrées et recourent perpendiculairement l'anomalie avec une altitude de vol moins élevée.

J. Corpel et C. Weber (1966 et 1968) ainsi que B. Lambolez (1970) utilisent la méthode du filon épais vers le bas sur un profil passant à 6 km au sud de Couy et trouvent une profondeur du toit de l'ordre de 6 km pour une susceptibilité de $2,4 \cdot 10^{-2}$ SI et une largeur de 12 km. Les premiers trouvent un résultat équivalent en prenant un modèle cylindrique horizontal infiniment long, ce qui est une première tentative pour un modèle limité vers le bas (fig. 7). C'est en effet J. Goguel qui, le premier, attire l'attention sur cet effet de limitation vers le bas provoqué par la perte de l'aimantation en dessous de la surface de Curie.

Dans cette optique, M. Ogier (1971) tente de trouver, pour le même profil, la base de la structure aimantée en utilisant un modèle limité vers le bas : il trouve que le modèle filon épais ne convient pas car il implique que la base soit située à 64 km de profondeur. Un modèle cylindrique horizontal infini à section trapézoïdale convient déjà mieux car la base n'est plus qu'à 36 km (une profondeur de 20 ou 25 km aurait mieux correspondu à un gradient normal de température pour cette surface de Curie). Ce modèle aurait un toit de 4 km de large et 7 km de profondeur et sa base serait large de 50 km, la susceptibilité n'est pas déterminée (fig. 8).

Entre-temps, N. Debeglia, en 1970, avait, pour la première fois, fait un modèle en 2,5 dimensions avec des prismes infinis vers le bas ajustés par approximations successives : en fait, la profondeur générale du toit de la structure dans la partie sud de l'AMBP avait été fixée à 5,4 km de profondeur ce qui donnait une aimantation de 3,6 A/m pour une largeur de 11 km et permettait de mieux interpréter l'apophyse de la Charité-sur-Loire. Deux ans plus tard, elle fait une modélisation gravimétrique de la région sud de l'AMBP et trouve des profondeurs de toit de 2 à 2,8 km respectivement pour Couy et Gien avec des contrastes de 0,13 et 0,19 : la base de ces corps lourds était prise à 8 et 25 km.

En 1973, A. Gérard, en s'appuyant sur la carte du gradient magnétique vertical réduit au pôle, modélise

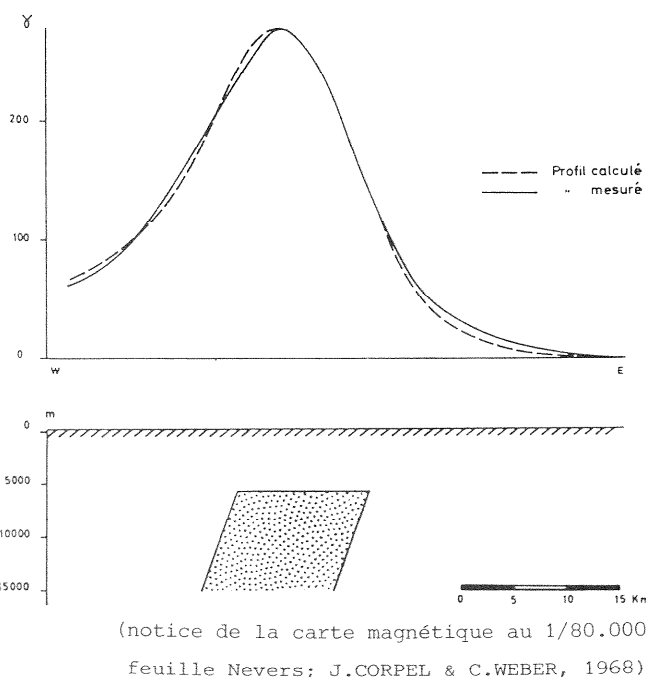


Fig. 7. - Modélisation limitée vers le bas (notice de la carte magnétique à 1/80 000 feuille Nevers; J. CORPEL & C. WEBER, 1968).

de façon différente les anomalies de Gien et du sud de l'AMBP :

- à Gien, le corps magnétique était limité à 20 km vers le bas et son aimantation était de 140 nT (1,4 A/m) : dans ces conditions, le toit est entre 6 et 12 km de profondeur ;
- dans la région de Couy (fig. 9), le corps, infini vers le bas, avait une largeur de 20 km, une aimantation de 0,5 A/m et possédait un cœur plus lourd (contraste 0,19) avec la même aimantation : le toit de ce modèle est alors à 2 km avec des remontées allant jusqu'à 1,2 km de la surface (on remarquera que cette détermination de profondeur par la gravimétrie devait plutôt refléter l'allure du socle).

En 1984, N. Debeglia, A. Guillen et V. Menichetti utilisent une nouvelle méthode : la programmation linéaire en 2,5 dimensions appliquée à la fois sur des profils tirés de la carte de l'anomalie magnétique réduite au pôle et au gradient gravimétrique vertical prolongé de 500 m vers le haut. Sans faire d'hypothèse sur la forme du corps, ils trouvent que la profondeur du toit peut varier de 2,5 à 6 km de profondeur pour des contrastes d'aimantation de 1 à 3 A/m (le corps magnétique étant limité vers le bas à une profondeur de 20 km). Le contraste de densité serait alors de 0,15 (fig. 10 et 11) (voir également les résultats dans l'article de A. Autran *et al.*, 1986).

— Enfin, en 1985, A. Guillen réalise une modélisation en 3D par programmation linéaire, permettant de donner une profondeur maximale de 3 km pour le toit des structures magnétiques. Ces résultats permettent une représentation en isobathes ; les interprétations sont assez complexes et font intervenir les erreurs pouvant entacher les données : on en retiendra que, pour une erreur inférieure à 15 nT, la profondeur du toit pourrait être de 2,5 km à 3,5 km avec une aimantation de 1,5 à 2,5 A/m (fig. 12 et 13).

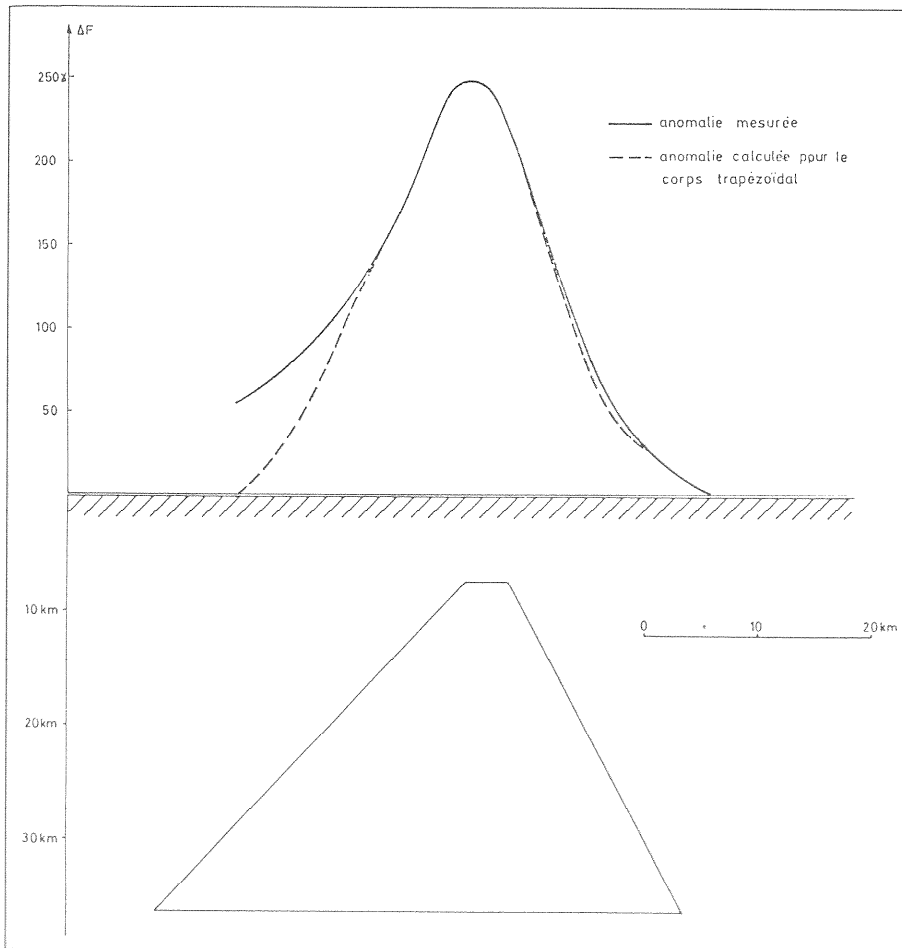


Fig. 8. - Interprétation de l'Anomalie magnétique du bassin de Paris à l'aide d'un corps trapézoïdal dissymétrique (M. Ogier, 1971).

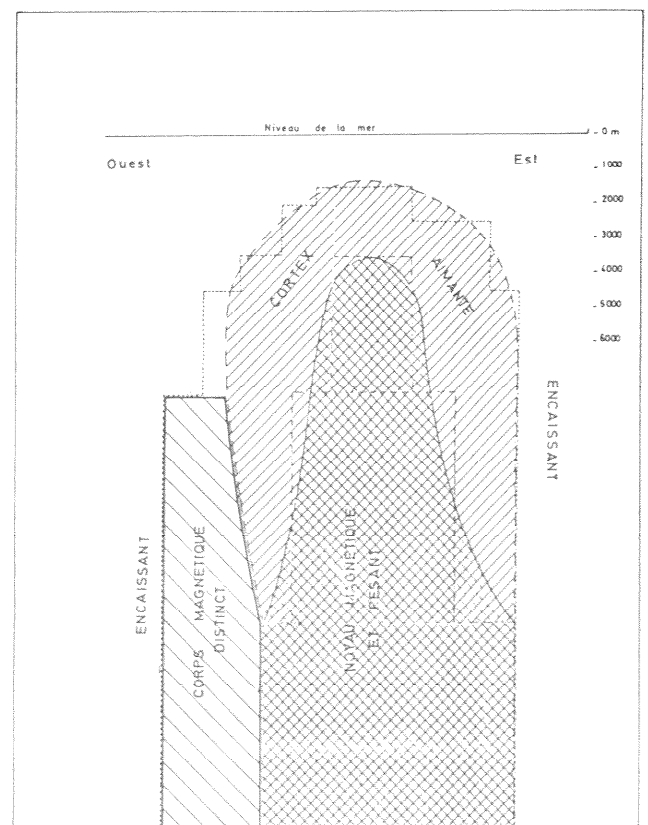
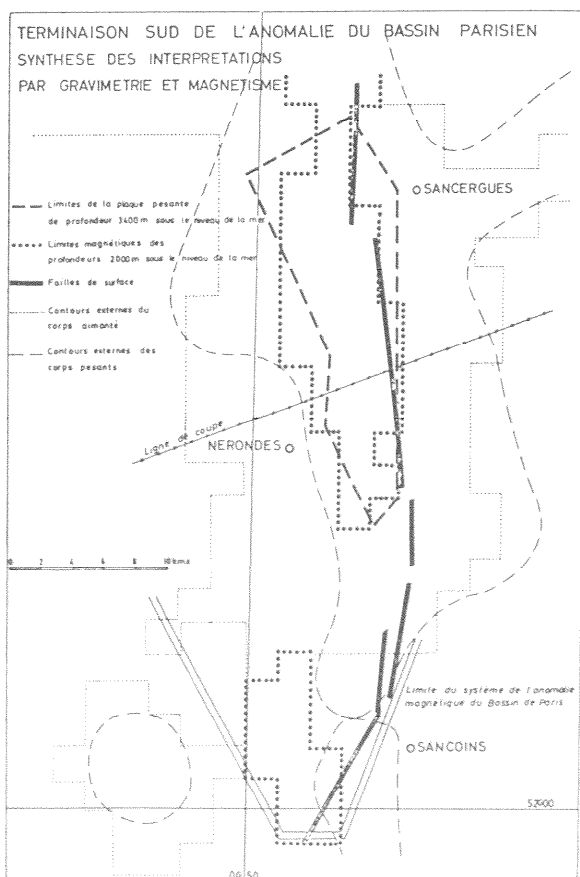


Fig. 9. - Modélisations des anomalies de Gien et du sud de l'AMBP (A. Gérard, 1973).

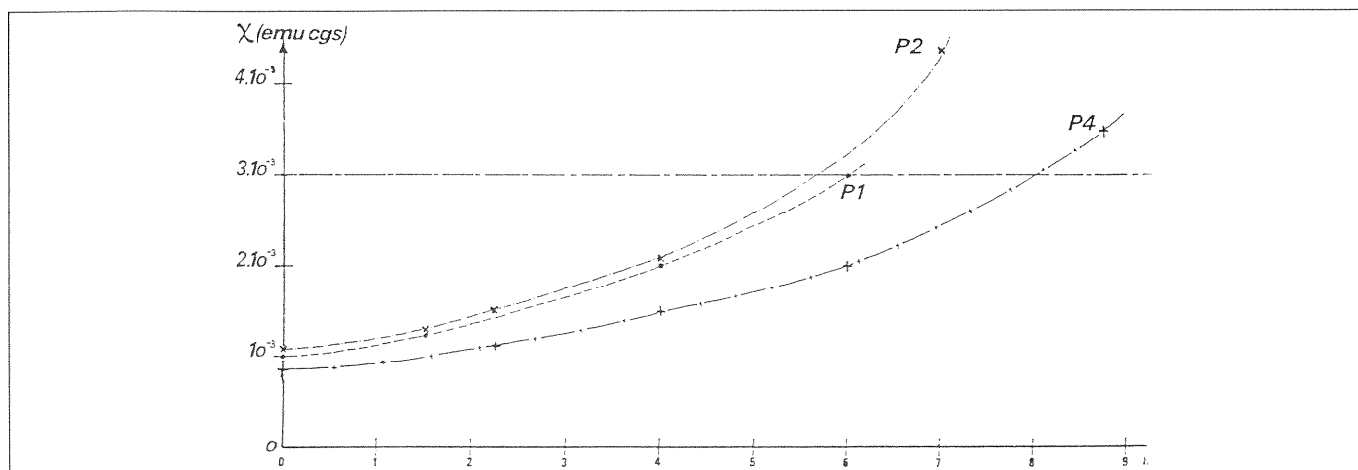


Fig. 10. - Susceptibilité minimale en fonction de la profondeur du toit des structures d'après la programmation linéaire (erreur admise : 15 nT) (N. Debégli, A. Guillen, V. Menichetti, 1970).

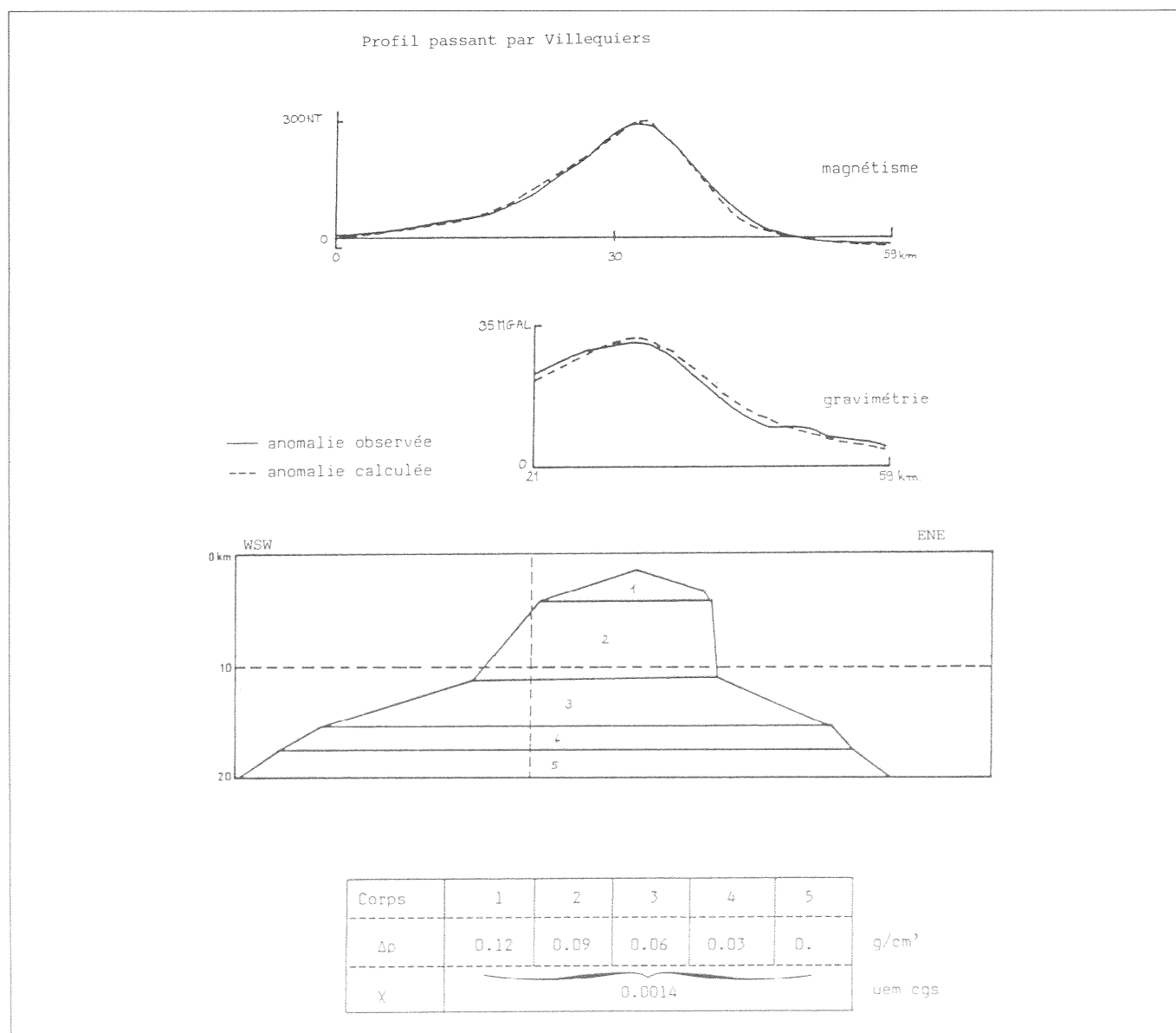
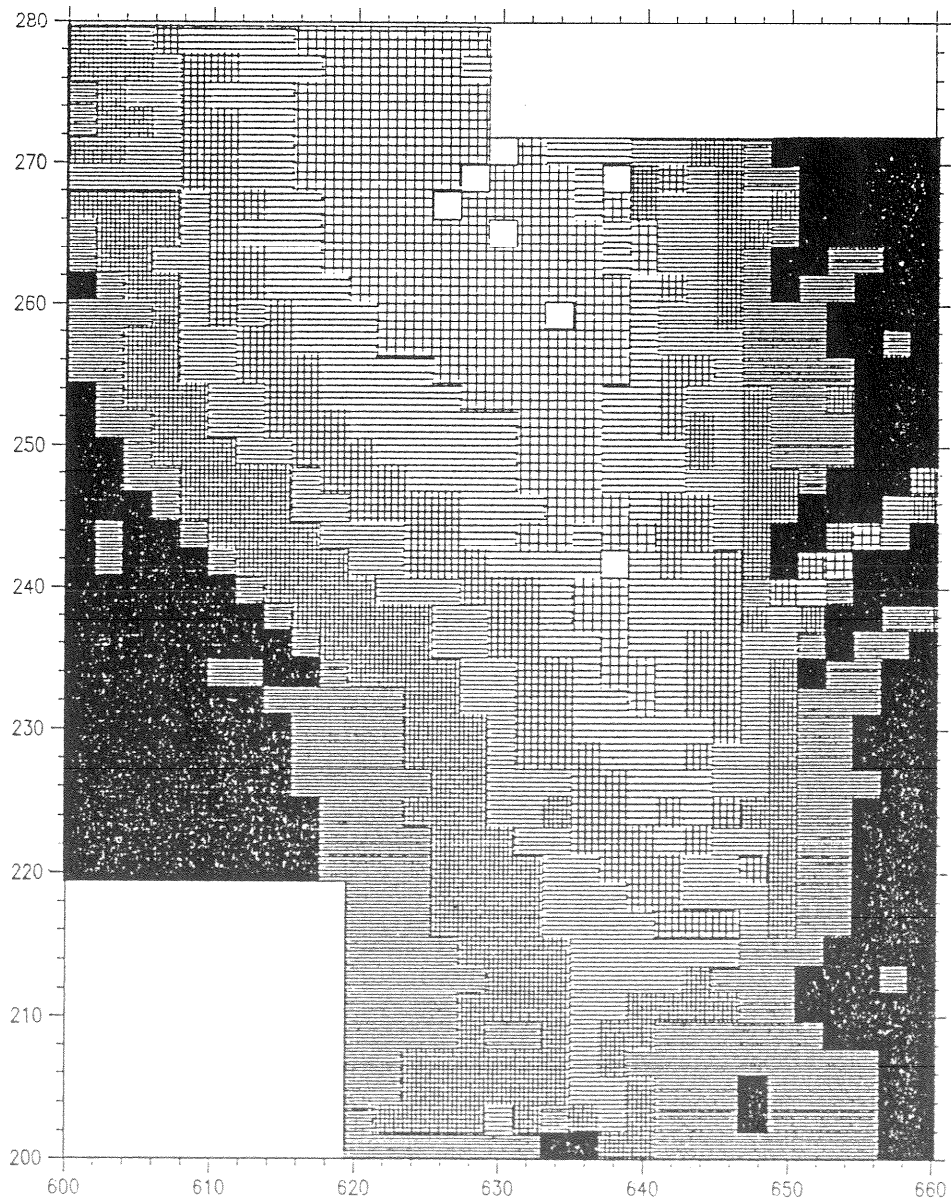


Fig. 11. - Inversion simultanée gravimétrique et magnétique : couple (densité-susceptibilité) le plus élevé (N. Debégli, A. Guillen, V. Menichetti, 1970).

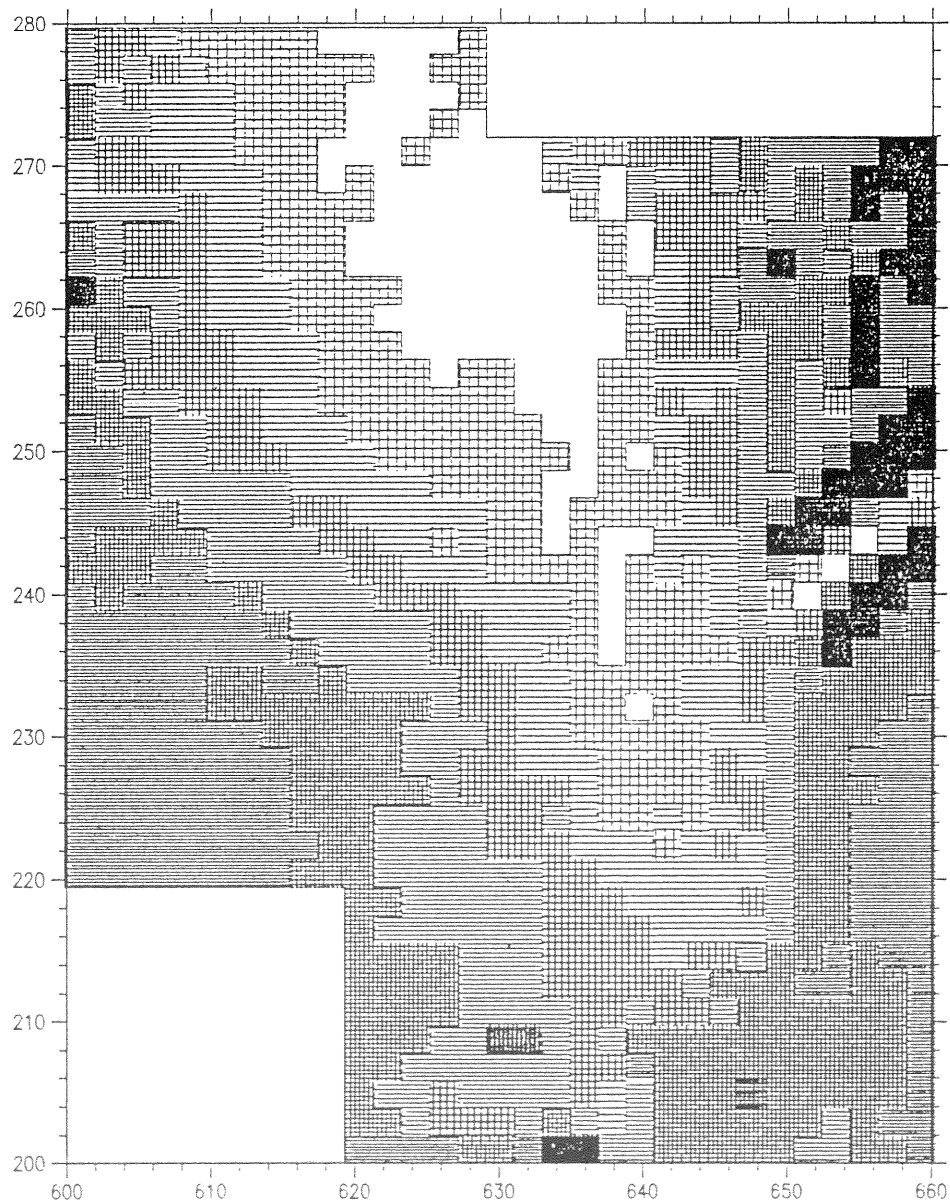


LEGENDE

Echelle: 1/500 000

	SUP. - -2.5	-4.5 - -4.0	
	-3.0 - -2.5	-5.0 - -4.5	
	-3.5 - -3.0	-5.5 - -5.0	
	-4.0 - -3.5	INF. - -5.5	

Fig. 12. - Profondeur sous le niveau du sol pour une structure homogène d'aimantation 250 nT et trois profondeurs de contraintes à 2.5 km par rapport au sol (A. Guillen, 1985).



LEGENDE

Echelle: 1/500 000

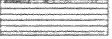
	SUP. - -3.0		-7.0 - -6.0	
	-4.0 - -3.0		-8.0 - -7.0	
	-5.0 - -4.0		-9.0 - -8.0	
	-6.0 - -5.0		INF. - -9.0	

Fig. 13. - Profondeur sous le niveau du sol pour une structure homogène d'aimantation 150 nT et trois profondeurs de contraintes à 2.5 km par rapport au sol (A. Guillen, 1985).

Une modélisation magnétique fut même réalisée par A. Guillen (1986) en prenant comme limite du corps magnétique deux réflecteurs du profil Cher 34 (fig. 14) : le toit du corps serait alors à 3,5 km de la surface et sa susceptibilité assez élevée ($6 \cdot 10^{-3}$ uSI).

Discussion sur ces interprétations magnétiques

A l'issue de ces interprétations, qui ont été faites d'abord avec des moyens et des modèles simples, puis au fur et à mesure que les capacités de calcul s'accroissaient, avec des modèles de plus en plus variés et complexes, faisant varier à la fois forme et profondeur du toit et aimantation du corps, on se rend compte que jusqu'en 1984, la profondeur du toit, dans la moitié sud de l'AMBP, était estimée entre 5 et 7 km.

Il ne pouvait en être autrement car les interprétations étaient « biaisées » d'entrée de jeu :

— soit que les données de base utilisées étaient celles du levé général de la France (lignes de vol N-S —

donc parallèles à l'anomalie — et espacées de 10 km), de sorte qu'un profil transverse à l'anomalie était défini par 4 ou 5 points espacés de 10 km : les courtes longueurs d'onde étaient filtrées et on ne pouvait donc espérer extraire un « signal » dont la profondeur soit de 2 ou 3 km ;

— soit que les modèles comportaient des toits plats avec des limites anguleuses : de tels modèles ne pouvaient pas monter plus haut que 5 km car l'effet de ces dièdres se serait alors manifesté sur les profils magnétiques par de courtes longueurs d'onde, non observées sur les levés magnétiques de détail.

Il était pourtant une évidence que peu de personnes ont formulé par écrit jusqu'en 1984, à savoir que l'on pouvait bâtir autant de modèles que l'on veut en jouant sur la forme du toit et l'aimantation du corps, mais en restant entre deux limites pour la profondeur du toit :

- une limite supérieure, fixée par la géologie : le corps magnétique ne doit pas monter dans les terrains sédimentaires ;
- une limite inférieure, imposée par les calculs géo-

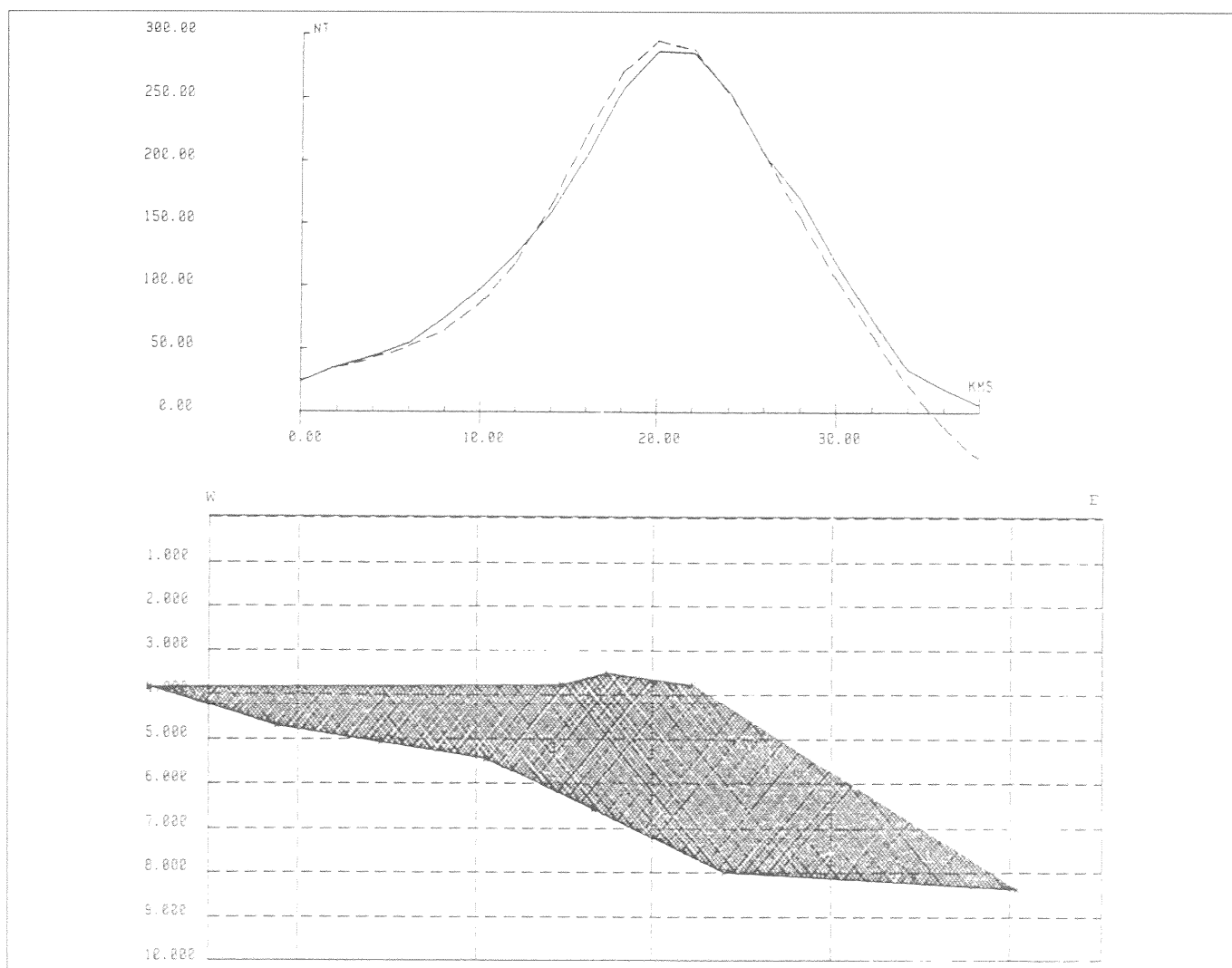


Fig. 14. - Interprétation du profil transversal à l'anomalie magnétique prenant en compte des réflecteurs profonds décelés sur les profils sismiques (logiciel GMI-PACK) (A. Guillen, 1986).

physiques : le corps le plus profond pouvant expliquer l'anomalie est un cylindre horizontal dont l'axe est situé vers 8 km de profondeur pour l'extrémité sud de l'AMBP (davantage pour Gien) ; le rayon du cylindre est fonction de la susceptibilité (ou de l'aimantation) attribuée au corps.

Pour des aimantations fortes, le rayon pourrait être de 2 km, c'est-à-dire que la partie supérieure du cylindre pourrait se trouver au maximum à 6 km de profondeur (bien entendu, on aurait pu, avec des faibles aimantations, trouver un cylindre de 6 ou 7 km de diamètre, tangentant la partie supérieure du socle).

Entre ces deux limites, on peut donc avoir une infinité de solutions, entre lesquelles il n'a pas été possible de trancher ; même après 1984, la méthode de programmation linéaire (en 2,5 ou 3D) où l'on contraignait le modèle par les incertitudes sur les données et le caractère raisonnable de l'aimantation à attribuer au corps magnétique, n'a pas permis de fournir de solution unique.

Dans ces conditions, c'était bien à l'endroit où l'anomalie était la plus étroite qu'il fallait se placer pour faire un forage, car, tout en reconnaissant que le corps magnétique pouvait être le plus proche de la surface à un autre emplacement (mais lequel ?), il était plus sûr de forer là où la limite inférieure du toit se trouvait le plus près de la surface.

Rechercher le meilleur emplacement tout le long de l'AMBP aurait nécessité de faire un levé aéromagnétique détaillé (lignes espacées de 2 à 3 km, et orientées perpendiculairement à l'axe de l'anomalie, altitude modérée : 500 m) sur les 3/4 nord de l'AMBP (de Rouen à Orléans) : ce ne serait jamais que l'affaire de 10 000 km de vol. Un tel levé aurait pu mettre en évidence d'éventuelles courtes longueurs d'onde qui soient l'expression de parties de corps magnétiques plus proches de la surface.

Utilisation de méthodes indirectes (gravimétrie - MT)

La gravimétrie d'une part, les sismiques réfraction et réflexion d'autre part, la magnétotellurique enfin ont été employées en espérant que le corps magnétique pourrait avoir une signature avec ces méthodes. Les éventuelles anomalies lourdes ou légères, conductrices ou résistantes et les réflecteurs ou réfracteurs ne pouvaient, de toute manière, que contribuer à améliorer les connaissances sur cette structure majeure.

Gravimétrie

Les données gravimétriques disponibles consistaient en cartes à 1/80 000 (cartes gravimétriques de la France) où les stations ne sont pas réparties régulièrement mais sont disposées suivant un réseau maillé.

Dès 1954, J. Goguel avait noté qu'un accident sub-méridien jalonné par les villes de Rambouillet, Orléans et Bourges interrompait les anomalies gravimétriques orientées E-W et il avait fait le rapprochement avec l'AMBP tout en remarquant que la coïncidence n'était pas parfaite puisque à Rambouillet on avait une anomalie légère et, entre Bourges et Nevers, une anomalie lourde.

C'est, en effet, à son extrémité sud qu'une anomalie gravimétrique lourde (et non légère - A. Gérard (1971)) se superpose à l'AMBP. Également en 1971, A. Gérard et C. Weber remarquent que le sondage de Blancafort a trouvé un socle granitique léger alors qu'il y a une anomalie lourde qu'ils attribuent à l'influence du corps profond responsable de l'anomalie magnétique de Gien ; pour eux, la gravimétrie met en évidence une zone de transition (l'accident sub-méridien de J. Goguel) qui paraît étroitement liée à l'AMBP ; plus tard, en 1973, C. Weber écrira que : « l'anomalie (gravimétrique) méridionale, positive, culminant entre Sancerres et Nérondes, représente la seule perturbation nette du champ de pesanteur qui soit directement superposée à l'AMBP ».

N. Debeglia, en 1972, fait les premières modélisations gravimétriques sur la partie sud de l'AMBP : elle trouve ainsi le toit du corps lourd à 2,8 km à Gien et à 2 km à l'extrémité sud pour des contrastes de densité de 0,19 et 0,13 respectivement.

C'est A. Gérard, en 1973, qui, associant plus étroitement la gravimétrie au magnétisme dans sa modélisation de l'extrémité sud de l'AMBP, arrive ainsi à faire remonter le corps lourd localement jusqu'à 1,2 km, plus généralement à 2 km de profondeur, mais ne peut pas faire coïncider corps lourd et corps magnétique : dans le modèle (fig. 9), le premier forme un noyau au sein du second (contraste de densité : 0,19). Ce résultat est remarquable car il montre déjà qu'il faut séparer les causes des anomalies magnétiques et gravimétriques.

A. Guillen et N. Debeglia (1984), par des voies différentes, arrivent à un résultat voisin en éliminant l'effet des formations sédimentaires et en corrigeant l'isostasie : ils montrent que l'AMBP a une expression gravimétrique positive, notamment près de Rouen et de Rambouillet et à l'extrémité sud, mais ils remarquent que l'axe lourd a une longueur d'onde plus petite que l'axe magnétique, ce qui peut amener à dissocier les deux effets : seule, la partie « superficielle » de la structure a un effet gravimétrique alors que le comportement magnétique se manifeste jusqu'à la base. Avec V. Menichetti, ils vont plus loin en supposant que c'est à l'extrémité sud de l'AMBP, où l'effet gravimétrique est le mieux marqué (+ 20 mGal), que les marqueurs lourds et magnétiques sont en grande partie identiques et justifient ainsi une inversion simultanée des données gravimétriques et magnétiques (fig. 11). C'est une hypothèse comme une autre, mais on a vu que des mesures gravimétriques complémentaires effectuées par la suite (1987) ont invalidé ce modèle (chap. 1 et 2).

Magnéto-tellurique (MT)

En 1984, A. Dupis et A. Boyer qui s'étaient servi de la MT jusqu'alors surtout pour cartographier la morphologie du socle, tentent la recherche d'anomalies de résistivité intra-socle dans l'AMBP dans la région de Gien : si le socle apparaît bien en résistant dans les sondages MT et si la profondeur de son toit peut être estimée (900 à 1 300 m environ pour le top de l'anomalie de Gien, avec cependant de grandes variations sur de faibles distances), par contre, aucune anomalie de résistivité intra-socle ne peut être détectée à cet endroit.

Une extension de ce travail est effectuée en 1985 par les mêmes auteurs sur deux profils en croix passant à Garigny (au sud de Couy) avec des séries de trois

sondages espacés de 100 à 800 m : sur l'axe de l'AMBP, le socle se trouverait entre 700 et 1 100 m de profondeur (700 m à Couy) et les ellipses de résistivité (fig. 15) y deviennent des cercles (ce qui signifie que la structure est homogène et isotope à moins qu'il n'y ait compensation entre anisotropie et hétérogénéité).

Bases et profil magnétique au sol

Un peu avant le début du forage, trois bases magnétiques sont installées à une centaine de mètres du site choisi, pour servir de référence aux opérations magnétiques en forage ; à cette occasion un profil magnétique au sol, long de 20 km (stations tous les 500 m), sera réalisé (P. Charbonneyre et R. Millon, 1986).

Les interprétations et réinterprétations locales pendant et aussitôt après la réalisation du forage

Les nouvelles modélisations magnétiques

Couy

Le tableau 3 (C. Weber, 1988), reprend les résultats d'interprétations qui ont été faites après l'implantation du forage.

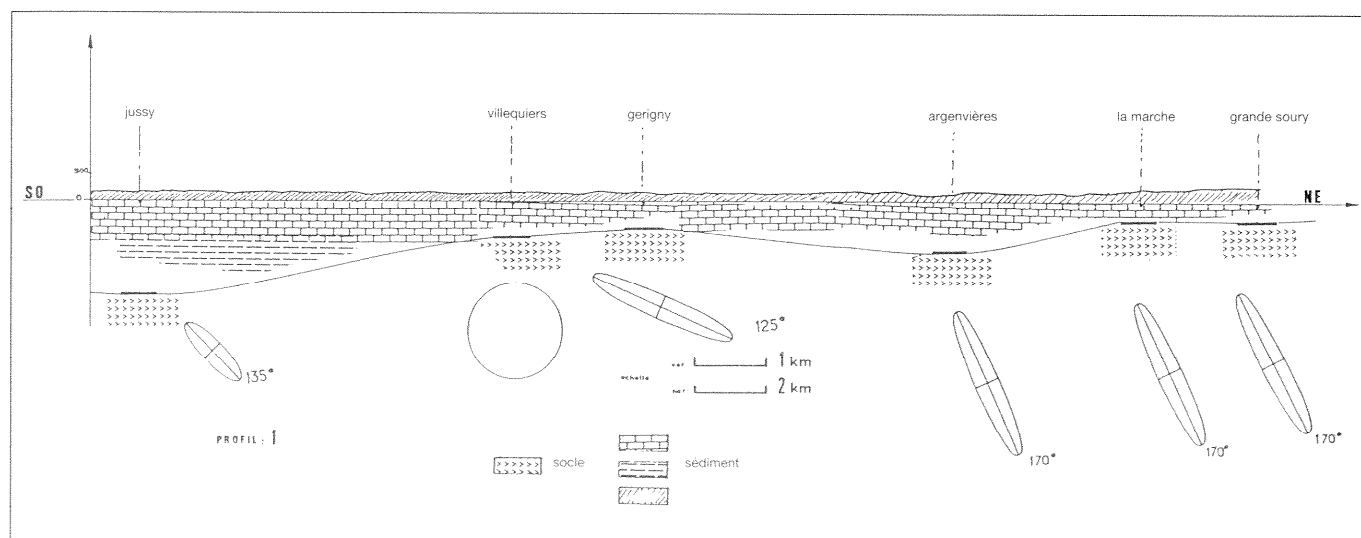


Fig. 15. - Profil SW - NE : coupe géoélectrique et ellipse de résistivité du socle (A. Boyer, 1984 et A. Dupis *et al.*, 1985).

METHODE D'INTERPRETATION	RAPPORT USTL/CRAS		NOTE GPF 10.02.88		
	Programmation linéaire	Inverses stochastiques	Inverses stochastiques		
			Contraintes libres en-dessous de 3,5 km	Contraintes libres en dessous de 7 km	Contraintes libres en-dessous de 3,5 km Gradient mesuré de 0 à 3,5 km
Limite inférieure du modèle	20 km	8 km	20 km	20 km	20 km
Nombre de couches (programmation linéaire)		1 : 0 - 1 2 : 1 - 1,5 3 : 1,5 - 2 4 : 2 - 2,5 5 : 2,5 - 3 6 : 3 - 4 7 : 4 - 6 8 : 6 - 8	1 : 2,5 - 3 2 : 3 - 3,5 3 : 3,5 - 4 4 : 4 - 5 5 : 5 - 6 6 : 6 - 7 7 : 7 - 10 8 : 10 - 14 9 : 14 - 20	id.	id.
Profondeur maximale du toit du modèle	3,5 km	entre 4 et 6 km	7 km	7 km	7 km
Profondeur "probable" du toit du modèle		entre 3 et 4 km	1er niveau entre 4 et 5 km 2ème niveau entre 7 et 20 km	entre 7 et 20 km	1er niveau entre 4 et 5 km 2ème niveau entre 7 et 20 km
Aimantation du modèle	1,5 A/m	entre 1,5 et et 2,5 A/m	1) entre 0,5 et 1 A/m 2) = 1,5 A/m	entre 1,5 et 2 A/m	1) entre 0,25 et 1 A/m 2) = 1,5 A/m

Tabl. 3. - Tableau comparatif des modèles USTL/BRGM (1986/87 - 1988) (C. Weber, 1988).

L'inversion stochastique en 3D (distribution gaussienne des aimantations et densités), supposant que le corps était limité à 8 km de profondeur (réflecteur de la coupe sismique Cher 34), a permis à A. Guillen (1985) de montrer une répartition des contrastes de densité (0,1 de 1 2,5 km de profondeur, passant à 0,2 vers 4 km) et d'aimantation (1,5 à 2,5 A/m à partir de 3 km) et de confirmer les formes de la structure suggérée par la programmation linéaire (fig. 14 et 16).

Lorsque le forage était à 1 800 m, R. Bayer et A. Guillen (1987) ont fait une inversion des données gravimétriques et magnétiques pour rechercher la profondeur à laquelle le forage pourrait rencontrer les roches denses et aimantées et préciser la forme de ces structures. La programmation linéaire (valeurs équiprobables des paramètres aimantation et densité) a pu montrer que l'aimantation minimale était de 70 nT (0,7 A/m) en bidimensionnel et de 150 nT en 3D pour un corps homogène culminant à 3,5 km de profondeur, et limité à 20 km de profondeur, aux flancs vertical à l'est et moyennement penté à l'ouest.

Après que le forage ait atteint 3 500 m sans avoir recoupé le corps magnétique principal, une autre modélisation par inverse stochastique (R. Bayer, A. Guillen et D. Rousset, 1988) a pris en compte les (faibles) aimantations rencontrées dans le forage

jusqu'à 3 500 m et en limitant à 20 km la base du corps magnétique. Cette modélisation suggère l'existence probable d'un niveau magnétique entre 3,5 et 4 km de profondeur (0,25 à 1 A/m) ; le corps principal, plus magnétique (1,5 A/m) se rencontrerait vers 7 km de profondeur.

Gien

A peu près à la même époque, une réinterprétation par inversion en isobathes fut demandée pour la partie sud de l'AMBP, anomalie de Gien incluse. Il s'agissait de comparer les profondeurs de toit de la structure à Gien et Couy en utilisant le même type de données et la même méthode d'interprétation.

On rappelle en effet que l'anomalie de Gien n'avait été étudiée jusqu'alors qu'avec les données du levé général de la France (1964 - lignes N-S espacés de 10 km) par J. Le Mouel (1969) et A. Galdeano (1984) ; une interprétation utilisant les levés de détail avait été faite par A. Gérard (1973) sur une carte du gradient vertical réduit au pôle. En comparaison, l'AMBP dans la région de Couy avait été étudiée avec des moyens plus performants.

Avec les hypothèses de base adoptées déduites de l'interprétation 3D de A. Guillen *et al.* (1988), à savoir

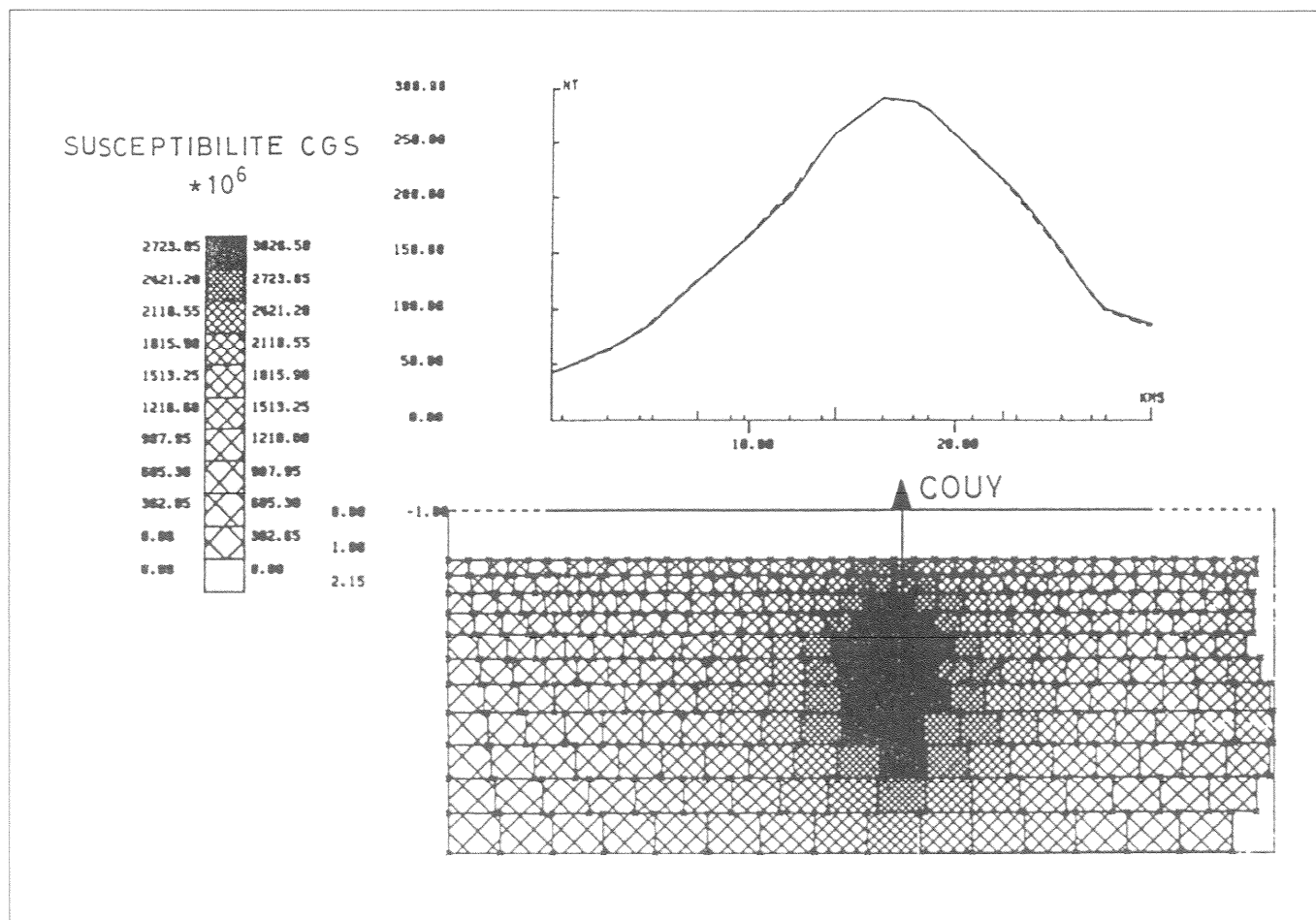


Fig. 16. - Modèle de susceptibilité magnétique a posteriori sur un profil passant par Couy (A. Guillen, 1985).

que la profondeur de la base de l'aimantation moyenne du corps magnétique ne changaient pas entre Couy et Gien. N. Debeglia (mars 1988) montre que la profondeur du toit de la structure à Couy peut être égale ou inférieure à celle obtenue à Gien ; en outre, les profondeurs maximales admissibles du toit de la structure aimantée peuvent être estimées à :

- 4 à 5 km pour l'anomalie de la Charité-sur-Loire,
- 7 à 8 km à Couy,
- > 10 km pour l'anomalie de Gien,

avec des contrastes d'aimantation de l'ordre de 1,5 à 3 A/m (ces profondeurs pouvant être plus faibles avec des aimantations plus faibles).

Dans cette même étude, N. Debeglia avait établi une carte des profondeurs du toit du socle magnétique, établie par inversion des levés aéroportés à basse altitude (fig. 17). Cette carte met en évidence une anomalie étroite NS en bordure est de l'anomalie de Gien, s'étendant de Couy au sud vers Montargis au nord.

Retour sur l'AMBP dans son ensemble

Une autre approche plus globale a été tentée plus récemment par P. Mouge *et al.* (1991), en comparant les résultats des profils sismiques ECORS et aéro-

gnétiques à basse altitude (600 m) et en utilisant la carte aéromagnétique uniformisée (c'est-à-dire recalculée pour une même altitude de vol = 3 000 m) pour l'Europe de l'Ouest, (P. Mouge, 1990).

Au-dessus des profils sismiques ECORS, les spectres d'énergie du magnétisme montrent des profondeurs de 25 km et 5,5 km (sous le niveau de mesures) pour les sources du magnétisme (aimantation de l'ordre de 1,5 A/m entre ces 2 profondeurs).

Les profils de gradient magnétique ont un style différent de part et d'autre de l'AMBP : relativement calmes à l'ouest (domaine cadomien), mais plus agités à l'est (effet des failles majeures de la Seine, du Bray, de la Somme et du front varisque).

Dans la partie sud de l'AMBP, ces profondeurs sont de 20 à 7 km pour la région de Gien, 20 à 4 km entre Gien et Couy. A l'aplomb du forage, des profondeurs de 6 à 4,2 km peuvent être déduites des spectres d'énergie (avec une forte dispersion autour de la profondeur 4,2 km).

Deux cartes du gradient vertical de l'anomalie ont été réalisées dans la région de Couy : l'une (fig. 18 a) à partir des vols à basse altitude (520 m et 600 m d'altitude de vol), l'autre donnant le gradient vertical moyen

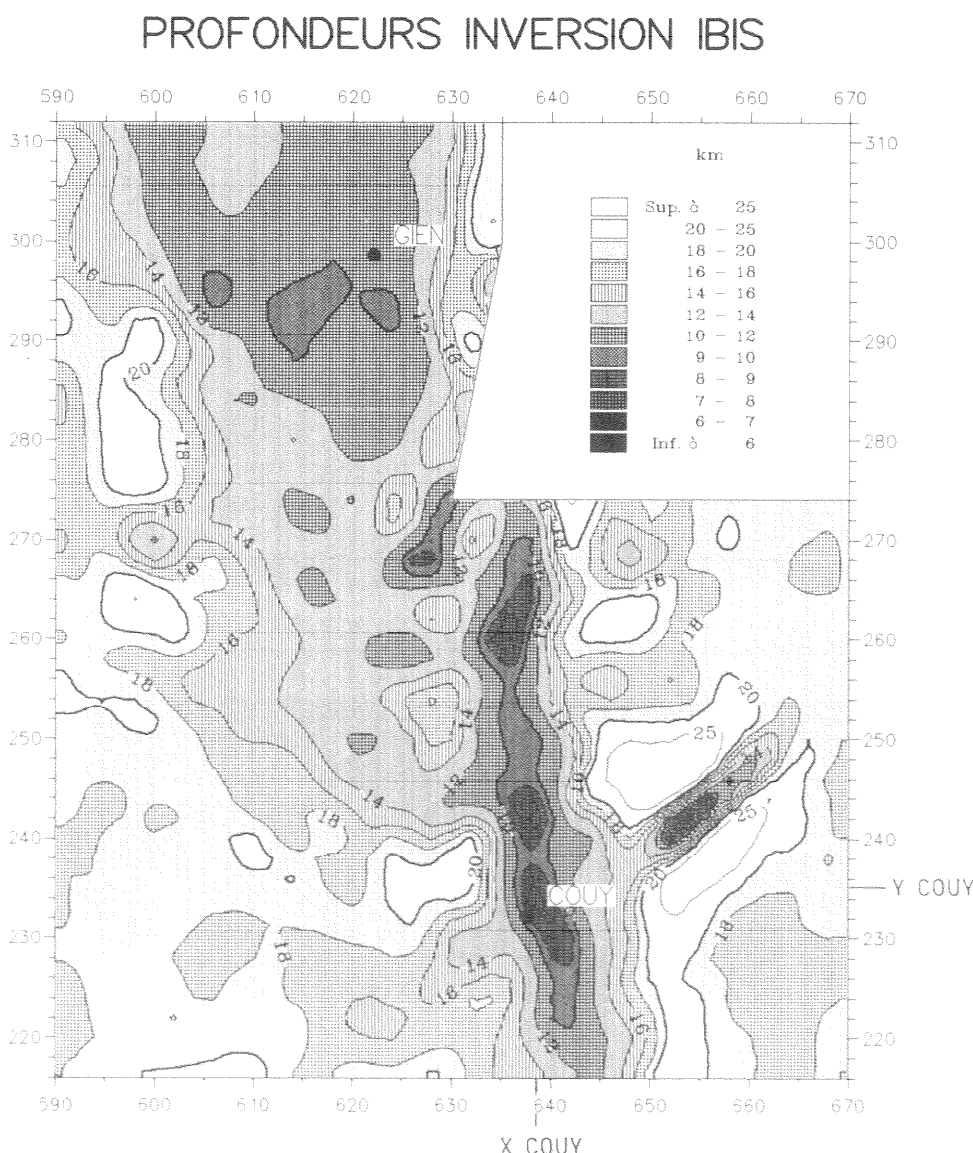


Fig. 17. - Profondeurs du toit des structures magnétiques obtenues par une inversion en isobathes réalisée grâce au logiciel IBIS de la chaîne de traitement GMI-PACX. C'est la carte des anomalies acquises à basse altitude qui a été utilisée. Contraintes imposées : aimantation induite constante pour toutes les structures et égale à 3 A/m. Profondeur du toit de la structure à l'aplomb du maximum d'amplitude de l'anomalie (anomalie de Gien) fixée à 10 km.

Le logiciel IBIS (D. Chenot, N. Debeglia, 1990) permet de calculer les profondeurs d'interfaces de densité ou d'aimantation dont les effets sont équivalents, à une constante près, au champ mesuré. La base de la structure est supposée horizontale et de profondeur indéterminée, si le champ régional n'est pas fixé. Parmi l'infinité de ces solutions équivalentes, la solution à calculer est définie par un ensemble de contraintes fixées par l'utilisateur. Dans le cas présent, grâce au choix d'une aimantation moyenne élevée et d'une forte profondeur du toit de la structure à Gien, l'inversion en isobathe aboutit à une des surfaces les plus profondes possibles. Ce choix a un double avantage :

- L'inversion donne une nouvelle estimation des profondeurs maximales admissibles pour le toit de la structure, soit :
 - 5 km environ pour l'anomalie de la Charité-sur-Loire,
 - 7 à 8 km à Couy,
 - 10 km à Gien.

En l'absence de contraintes externes et avec les seules informations magnétiques disponibles, ces profondeurs seraient les profondeurs de sondage à prévoir en chacun de ces points pour atteindre le toit des structures magnétiques.

— Elle fournit une carte d'isobathes fortement contrastée donnant une image structurale nette des sources magnétiques, image confortée par celle du gradient vertical (fig. 18 a).

Fig. 18 a. - Gradient magnétique vertical au-dessus de la partie sud de l'AMBP (réduit au pôle à 800 m d'altitude, calculé à partir de la carte acquise à basse altitude par le programme de transformation fréquentielle du logiciel GMI-PACK (TOTAL-BRGM)).

Ce document montre que l'orientation globale N 160° E de l'AMBP en champ réduit au pôle résulte de la coalescence de plusieurs anomalies :

— Une anomalie d'orientations sub-méridiennes s'étendant au moins sur une cinquantaine de km de long et passant par le sondage de Couy. L'absence de levés de détail à l'est de Gien ne permet pas de savoir si elle se prolonge plus au nord. D'après le levé C.N.R.S. général de la France (1964), c'est cependant peu probable.

— Cette anomalie est relayée vers le nord-ouest par une anomalie d'extension plus limitée d'orientation N 20° E, puis par l'anomalie de Gien, elle-même constituée de deux axes anormaux N 160° E et N-S.

— Au niveau de Couy, l'AMBP recoupe une anomalie de courte longueur d'onde orientée N 60° E, l'anomalie de la Charité-sur-Loire. Cette anomalie a pu être interprétée (J. Corpel, C. Weber, 1968) comme un dyke superficiel subvertical. Son toit serait à environ 600 m de profondeur et sa base à 7 000 m, pour une aimantation induite de 0,35 A/m. Le gradient vertical isole complètement cette anomalie dont la cause paraît distincte de l'AMBP. Elle semble se poursuivre, sans décalage majeur, mais avec une amplitude atténuée, à l'ouest de l'AMBP.

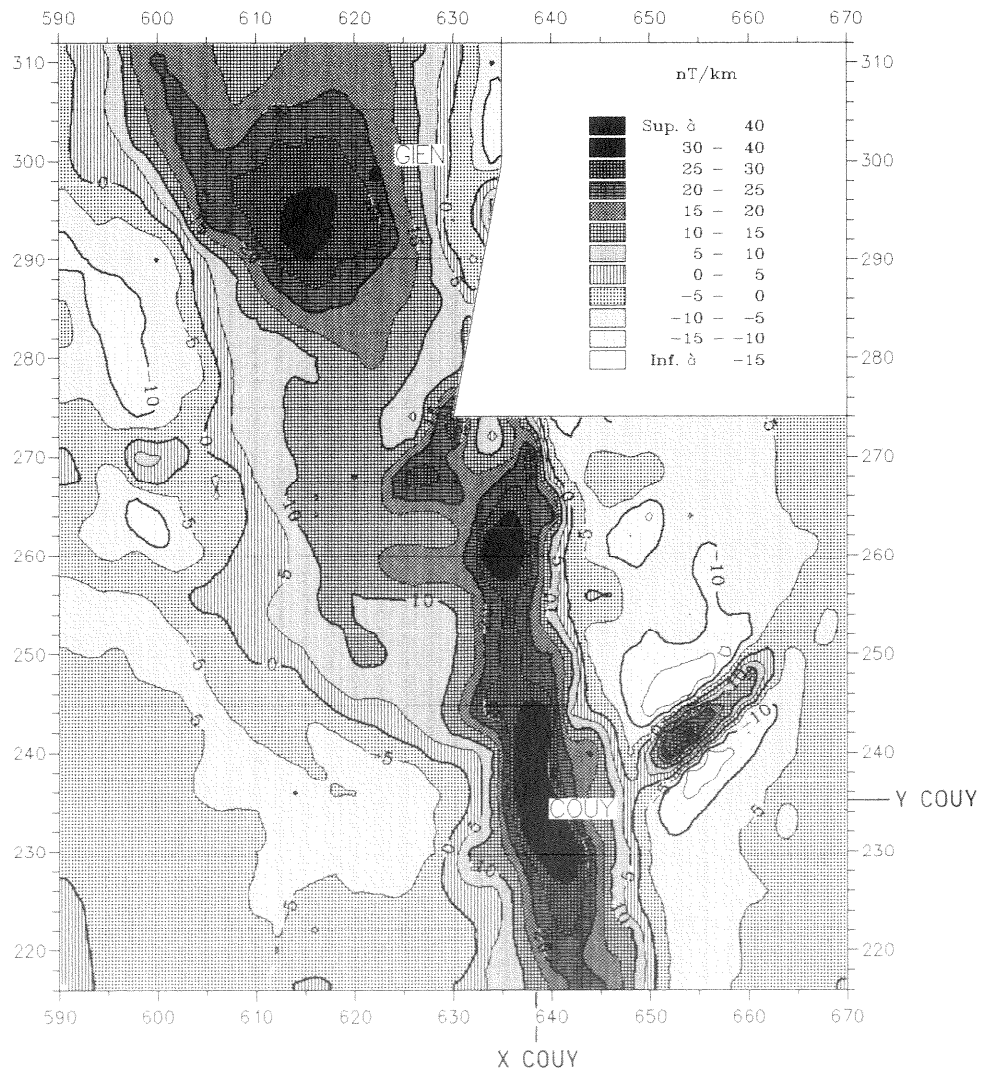
A noter que l'amplitude de l'anomalie en gradient vertical est de 40 nT/km à Couy, contre 34 nT/km à Gien. Le rapport du champ au gradient vertical est un indice simple permettant de calculer la profondeur maximale du toit des sources magnétiques (assimilés à un cylindre horizontal infini et de rayon négligeable vis-à-vis de la profondeur de son axe). Cette profondeur serait ainsi de 7 km à Couy et de 11,8 km à Gien.

entre les cartes acquises par vols à 520-600 m et vols à 3 000 m (fig. 18 b). Ces deux cartes montrent la superposition de deux types d'anomalies :

- une anomalie profonde s'inscrivant vers le NW et suivant le tracé de l'AMBP, qui correspondrait au corps magnétique à l'origine de l'AMBP.
- une anomalie plus proche de la surface, d'axe N-S, qui pourrait représenter l'émergence orientale du groupe leptyno-amphibolitique.

A la hauteur du forage de Sancerre-Couy, ces deux anomalies sont pratiquement superposées.

GRADIENT VERTICAL RED. AU POLE



Conclusion sur ces diverses interprétations

Depuis un demi-siècle, les interprétations magnétiques de l'AMBP ont progressé grâce à plusieurs facteurs :

- amélioration des moyens de calcul pour la modélisation avec l'avènement de l'informatique : ceci a permis de faire non seulement des modèles de plus en plus compliqués (3 dimensions), mais aussi d'attaquer la modélisation inverse (stochastique, programmation linéaire).
- acquisition de levés aéromagnétiques à plusieurs altitudes, permettant de mieux appréhender l'allure générale et la structure de l'anomalie, mais surtout d'avoir des données plus précises et plus denses : de ce point de vue, il faut souligner que les levés à basse altitude (600 m), plus riches en informations,

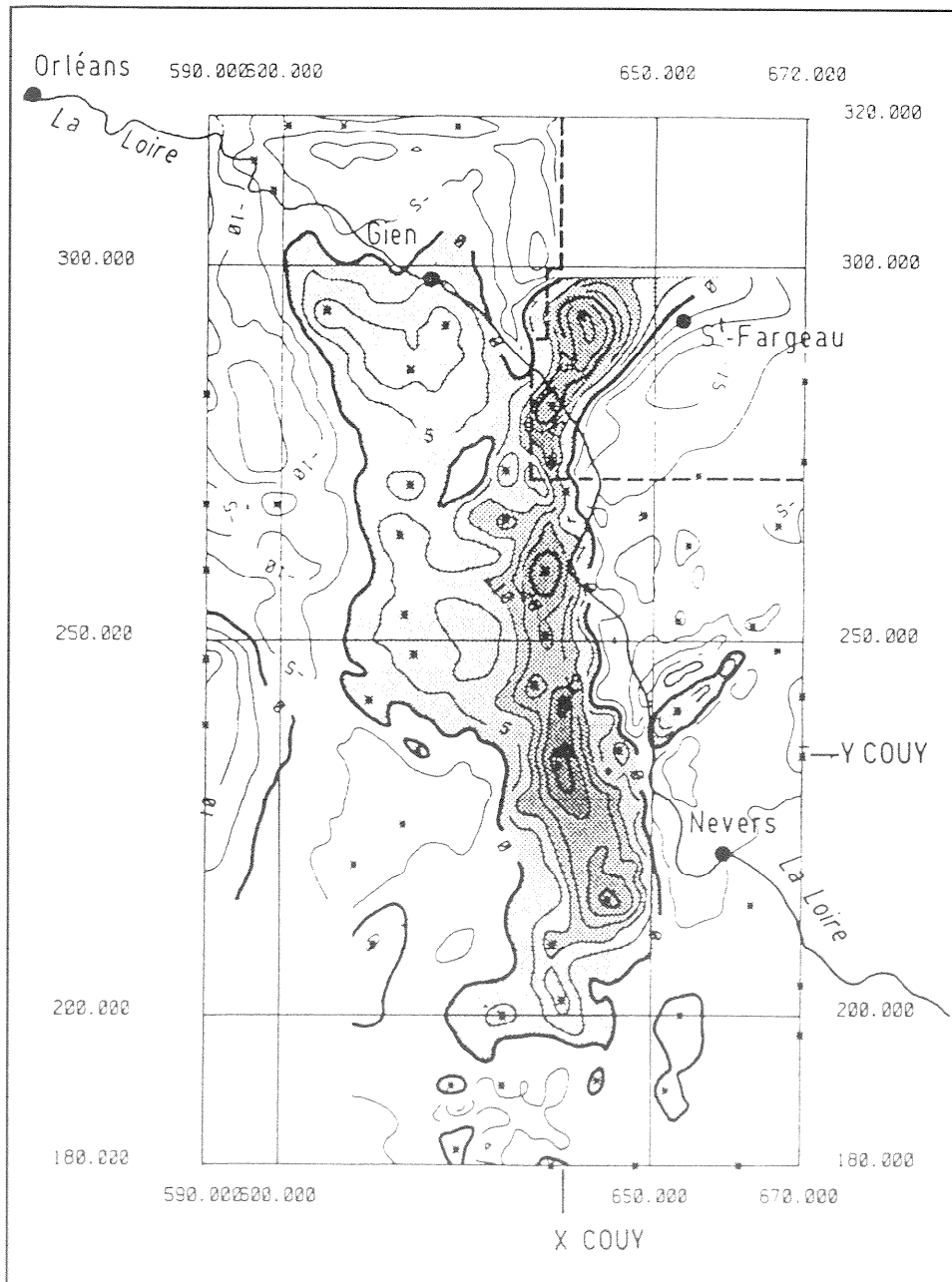


Fig. 18 b. - Gradient magnétique vertical moyen entre 520 m et 3 000 d'altitude au-dessus de la partie méridionale de l'AMBP (P. Mouge, 1991) ; les lignes en tirets délimitent la zone où le gradient a été extrapolé à partir du levé à 3 000 m (faute d'un levé à basse altitude) et où l'anomalie s'étendant vers le nord-est, à l'ouest de St-Fargeau, est bien visible.

▲ COUY borehole

ne sont disponibles qu'au Sud de la Loire. Entre Gien et Paris ces levés existent mais sont la propriété d'un consortium de compagnies pétrolières ; à l'Ouest de Paris, il n'y a pas de levé aéromagnétique à basse altitude couvrant l'AMBP. La disponibilité de levés aéromagnétiques à basse altitude sur l'ensemble de l'AMBP permettrait sans aucun doute une meilleure résolution de la structure de cette anomalie majeure du socle.

— acquisition de données magnétiques dans le forage de Sancerre-Couy ; susceptibilité et aimantation des roches du socle, réalisation d'un profil magnétique vertical. Ces données supplémentaires, couplées aux résultats des sismiques réflexion et réfraction et de la gravimétrie, ont permis de contraindre les modèles soumis au calcul et donc d'avoir une meilleure approche de la profondeur du toit de l'AMBP, sans pouvoir cependant arriver à une solution unique, mathématiquement impossible en l'état des données.

Avant la réalisation du forage, aucun auteur n'avait envisagé la superposition possible de l'effet de deux

corps magnétiques. L'existence de sulfures magnétiques à partir de 2,2 km valide les estimations faites quant à la profondeur maximale du toit de la structure magnétique, supposée unique. Mais les résultats du forage et ceux de l'inversion stochastique de R. Bayer, A. Guillen, D. Rousset (1988) arrivent à la conclusion que cette anomalie magnétique est fort complexe, du moins dans sa partie méridionale où plusieurs causes viennent se superposer :

- effet des roches de la ceinture leptyno-amphibolitique, légèrement magnétiques et peu profondes ;
- effet de sulfures magnétiques à partir de 2,2 km (pyrrhotine pouvant passer à de la magnétite plus en profondeur) : aimantation de l'ordre de 0,4 A/m ;
- effet du corps magnétique principal à plus grande profondeur (7-8 km) avec une aimantation estimée de l'ordre de 1,5 A/m.

Cette complexité était difficilement prévisible avant la réalisation du forage.

Références

- AUTRAN A., CASTAING C., DEBEGLIA N., GUILLEN A., WEBER C. (1986). - Nouvelles contraintes géophysiques et géodynamiques pour l'interprétation de l'anomalie magnétique du bassin de Paris : hypothèse d'un rift paléozoïque refermé au Carbonifère. *Bull. Soc. géol. Fr.*, (8), **2**, pp. 125-141.
- BAYER R., GUILLEN A., WEBER C. (1987). - Investigation par forage profond de l'AMBP (région de Sancerre) : modélisation préalable à partir des données magnétiques et gravimétriques. *C.R. Acad. Sci. Fr.*, (8), **2**, pp. 203-208.
- BAYER R., GUILLEN A., ROUSSET D. (1988). - Réactualisation de l'interprétation de l'AMBP sur la région de Sancerre-Couy. Documents du BRGM, n° 138, pp. 167-178.
- BOYER A. (1984). - Étude de l'anomalie magnétique du bassin de Paris par les méthodes sismologiques et magnéto-telluriques. Thèse 3^e cycle, Université de Paris VI.
- CHARBONNEYRE P., MILLON R. (1986). - Levé magnétique au sol autour du site de forage AMBP près de Couy. Rapport BRGM 86 GPH 065.
- CHENOT D., DEBEGLIA N. (1990). - Three-dimensional gravity or magnetic constrained depth inversion with lateral and vertical variation of contrast. *Geophysics*, vol. 55, n° 3 (March 1990), pp. 327-335, 13 fig.
- CORPEL J., WEBER C. (1968). - Notice de la carte aéromagnétique à 1/80 000, feuille de Nevers.
- DEBEGLIA N. (1970). - Interprétation de l'extrémité sud de l'AMBP. DEA Géoph. Appl., CRG-LGA.
- DEBEGLIA N. (1972). - Notice de la carte gravimétrique à 1/320 000, feuille de Bourges.
- DEBEGLIA N. (1988). - Modélisation comparative des anomalies magnétiques de Gien et de Couy (Cher). Documents du BRGM, n° 138, pp. 139-166.
- DEBEGLIA N. (1988). - Anomalie magnétique du Bassin de Paris. Modélisation comparative des anomalies magnétiques de Gien et de Couy. Rapport BRGM 88 DT 012 GPH.
- DUPIS A., BALTENBERGER P. (1984). - Études sismiques et magnéto-telluriques complémentaires de l'anomalie magnétique du Bassin parisien. Documents du BRGM, n° 81-2, pp. 17-39.
- DUPIS A., BALTENBERGER P., BOYER A., GHORBEL N., MARIE P., PETIAU G., SHOUT H. (1985). - Étude magnéto-tellurique et sismologique complémentaire de l'anomalie supérieure du Bassin parisien. Documents du BRGM, n° 95-2, pp. 47-79.
- GALDEANO A. (1984). - Détermination de la profondeur du toit des sources dans la partie méridionale de l'anomalie magnétique du bassin de Paris. Documents du BRGM, n° 81-2, pp. 185-208.
- GÉRARD A. (1971). - Apport de la gravimétrie à la connaissance de la technique profonde du bassin de Paris. *Bull. BRGM, Fr.* (2), n° 2, 1971.
- GÉRARD A. et WEBER C. (1971). - L'anomalie magnétique du bassin de Paris interprétée comme élément structural majeur dans l'histoire géologique de la France. *C.R. Acad. Sci., Fr.*, **272**, pp. 921-923.
- GÉRARD A. (1973). - L'interprétation par cartes transformées des champs magnétiques et gravimétriques. Application à une étude géophysique du bassin parisien et de l'anomalie magnétique de la Manche. Thèse Université de Strasbourg.
- GOGUEL J. (1954). - Levé gravimétrique détaillé du Bassin parisien. BRGM, n° 15, Paris, Impr. Nat. 1954.
- GUILLEN A., DEBEGLIA N. (1984). - Contribution à l'étude de l'anomalie magnétique du bassin de Paris. Documents du BRGM, n° 81-2, pp. 1-15.
- GUILLEN A. (1985). - Modélisation 3D de l'anomalie magnétique du bassin de Paris. Documents du BRGM, n° 95-2, pp. 29-45.
- GUILLEN A. (1986). - Interprétation de l'anomalie magnétique du bassin de Paris (nouvelle contrainte sismique). Rapport BRGM 86 DT 036 GPH.
- LAMBOLEZ B. (1970). - Notice de la carte aéromagnétique à 1/80 000, feuille de Gien.
- LE MOUËL J. (1969). - Sur la distribution des éléments magnétiques en France. Thèse, Sciences, Paris.
- MENICHETTI V. (1984). - Techniques inverses en gravimétrie et magnétisme. Application à la terminaison sud de l'anomalie magnétique du bassin de Paris. Documents du BRGM, n° 74, 115 p. (avec la collaboration de A. Guillen).
- MOUGE P., AUTRAN A., GALDEANO A. (1991). - The Paris Basin Magnetic Anomaly from the Variscan Belt to the Sancerre-Couy borehole - Document GPF inédit (documentation interne GPF/AMBP, n° 98).
- MOUREAUX T. (1898). - Réseau magnétique de la France au 1^{er} janvier 1896. *Ann. Bur. Central Météo*, pp. 1-57.
- OGIER M. (1971). - Essai d'interprétation de l'AMBP par modèles limités en profondeur. Rapport BRGM 71 GPH 004.
- ROTHER J.-P. (1937). - Contribution à l'étude des anomalies du champ magnétique terrestre. *Ann. Inst. Phys. Globe*, Paris, n° 15.
- SHOUT H., DUPIS A., BARTHES V., FABRIOL H., MARIE P. (1986). - Résultats d'investigations magnéto-telluriques sur l'anomalie magnétique du Bassin parisien. 11^e RST, Clermont-Ferrand, p. 166, Soc. géol. Fr., édit.
- TOURNIER D. (1964). - Étude et interprétation du prolongement méridional de l'AMBP. *Ann. géophys.*, **20**, n° 3, pp. 336-341.
- WEBER C. (1973). - Le socle antétriasique dans la partie sud du bassin de Paris d'après les données géophysiques. *Bull. BRGM Fr.*, Sect. 2, n° 2 et 3, pp. 219-343.