

Diagraphies magnétiques dans le forage de Sancerre-Couy

Robert GABLE ⁽¹⁾, Raymond MILLON ⁽¹⁾, Alain TABBAGH ⁽²⁾

Mots-clés : Diagraphie magnétique, Socle, Couverture sédimentaire, Sondage profond.
Cher département (Sondage GPF Sancerre-Couy), Bassin parisien.

Mesures réalisées

Au cours des différents stades d'avancement du forage de Sancerre-Couy, plusieurs diagraphies de susceptibilité magnétique, de champ magnétique ou une combinaison de ces deux paramètres, ont été réalisées avec divers instruments (voir tableaux synoptiques en fin du chapitre « Introduction ») :

- sonde ROMULUS
sonde électromagnétique développée au BRGM sous licence CNRS/CRG-Garchy pour mesurer la susceptibilité magnétique et la conductivité électrique des roches ; l'espacement — et donc la résolution — entre émetteur et récepteur est de 0,85 m, fréquence 4 kHz.
Forage Couy 1a : 0 à 450 m (octobre 1986)
444 à 1 200 m (février 1987)
1 200 à 1 800 m (mars 1987)
Forage Couy 1bis : 340 à 990 m (mai 1987)
Forage Couy 1b : 1 800 à 3 450 m (novembre 1987)
- sonde marine du CRG Garchy :
même principe que la sonde ROMULUS mais avec un espacement émetteur-récepteur plus grand (1,6 m) et trois fréquences (109, 437 et 1 750 Hz).
Forage Couy 1a : 1 800 à 2 200 m (novembre 1987)
- sonde MAGLOG
appareillage développé et mis en œuvre par la société canadienne MAGLOG et mesurant la susceptibilité et le champ magnétique total.
Forage Couy 1a : 450 à 500 m (décembre 1986)
- sonde GPIT modifiée :
outil de trajectographie Schlumberger (General Purpose Inclination tool) modifié pour mesurer les variations des trois composantes du champ magnétique total avec une précision de l'ordre de 10 à 20 nT.

Forage Couy 1a : 1 800 à 2 687 m (juillet 1987)

Forage Couy 1b : 1 800 à 3 500 m (novembre 1987)

- sonde LETI
magnétomètre différentiel à double résonance, très sensible — 0,1 nT — développé au CEA (Div. LETI) dans le cadre d'un projet de magnétostratigraphie regroupant le CEA-LETI, Total-CFP, le laboratoire de géologie de l'ENS et le CRG de Garchy.

Forage Couy 1a : 20 à 440 m (octobre 1986)

Couy 1b : 450 à 1 800 m (avril 1987)

Cet appareil n'a pas été utilisé au-delà de 1 800 m car son capteur ne supportait pas une température dépassant 67 °C.

- Magnétomètre fluxgate triaxial :
développé dans le cadre du projet KTB par l'Université Technique de Brunswick (F. Kuhnke et Musmann). Sa sensibilité est de 0,1 nT et il possède deux inclinomètres associés.

Forage Couy 1b : 1 800 à 3 170 m (février 1991) ; le tubage métallique était posé jusqu'à 1 800 m, le forage était obstrué à 3 200 m.

Les sondes de susceptibilité magnétique présentent une légère dérive avec la température ; un recalage a été fait grâce aux mesures systématiques sur échantillon :

- dans le sédimentaire, un échantillon cylindrique prélevé tous les 0,5 m a été mesuré au CFR (Centre des faibles radioactivités de Gif-sur-Yvette) par l'équipe de P. Tucholka ;
- dans le socle, les mesures ont été faites sur les carottes à l'aide d'appareils à mesure rapide (Kappamètre, Susceptibilité-mètre BISON) avec un intervalle égal ou inférieur à 0,5 m. Par ailleurs, le LETI a effectué des mesures en continu sur des tronçons de carottes avec un magnétomètre à SQUID.

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

(2) CNRS, CRG Garchy et Université de Paris VI.

Les unités utilisées en géomagnétisme

Induction magnétique (improprement appelée champ magnétique) :

exprimée en gammas, ou nano Tesla (nT), sous-multiple de l'unité du Système International (SI). A Couy, le module du « champ » à la surface du sol est voisin de 47 000 nT.

Susceptibilité magnétique par unité de volume

Rapport sans unité dont la définition et donc la valeur numérique dépendent du système d'unités.

Roches sédimentaires → Roches éruptives magnétiques
depuis $10 \cdot 10^{-5}$ SI jusqu'à $5\,000 \cdot 10^{-5}$ SI (serpentes)

(diviser ces valeurs par 4π pour obtenir la susceptibilité en uem CGS).

Aimantations

exprimées dans le Système International en A/m (ampère par mètre)

(diviser les valeurs en A/m par 1 000 pour obtenir les aimantations en uem CGS ou oersted).

Susceptibilité magnétique : mesures sur échantillons et diagraphies (A. Tabbagh *et al.*, 1988 et R. Gable, 1988)

Dans le sédimentaire (fig. 1 et 2)

La partie du forage 1 dans le sédimentaire, de 440 m à 940 m, a été polluée par des fragments de métal, c'est pourquoi nous juxtaposons la diagraphie de susceptibilité du forage 1a et celle du forage 1bis.

Seule la première a été recalibrée à l'aide des mesures sur échantillons. La deuxième montre une dérive entre 200 et 250 m.

Les deux cents premiers mètres montrent une susceptibilité très basse (entre 7 et $10 \cdot 10^{-5}$ SI) avec cependant un pic repère ($60 \cdot 10^{-5}$ SI) caractéristique d'une mince couche de calcaire à oolithes ferrugineuses et pyrite, à la partie supérieure du calcaire de Dejointes.

C'est dans les marnes du Toarcien supérieur que la susceptibilité croît notablement jusqu'à un palier de 20 à $25 \cdot 10^{-5}$ SI pour les marnes et argiles du Toarcien moyen (210 à 308 m). Le calcaire marneux du Toarcien inférieur revient à des valeurs de l'ordre de 10 à $15 \cdot 10^{-5}$ SI après deux pics à 299 et 308 m qui pourraient caractériser respectivement un banc calcaire perforé et le conglomérat de base du Toarcien moyen.

Les marnes noires du Domérien et du Carixien (382 à 430 m) montrent une susceptibilité un peu plus forte (20 à $25 \cdot 10^{-5}$ SI). En dessous, les roches calcaires et gréseuses du Sinémurien et de l'Hettangien ont une susceptibilité de 15 à $20 \cdot 10^{-5}$ SI jusqu'à 560 m, où l'on observe une brusque augmentation au passage dans les argiles de Châlain ($30 \cdot 10^{-5}$ SI). La susceptibilité reste, à

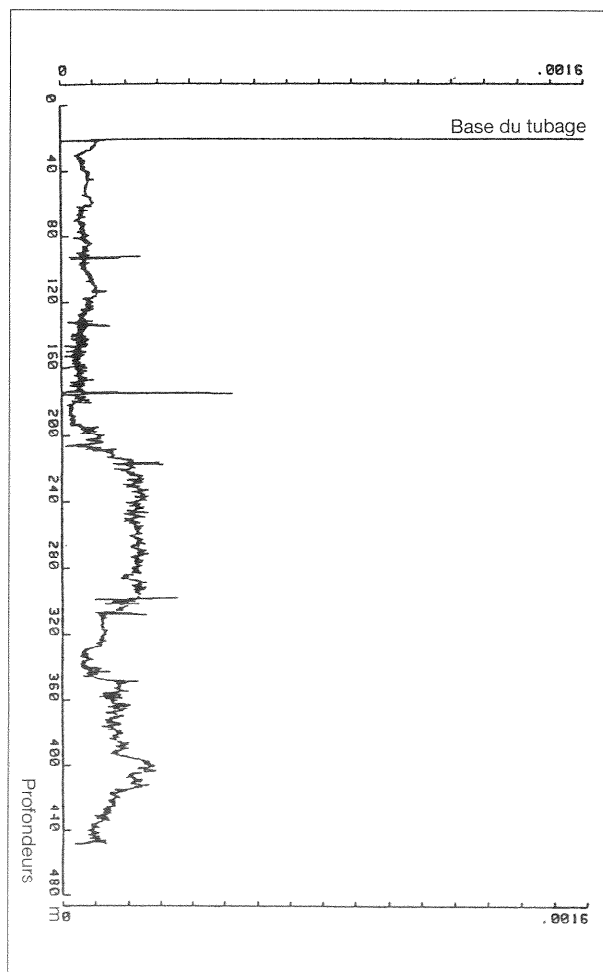


Fig. 1. - Mesures obtenues avec la sonde ROMULUS - Forage 1.

ce niveau, très fluctuante jusqu'aux grès infra-anhydritiques du Trias moyen (~ 720 m) qui montrent un creux de l'ordre de $10 \cdot 10^{-5}$ SI, tout comme pour le grès et les conglomérats de la base du Trias moyen (790 - 810 m) et le Permien sous-jacent.

Dans le socle (fig. 3 et 4)

Les susceptibilités augmentent de façon très importante : en moyenne, elles sont 2 à 3 fois plus fortes que dans le sédimentaire :

- de 950 à 1 127 m : la susceptibilité varie largement autour d'une valeur moyenne de $50 \cdot 10^{-5}$ SI (amphibolites) ;
- de 1 127 à 1 130 m : une passée de microgranite se traduit par une chute de la susceptibilité ($10 \cdot 10^{-5}$ SI) ;
- de 1 130 à 1 212 m, les orthogneiss amènent la susceptibilité à environ $20 \cdot 10^{-5}$ SI ;
- de 1 212 à 1 377 m, la susceptibilité fluctue entre 15 et $30 \cdot 10^{-5}$ SI : ces variations sont dues aux alternances d'amphibolites et d'orthogneiss ;
- de 1 377 à 1 472 m, (orthogneiss à biotite), la susceptibilité est assez constante ($30 \cdot 10^{-5}$ SI) ;
- à partir de 1 472 m, et jusqu'à 1 760 m la susceptibilité augmente de façon caractéristique ($60 \cdot 10^{-5}$ SI) car les

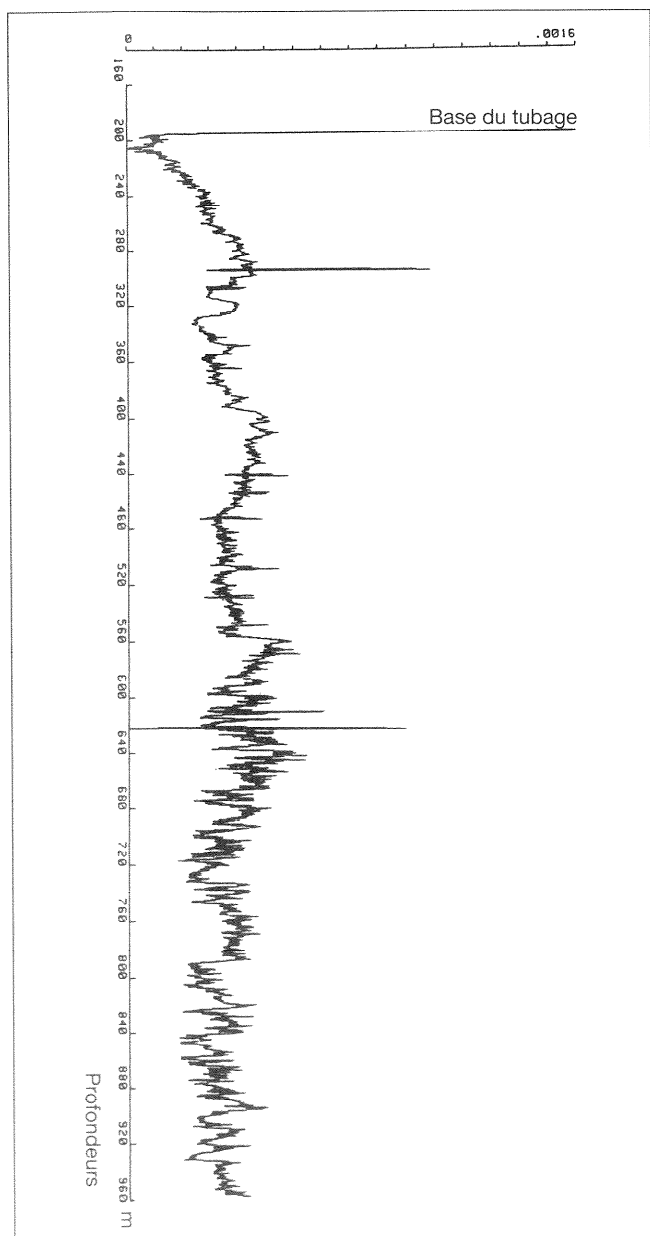


Fig. 2. - Mesures obtenues avec la sonde ROMULUS - Forage Ibis (A. Tabbagh *et al.*, 1988).

amphibolites dominant sur les orthogneiss ; on notera une passée nettement plus magnétique de 1 620 à 1 630 m (80 à 90° SI).

Au-delà de 1 800 m (fig. 5), le log de susceptibilité magnétique montre un niveau de base moyen variant de 30 à $60 \cdot 10^{-5}$ SI, perturbé par des anomalies variant de 150 à $350 \cdot 10^{-5}$ SI. L'extension de ces anomalies est le plus souvent métrique ou décimétrique, elle peut être ponctuelle. Les variations de la susceptibilité peuvent être divisées en six domaines :

- de 1 800 à 1 890 m, zone calme et homogène à $30 \cdot 10^{-5}$ SI (amphibolites) ;
- de 1 890 à 2 175 m, légère augmentation de la susceptibilité jusqu'à $60 \cdot 10^{-5}$ SI (amphibolites) et anomalie atteignant $150 \cdot 10^{-5}$ SI de 2 035 à 2 055 m (amphibolites à pyroxène à grenat) ;
- de 2 175 à 2 410 m, zone calme de $30 \cdot 10^{-5}$ SI (amphibolites) avec trois anomalies métriques (2 340, 2 360 et 2 370 m) :

- de 2 410 à 2 495 m, zone anomalique importante atteignant 200 à $300 \cdot 10^{-5}$ SI (pyroxéno-amphibolites à grenat) ;
- de 2 495 à 2 800 m, zone calme à $50 \cdot 10^{-5}$ SI (gneiss) ;
- de 2 800 à 2 980 m, zone perturbée, de niveau de base à $80 \cdot 10^{-5}$ SI, avec des anomalies métriques variant de 130 à $350 \cdot 10^{-5}$ SI (alternances de lamprophyres et de gneiss).

Au-delà de 3 000 m, le log de susceptibilité n'est plus fiable car la sonde ROMULUS a été endommagée par les conditions limites de température et surtout de pression auxquelles elle était soumise. Le log montrait alors des à-coups (sautes) et il a été reconstitué tant bien que mal sur la figure 10 sauf pour le passage 3 140-3 180 m.

De 1 800 m à 3 000 m (fig. 9), on observe de bonnes corrélations entre la susceptibilité Romulus et le champ magnétique, tant au niveau des événements ponctuels (pics entre 2 350 et 2 400 m, entre 2 900 et 2 950 m) que d'événements plus étendus (passées décimétriques de 2 030 à 2 100 m, de 2 400 à 2 500 m).

La susceptibilité montre de bonnes corrélations avec l'ensemble des logs de porosité et de gamma-ray ; aux passées poreuses et déconsolidées correspondent des passées à déficit de susceptibilité ; les passées peu poreuses et moins altérées sont plus susceptibles. Ceci se voit dans les zones calmes du log de susceptibilité, et les variations mises en jeu sont faibles (environ $20 \cdot 10^{-5}$ SI).

Le comportement vis-à-vis du gamma-ray est ambivalent :

- de 1 800 à 2 800 m et de 3 000 à 3 200 m, gamma-ray et susceptibilité sont en opposition ;
- de 2 800 à 2 950 m, ils sont en corrélation.

On peut conclure que, hormis les pics importants de susceptibilité associés à des pics de conductivité, vraisemblablement dus à la présence de filonnets de pyrrhotine, la majeure partie des variations de susceptibilité est en relation avec la porosité, les zones les plus fraîches étant les plus susceptibles.

Diagraphies du champ magnétique dans le sédimentaire

(A. Tabbagh *et al.*, 1988 et 1992)

0-400 m (Magnétométrie LETI)

Jusqu'à 140 m de profondeur, les mesures sont influencées par la plate-forme de forage ; au-delà, les conditions de mesures sont très bonnes ; la figure 6 représente :

a) la valeur théorique des variations du module du champ magnétique, calculée à partir des susceptibilités et des aimantations remanentes naturelles (ARN) des carottes ;

b) le module du champ mesuré avec le magnétomètre LETI ;

b-a) une information haute fréquence difficile à interpréter, mais dont la valeur moyenne constitue le gradient local du champ magnétique : 57 nT/km, bien

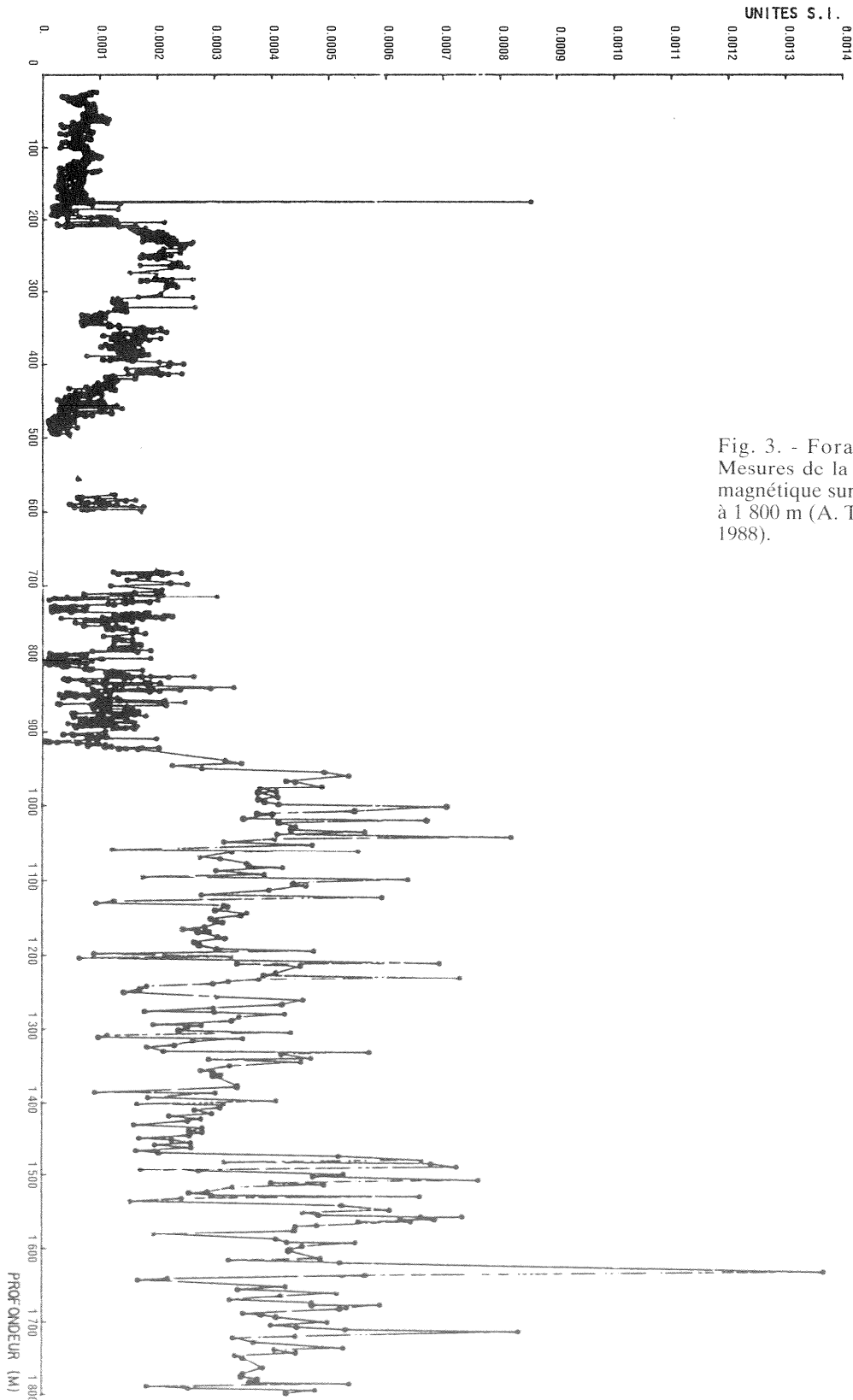


Fig. 3. - Forage Couy 1a. Mesures de la susceptibilité magnétique sur carottes de 0 à 1 800 m (A. Tabbagh *et al.*, 1988).

plus fort que le gradient du champ dipôle à la latitude de Couy : 20 nT/km.

440-938 m (Magnétométrie LETI)

La pollution de cette partie du forage par des pièces métalliques a perturbé les diagraphies magnétiques et il est préférable de montrer les résultats obtenus dans le

forage 1 bis à 60 m au sud du forage principal (fig. 7) : une fois filtrée, la diagraphie du forage principal est bien comparable à celle du forage 1 bis. L'évolution du champ s'y montre toutefois beaucoup plus complexe que pour la 1^{re} tranche.

Après avoir crû jusque vers 400 m, le module du champ, F , décroît jusque vers 550 m pour croître à nou-

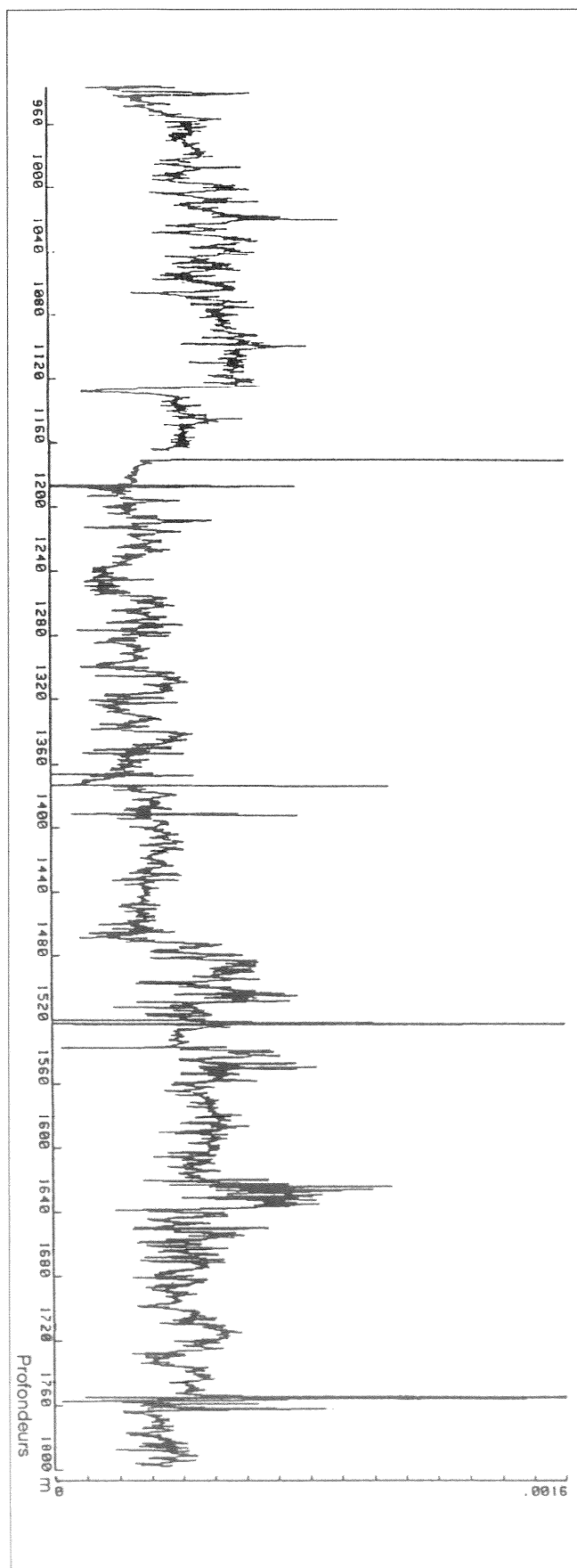


Fig. 4. - Diagraphies de susceptibilité ROMULUS dans le forage de Couy 1a de 1 170 à 1 800 m (A. Tabbagh *et al.*, 1988).

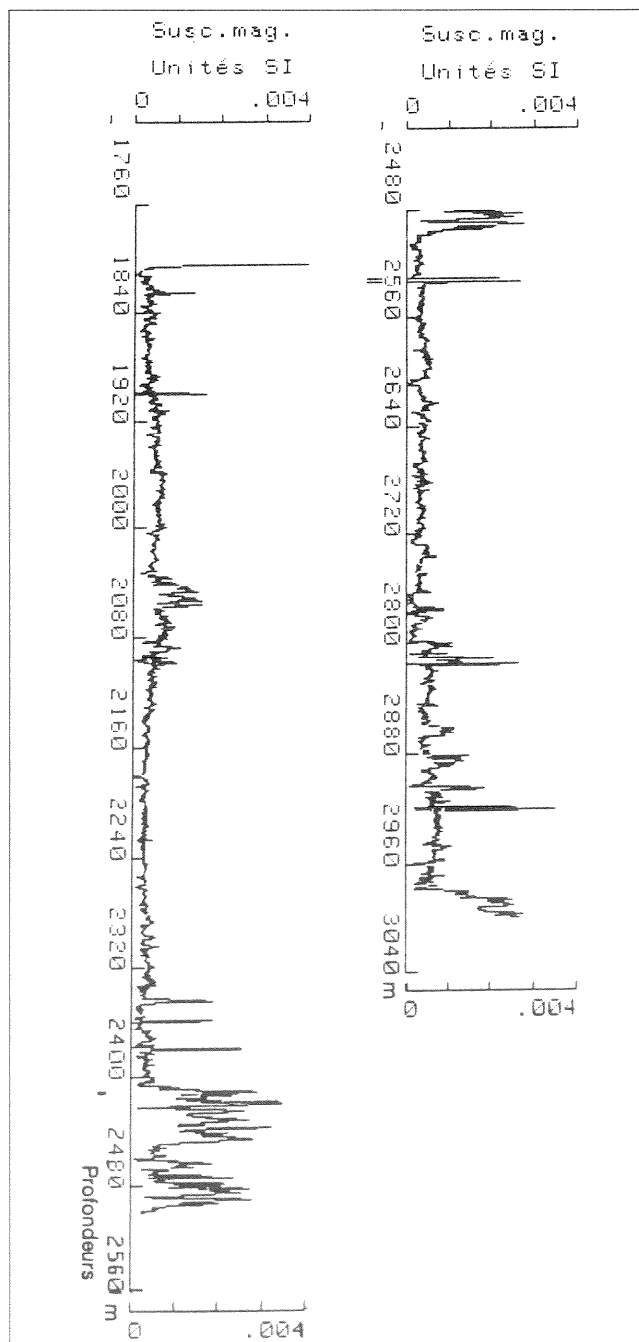


Fig. 5. - Diagraphies de susceptibilité ROMULUS dans le forage de Couy 1a et 1b de 1 800 à 3 000 m (R. Gable *et al.*, 1988).

veau à partir de 750 m, la variation entre 750 et 950 m atteignant environ 60 nT. Cette variation est plus forte que celle que l'on pourrait attendre du changement des valeurs moyennes de susceptibilité entre le sédimentaire et le socle, et, ni son allure, ni sa position ne peuvent correspondre à cette hypothèse.

Diagraphies du champ magnétique dans le socle (A. Tabbagh *et al.*, 1988 et 1992)

Jusqu'à 1 800 m (fig. 8), les mesures effectuées avec le magnétomètre à haute sensibilité (LETI) montrent

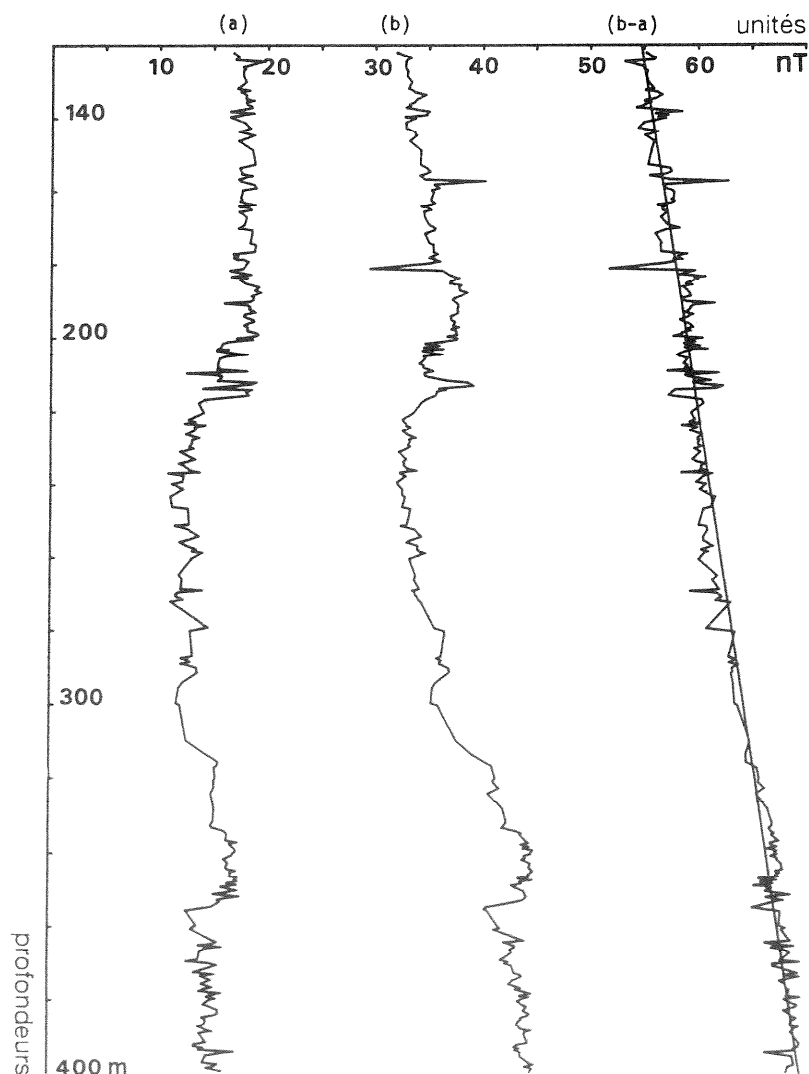


Fig. 6. - Résultats obtenus dans le sédimentaire de 140 m à 400 m (A. Tabbagh *et al.*, 1988).

Évolution du champ magnétique à la traversée de corps aimantés

A notre latitude, l'entrée dans un corps magnétique massif ayant une aimantation parallèle au champ magnétique actuel, provoque un créneau négatif sur le champ total (L. Daly et A. Tabbagh, 1988) : ainsi, par exemple, un contraste d'aimantation positif de 1 A/m donnera une diminution du champ de 900 nT.

Si, au lieu d'un seul corps magnétique, on traverse une série de plusieurs petites passées magnétiques, on observera de fortes variations en dents de scie du champ magnétique autour d'une variation plus étalée et plus faible.

Si l'aimantation augmente de façon continue avec la profondeur, le champ diminuera corrélativement de façon continue et l'on observera alors un gradient négatif prononcé.

une oscillation de grande amplitude et de grande longueur d'onde présentant un maximum vers 1 080 m et un minimum vers 1 450 m, l'écart entre ces deux extrêmes étant proche de 60 nT, puis d'une oscillation

de moindre amplitude avec une longueur d'onde dominante hectométrique. Ces oscillations ne peuvent pas être expliquées par les variations de susceptibilité ou d'aimantation rémanente des formations directement recoupées par le forage. La seule cause possible est la présence à côté du forage d'un ou de plusieurs corps plus magnétiques. Il y a une infinité de solutions possibles à ce problème inverse et on ne peut dire que peu de choses sur ce (ou ces) corps si ce n'est que l'ordre de grandeur de sa taille et de sa distance au forage est de une ou quelques centaines de mètres et qu'un corps situé au nord du forage et centré à 1 200 m de profondeur pourrait convenir. Cette anomalie locale oblitère le gradient magnétique que l'on avait décelé sur la 1^{re} tranche du sédimentaire.

De 1 800 à 2 700 m, on dispose de moins d'informations puisque la susceptibilité ou l'aimantation rémanente ne sont connues pour l'instant que par les carottes qui, elles-mêmes, ne sont plus orientées. Dans le forage 1a, le module du champ magnétique (fig. 9) présente des variations hautes fréquences et de grande amplitude (100 à 200 nT), qui sont vraisemblablement à relier à des variations de susceptibilité ou d'A.R.N. des formations traversées, et une dérive générale plus forte que dans le sédimentaire qui correspond sur 1 000 m à une

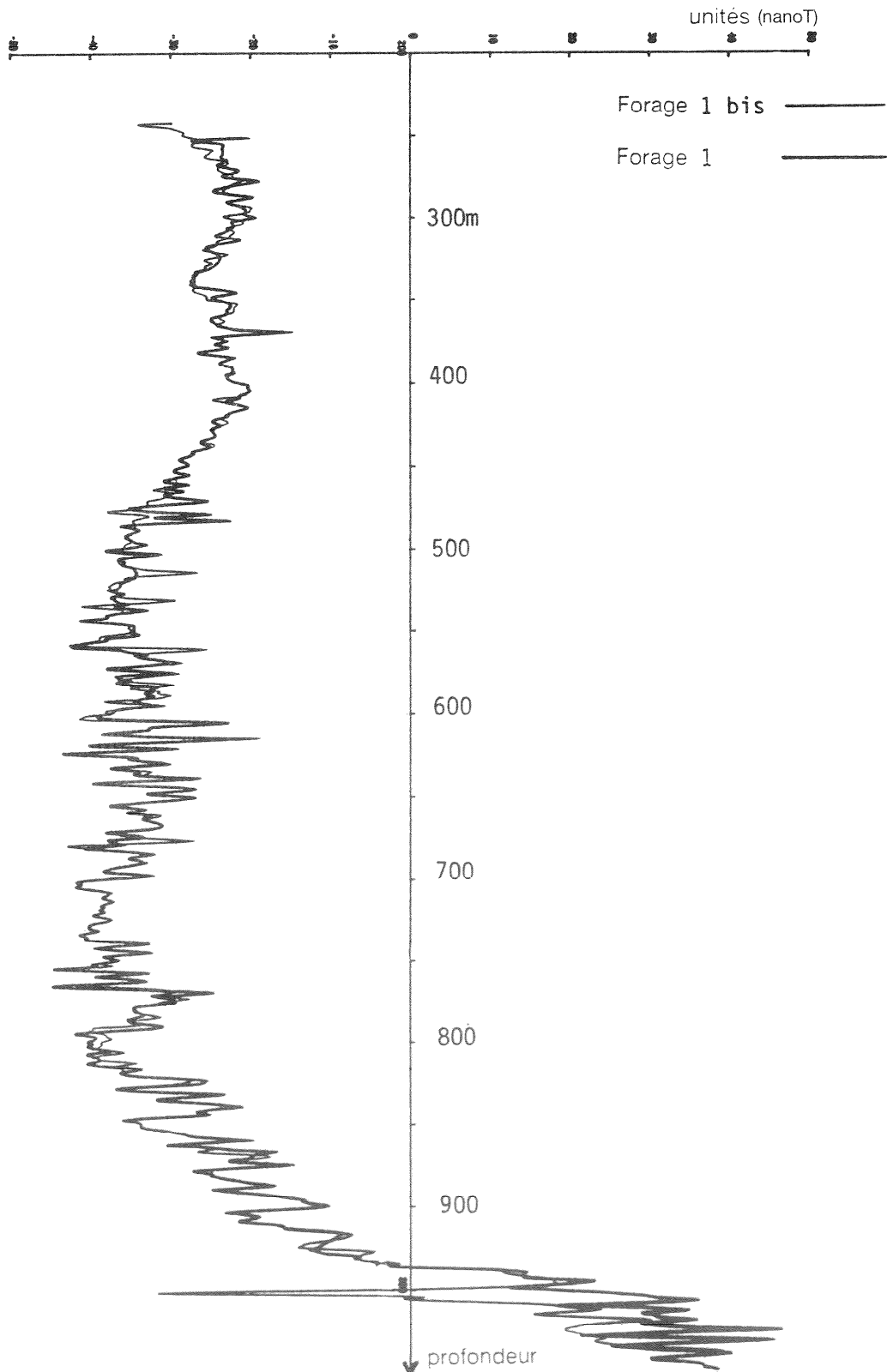


Fig. 7. - Résultats obtenus dans le sédimentaire de 440 m à 938 m (A. Tabbagh *et al.*, 1988).

diminution de 200 nT environ. Une telle évolution correspond (sous réserve des incertitudes liées à l'outil) à la présence, à proximité du forage, d'un ou de plusieurs corps magnétiques sans qu'il soit possible d'en donner la forme ou le contraste de susceptibilité.

Dans le forage 1b, on retrouve des variations intenses et rapides du champ magnétique (fig. 10) en corrélation avec le log de susceptibilité magnétique, et

dues aux veinules de pyrrhotine, à l'exception de l'anomalie rencontrée vers 2 750 m dont le corps responsable est très proche de forage, mais sans que celui-ci ait recoupé. La dérive générale, plus faible, est proche de 50 nT/km. La comparaison entre les deux forages 1a et 1b suggère donc l'existence d'un gradient horizontal dans la direction approximative NW-SE, sans qu'il soit possible d'en dire plus.

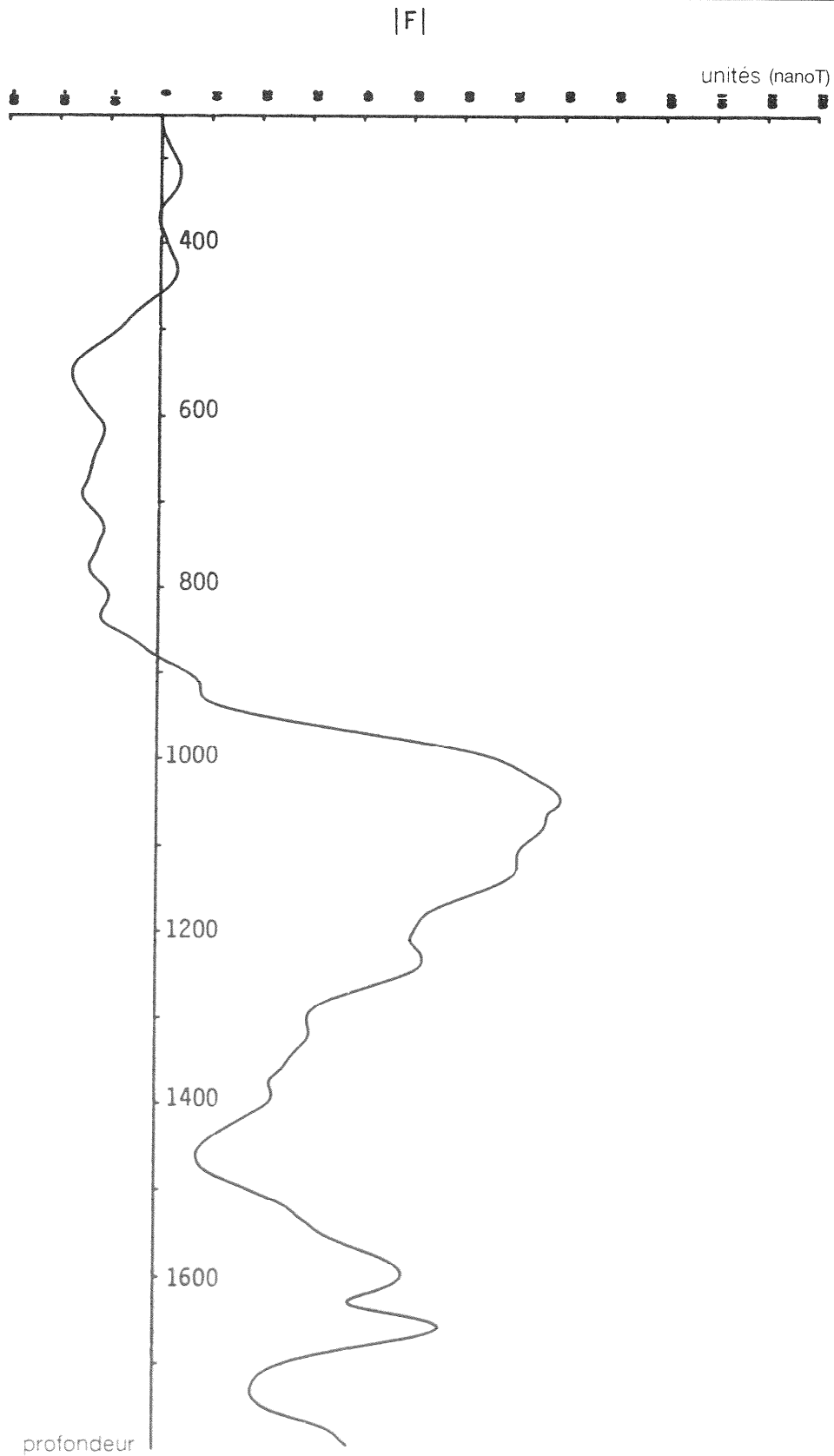


Fig. 8. - Évolution générale du champ magnétique dans le forage 1a de Sancerre-Couy (magnétométrie LETI) (A. Tabbagh *et al.*, 1988).

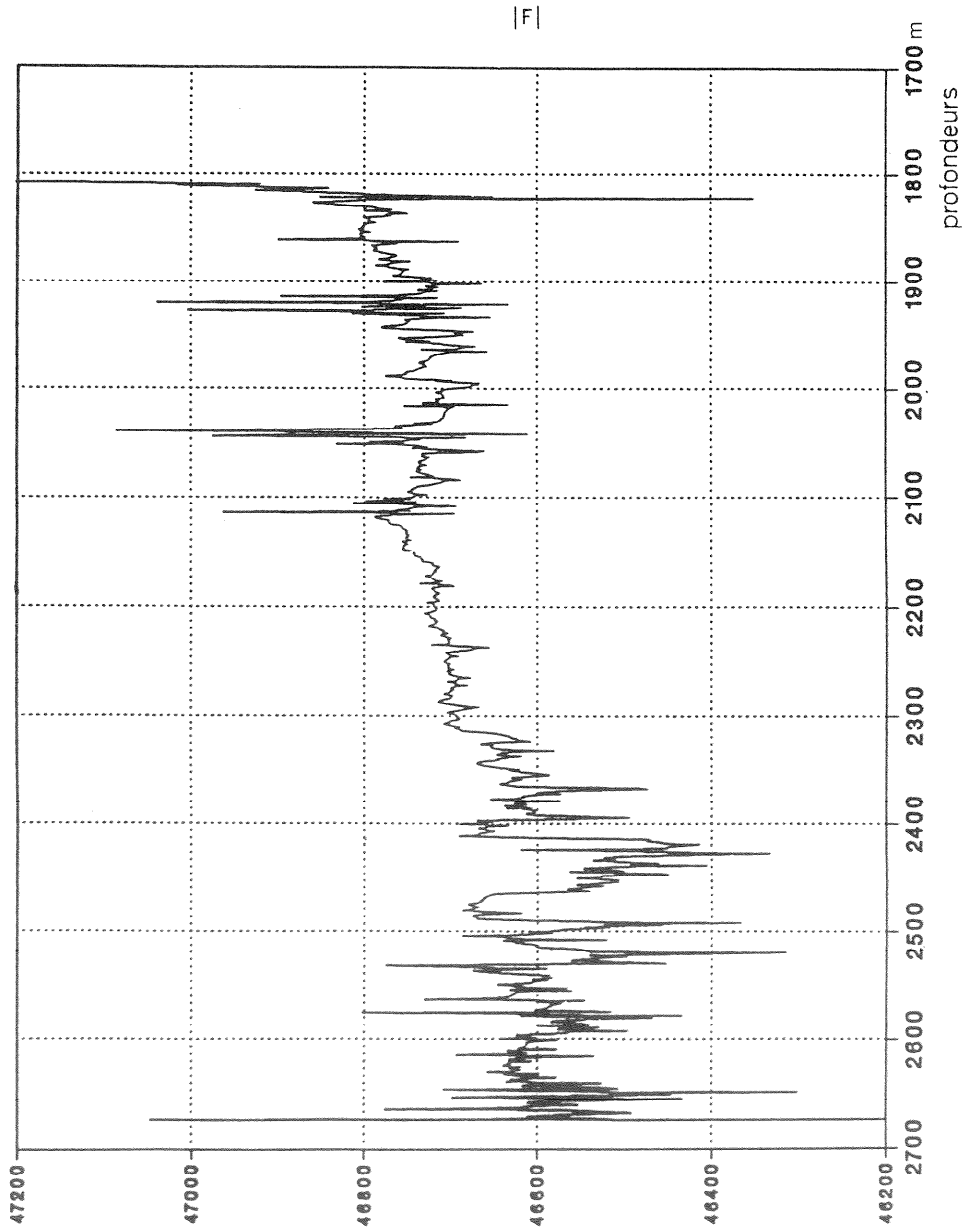


Fig. 9. - Log magnétique dans le forage 1a de Sancerre-Couy, obtenu avec le GPIT modifié de Schlumberger (A. Tabbagh *et al.*, 1988).

Diagraphie magnétique faite avec le magnétomètre fluxgate de l'Université technique de Brunswick

(F. Kuhnke, A. Tabbagh, F. Fieberg, 1992)

Le magnétomètre haute précision du LETI (0,1 nT) n'avait pu être mis en œuvre que jusqu'à 1 800 m pour des raisons de température : au-delà de cette profondeur, les diagraphies magnétiques avaient été faites avec le GPIT modifié de Schlumberger dont la sensibilité était moindre (10 nT). Aussi le développement d'un magnétomètre fluxgate à trois composantes (précision 0,1 nT) par l'Université technique de Brunswick dans le cadre de programme KTB constituait une bonne occasion de faire une comparaison entre les appareils, et d'étendre la diagraphie magnétique de précision au-delà de 1 800 mètres.

La figure 11a montre que le gradient magnétique est faible jusqu'à 2 900 m et qu'il n'y a que peu de changement dans la valeur moyenne du champ magnétique avec la profondeur. C'est au-delà de 2 900 m que le gradient augmente notablement, ce qui pourrait correspondre soit au rapprochement d'un corps magnétique profond, soit à la diminution de l'aimantation du milieu traversé par le forage.

La concordance avec la diagraphie de 1987 (fig. 11b) n'est pas parfaite :

- à partir de 2 400 m, la diagraphie de 1987 (courbe du milieu) montrait deux ensembles de pics négatifs qui correspondent probablement à de la pyrrhotine. La diagraphie de 1991 retrouve bien ces deux pics mais celui à 2 400 m a changé de signe ; en outre, deux pics positifs nouveaux apparaissent au-delà de 3 000 m.
- sur les courbes fortement lissées (courbes de droite), il y a bien un maximum vers 2 600 m, mais

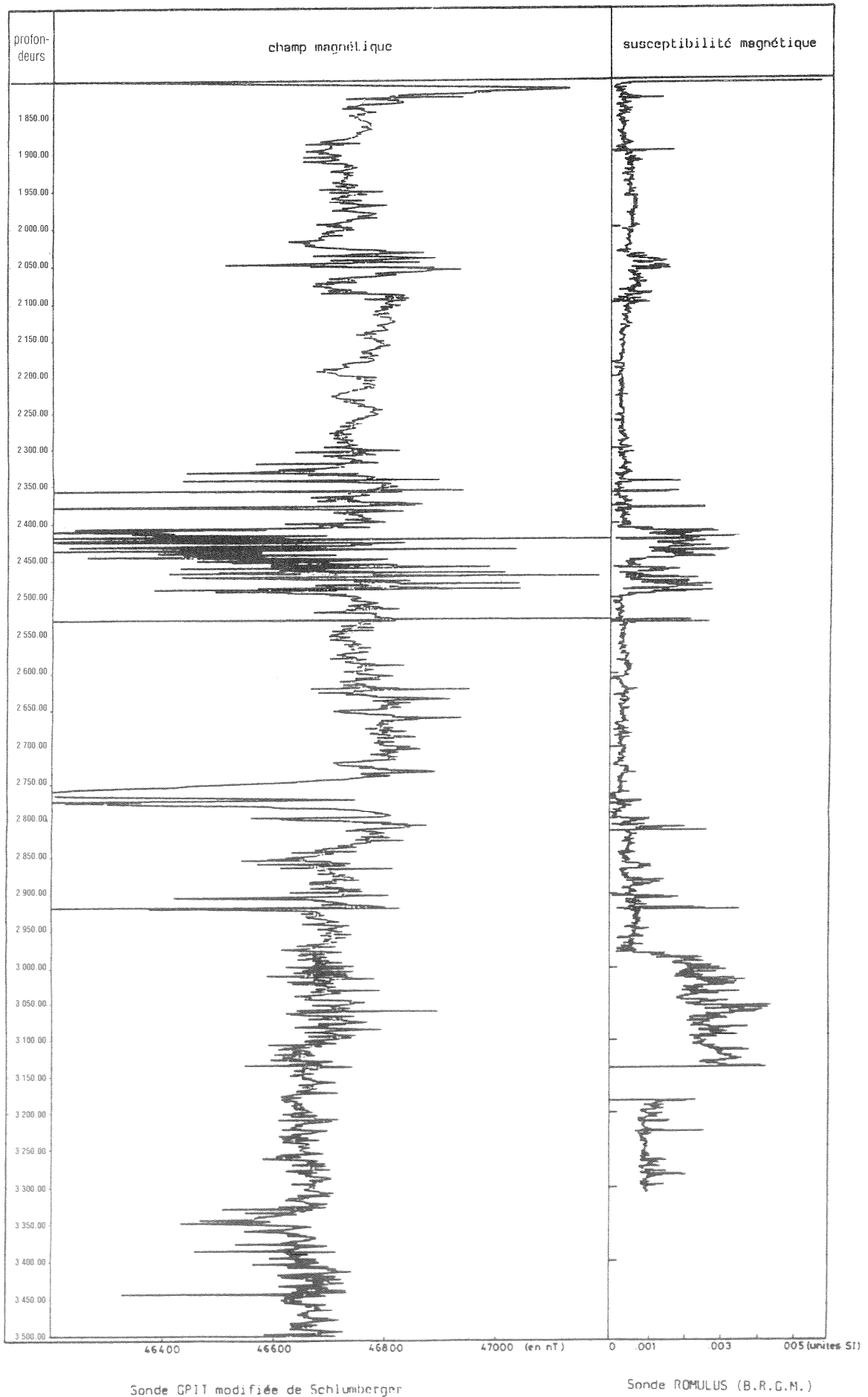


Fig. 10. - Comparaison entre les logs de susceptibilité et de champs magnétiques dans le forage 1 b de Sancerre Couy (R. Gable *et al.*, 1988).

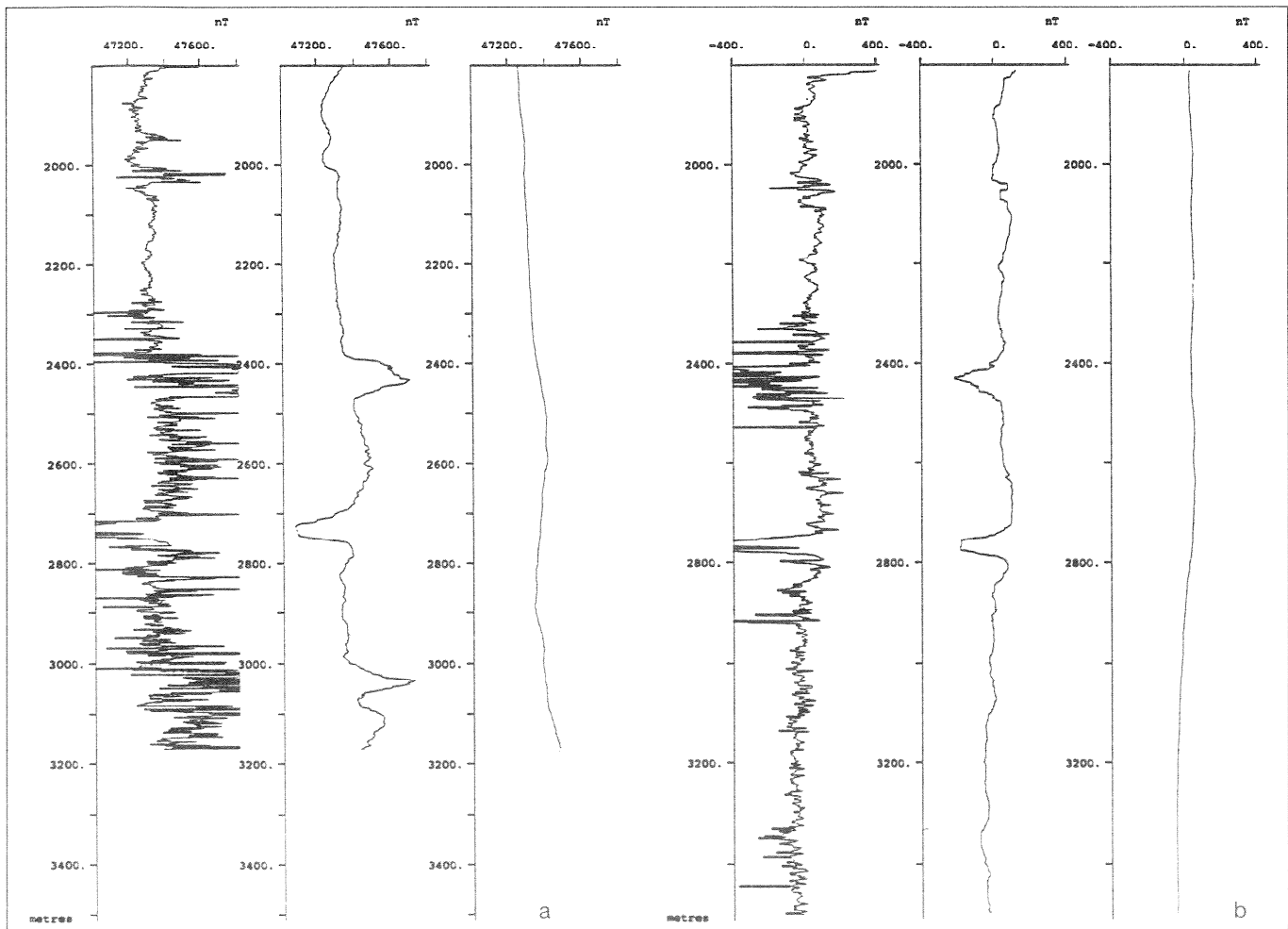


Fig. 11. - Diagraphies magnétiques au-delà de 1 800 m dans le forage de Couy 1b

a) magnétomètre fluxgate de l'Université de Brunswick
- 1^{er} février 1991

b) GPIT modifié de Schlumberger - 24 novembre 1987

Courbes à gauche : filtrage par médiane mobile sur fenêtre de 1 m (a) et 2 m (b) respectivement
 Courbes au centre : » » » » de 50 m
 Courbes à droite : » » » » de 400 m

(F. Kuhnke *et al.*, 1992).

tandis que la diagraphie de 1987 montre une diminution du champ avec la profondeur, la nouvelle diagraphie montre un accroissement.

Plusieurs explications peuvent être avancées :

- pollution du forage à certaines profondeurs (3 000 m) par des pièces métalliques provenant des diverses expériences faites dans le forage pendant trois années : les pics intenses ainsi provoqués altèrent le lissage par médiane ;
- évolution chimique des minéraux au contact de l'eau du forage : ces minéraux perdraient ainsi une partie de leurs propriétés magnétiques.

Le pic négatif à 2 750 m, détecté lors des deux essais, ne marquait pas sur la diagraphie de susceptibilité (fig. 5) et il en a été conclu que le corps magnétique responsable était très proche du forage sans être recoupé par lui : ceci est une démonstration a contrario de la deuxième explication exposée plus haut. Le

contraste d'aimantation de ce corps a été calculé et s'élèverait à 0,7 A/m, résultat qui s'accorde avec l'aimantation proposée par G. Dubuisson à partir de mesures faites sur carottes renfermant de la pyrrhotine.

Conclusions

Une incertitude, qui ne pourra pas être levée en l'absence d'un outil de diagraphie mesurant à la fois le champ magnétique et la susceptibilité, existe sur le rôle de l'aimantation rémanente : les mesures sur carotte montrent en effet, par endroits, des valeurs élevées d'aimantation rémanente, dont on ne connaît pas la direction dans le plan horizontal puisque les carottes ne sont pas orientées, et qui est susceptible de très rapides changements d'orientation, puisqu'il arrive d'avoir sur

une même carotte, à très peu de distance, des orientations diamétralement opposées. Néanmoins, l'existence de fortes aimantations rémanentes est l'indice d'une augmentation de la teneur en minéraux magnétiques. La diagraphie magnétique permet cependant de disposer d'une information globale sur l'aimantation rémanente, l'existence de pics importants montre sans ambiguïté qu'elle peut localement atteindre des valeurs élevées mais l'absence d'une variation d'ensemble importante du champ montre qu'il n'y a pas une évolution d'ensemble de l'ARN avec la profondeur et qu'en définitive sa contribution à l'AMBP reste mineure, comme l'est celle de l'aimantation induite.

Si l'on excepte le gradient magnétique de 57 nT/km mis en évidence dans les quatre cents premiers mètres

du forage, il n'a pas été possible de déterminer de façon certaine d'autres gradients plus en profondeur à cause de l'oblitération des diagraphies magnétiques par des pics intenses provenant de veinules de pyrrhotine ou autres matériaux magnétiques à proximité du forage. Cette connaissance du gradient magnétique au fond du forage aurait permis de mieux estimer la distance qui restait à forer jusqu'au corps responsable de l'AMBP.

Cependant, il est possible de conclure que l'absence de crêneaux importants dans la diagraphie du champ magnétique prouve que le forage n'a pas pénétré dans le corps responsable de l'AMBP dont l'aimantation est certainement plus élevée que les passées magnétiques recoupées dans le socle.

Références

DUBUISSON G. (1993). - High temperature magnetization of the pyrrhotite-bearing rocks from the GPF Couy borehole and relations with the magnetic high from the Paris basin. A possible source for the anomaly. *Scientific Drilling* (sous-presse).

GABLE R. (1988). - Forage de Sancerre-Couy 1b. Mesures de la température et du gradient thermique à l'équilibre, après pompage. Documents du BRGM, n° 138, pp. 221-234.

GABLE R., LEBERT F. (1988). - Diagraphies de susceptibilité magnétique (ROMULUS) dans le forage de Sancerre-Couy. Documents du BRGM, n° 138, pp. 67-76.

KUHNKE F., TABBAGH A., FIEBERG F. (1922). - New magnetic field log in GPF3 Couy-Sancerre borehole. *Scientific Drilling*, n° 3, pp. 221-224.

MILLON R., LORENZ C. (1988). - Principaux résultats des diagraphies du forage de Sancerre-Couy (partie sédimentaire 0-950 m). Documents du BRGM, n° 138, pp. 33-52.

TABBAGH A., ALVAREZ R., BAYER R., GUILLEN A., HUTIN R., LEBERT F., MARTIN J.-P., MILLON R., POCACHARD J., POZZI J.-P., SMITH B., TUCHOLKA P. (1988). - Évolution du champ magnétique et de la susceptibilité avec la profondeur. Documents du BRGM, n° 138, pp. 77-95.