

## Forage scientifique de Sancerre-Couy : propriétés magnétiques de la pyrrhotine

Brigitte SMITH <sup>(1)</sup>, Jean-Pierre POZZI <sup>(2)</sup>, Gilles DUBUISSON <sup>(2)</sup>, Alain TABBAGH <sup>(3)</sup>

Mots-clés : Propriété magnétique, Socle, Carotte, Pyrrhotine.  
Cher département (Sondage GPF Sancerre-Couy), Bassin parisien.

### Introduction

La découverte de filonnets de pyrrhotine dans les carottes du socle du forage de Sancerre-Couy et la confirmation de leur abondance (de 2 400 à 2 500 m et au-delà de 3 000 m) par les diagraphies de susceptibilité, ont conduit à se demander :

- dans quelle mesure cette pyrrhotine participait à l'anomalie magnétique du bassin de Paris jusqu'à la profondeur déjà explorée (i.e. 3 500 m) ;
- comment évoluait la susceptibilité magnétique de la pyrrhotine avec la profondeur, c'est-à-dire en fonction de la température ;
- quelle quantité de pyrrhotine était alors nécessaire entre 3,5 km et 9 km de profondeur (correspondant à la température de Curie de ce minéral à 320 °C) pour pouvoir expliquer l'AMBP.

C'est dans ce but que plusieurs travaux de laboratoire ont été entrepris pour pouvoir répondre à ces questions et effectuer ensuite d'éventuelles modélisations de l'AMBP :

- mesure de la susceptibilité magnétique et de l'aimantation rémanente de 130 échantillons calibrés (minicarottes de 12 cm<sup>3</sup>) avec, en outre, sur une dizaine d'échantillons, des tests de « traînage » pour évaluer la viscosité de l'aimantation (B. Smith) ;
- étude de la variation de l'aimantation magnétique (rémanente, induite, visqueuse) en fonction de la température sur deux échantillons de carottes (J.-P. Pozzi, G. Dubuisson, A. Tabbagh).

### Principales caractéristiques magnétiques de 130 échantillons du socle (B. Smith, 1988)

Les échantillons cylindriques (2,54 cm de diamètre et 2,2 cm de long) ont été prélevés perpendiculairement à l'axe de la carotte de forage préalablement orientée jusqu'à la profondeur de 1 800 m ; l'axe x de la

minicarotte est alors horizontal et dirigé vers le nord. Au-delà de cette profondeur, les carottes ne sont plus orientées et l'axe des minicarottes a un azimut aléatoire.

Les mesures de susceptibilité magnétique ont été faites à l'aide d'un susceptibilimètre Bartington MS2 (champ inducteur : 80 A/m ; 460 Hz). Celles d'aimantation rémanente naturelle (ARN) ont été déterminées au moyen d'un magnétomètre rotatif MOLSPIN, les échantillons étant placés dans six positions différentes.

Les mesures ont été faites à la température ordinaire ; une correction de la verticalité a été appliquée à partir de 1 800 m.

Un test de « traînage magnétique » de trois semaines a été réalisé sur quelques échantillons de la partie supérieure du forage afin d'apprécier la capacité des roches à acquérir une aimantation rémanente visqueuse (ARV) dans le champ magnétique terrestre.

Les résultats sont synthétisés dans le tableau suivant :

Intervalle de profondeur	N	K 10 <sup>-5</sup> u.S.I.	J <sub>r</sub> 10 <sup>-5</sup> A/m	Q
(951 - 2 169 m)	87	49.1 ± 15.7	71.4 ± 364.8	0.23 ± 0.86
(2 364 - 2 897 m)	25	117 ± 92	1 250 ± 1 594	1.95 ± 2.02
(3 060 - 3 160 m)	11	588 ± 570	7 911 ± 10 308	3.29 ± 2.22

Tabl. 1. - Évolution des valeurs moyennes de K, de J<sub>r</sub> et de Q en fonction de la profondeur.

N = nombre d'échantillons ; les valeurs moyennes sont données avec leur écart-type.

Q = coefficient de Koenigsberger = aimantation rémanente/aimantation induite, acquises dans un champ magnétique identique (40 A/m).

Les valeurs de la susceptibilité magnétique, K, confirment celles trouvées par les diagraphies ROMULUS. Elles montrent, en particulier, un accroissement significatif entre 3 060 et 3 160 m (voir tabl. 1), où certaines valeurs excèdent 10<sup>-2</sup> uSI.

Les valeurs de l'intensité de l'aimantation rémanente, J<sub>r</sub>, présentent une forte dispersion, comme le montre la figure 1 où l'on remarque que ce paramètre augmente de plusieurs ordres de grandeur entre le

(1) CNRS, Centre Géologique et Géophysique, Montpellier, France.  
(2) École Normale supérieure, laboratoire de géologie/URA 1316, Paris.  
(3) CNRS, CRG Garchy, Université de Paris VI.

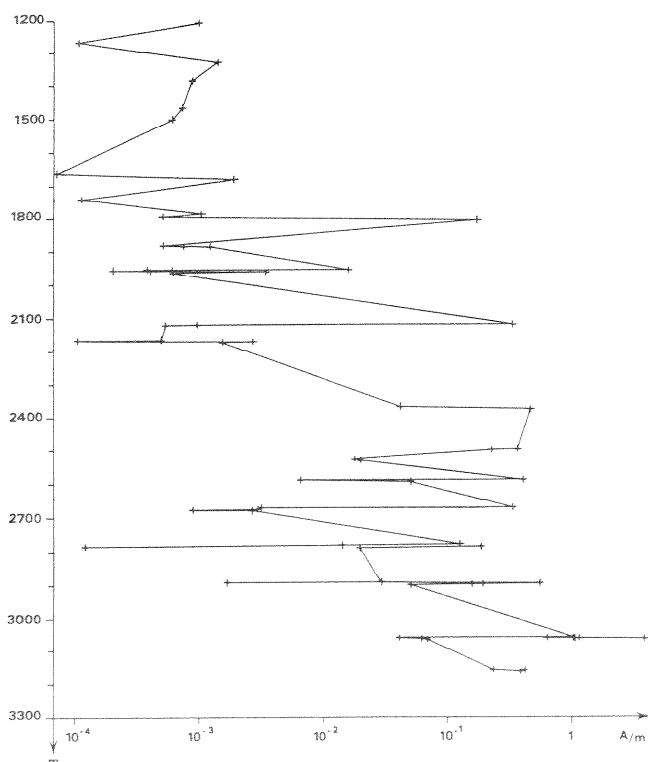


Fig. 1. - Variation de l'intensité de l'ARN en fonction de la profondeur. Forage Sancerre-Couy - 1b. (B. Smith, 1988)

sommet du socle et la base du forage. L'augmentation est particulièrement nette à partir de 2 400 m.

Les directions de l'ARN se caractérisent par une distribution quasi-aléatoire jusqu'à 1 800 m. Plus bas, seule l'inclinaison de l'ARN est significative (puisque les carottes ne sont plus orientées en azimut) mais la dispersion reste importante. Ce n'est qu'entre 3 060 et 3 160 m que l'on observe un certain groupement des inclinaisons. Cette forte dispersion des directions de l'ARN a pour corollaire que l'aimantation rémanente résultante peut donc être considérée comme nulle jusqu'à 3 000 m.

Dans la partie supérieure du forage, les taux de viscosité magnétique sont le plus souvent faibles (< 5 % dans les diorites quartziques) de sorte que l'ARV est une composante négligeable de l'ARN ; exceptionnellement les taux de viscosité peuvent atteindre 25 % dans certains échantillons d'amphibolite.

A plus grande profondeur, entre 3 060 et 3 160 m, on note fréquemment une évolution régulière de l'intensité des composantes au cours de la mesure de l'aimantation rémanente. Ce phénomène de « traînage magnétique » signifie que ces échantillons sont susceptibles :

- d'acquérir une aimantation induite visqueuse (AIV) dirigée selon le champ magnétique terrestre auquel ils sont soumis in situ ;
- de garder une aimantation rémanente visqueuse (ARV) ayant la direction du champ terrestre, lorsqu'ils sont soustraits à l'influence de celui-ci.

L'AIV croît *grosso modo* en fonction du logarithme des temps d'application du champ magnétique : l'ARV décroît selon une loi identique, en fonction du temps

écoulé depuis la coupure du champ. La viscosité magnétique étant surtout liée aux phénomènes de fluctuations thermiques des moments magnétiques des minéraux aimantés, elle tend à augmenter avec la température.

Ce phénomène, apprécié ici de façon qualitative à température ordinaire, est confirmé et quantifié ci-après par les mesures de l'aimantation induite visqueuse en fonction de la température (voir expériences de J.-P. Pozzi, G. Debuissou et A. Tabbagh). Il permet de comprendre comment une roche qui se caractérise par une aimantation induite et une viscosité magnétique modérées à température ambiante, peut présenter une aimantation sensiblement plus forte lorsqu'elle est enfouie à une certaine profondeur.

### Variation de l'aimantation de la pyrrhotine avec la température (J.-P. Pozzi, G. Dubuissou, A. Tabbagh, 1988)

L'un des problèmes fondamentaux pour essayer de quantifier la contribution des roches forcées à l'AMBP, est la connaissance de l'évolution des différents paramètres de l'aimantation des roches traversées, et notamment de celles contenant les minéralisations à sulfure, en fonction de la température. Un premier résultat (éch. 2 493 mètres) avait, en effet, montré que ce paramètre était fondamental. Nous présentons ici deux exemples typiques supplémentaires, illustrant des comportements différents, et confirmant l'importance du facteur température. Ces mesures montrent qu'une étude extensive doit être poursuivie, tant du point de vue de l'intensité de l'aimantation en fonction de la température que de celui des transformations minéralogiques affectant la pyrrhotite à des températures proches de son point de Curie (320 °C).

### Appareillage et principe des mesures

Si l'on désire obtenir des mesures réalistes des paramètres de l'aimantation des roches applicables aux conditions terrestres, il est nécessaire de disposer d'un appareil permettant de travailler sous température variable et, à la fois en champ nul et sous un champ continu faible, de l'ordre de grandeur du champ magnétique terrestre. Ce dernier point est crucial dès lors que l'on désire obtenir des informations sur l'aimantation visqueuse des roches qui pourrait jouer un rôle très important dans le cas de sources relativement profondes. Cependant, ce paramètre est impossible à mesurer avec des appareils classiques dans lesquels le champ appliqué est alternatif ou, continu, mais de forte intensité. De tels appareils apportent donc plus d'informations sur la variation de l'aimantation à saturation d'une roche en fonction de la température que sur son aimantation « in situ » dans la croûte et soumise au champ terrestre durant des temps géologiques. Les données sur l'aimantation induite et visqueuse présentées ici ont donc été acquises en champ faible (50<sup>e</sup>) et continu.

Nous avons ainsi mesuré successivement et pour chaque température depuis 20 °C jusqu'à la température de Curie :

- l'aimantation rémanente en champ nul ;
- l'aimantation induite instantanée après application du champ afin d'obtenir la susceptibilité ;
- l'aimantation induite après 6 à 7 minutes d'application du champ afin d'obtenir l'ordre de grandeur de l'aimantation visqueuse par soustraction de l'aimantation induite instantanée ;
- l'aimantation immédiatement après arrêt du champ appliqué afin d'étudier le trainage de l'aimantation visqueuse.

L'ensemble de ces différents paramètres permet de reconstituer des modèles de variation de l'aimantation « in situ » des roches.

Les deux échantillons choisis ont été prélevés dans des zones où la susceptibilité magnétique était très forte :

- 2 991,5 m = pyrigarnite à fins niveaux de plagioclases avec filonnets de pyrite (la susceptibilité dépasse  $1\,000 \cdot 10^{-5}$  SI) ;
- 2 786 m = gneiss à grenat, hornblende, biotite et disthène avec filonnets de sulfures (la susceptibilité atteint  $1\,500 \cdot 10^{-5}$  SI).

### Variation des différents paramètres de l'aimantation en fonction de la température

Les figures 2, 3 et 4 représentent respectivement les variations de l'aimantation rémanente, de l'aimantation induite instantanée pure et de l'aimantation visqueuse en fonction de la température. L'échelle des aimantations, en unités arbitraires, est identique sur l'ensemble des figures afin de pouvoir comparer l'importance respective de chacun des trois paramètres. Comme attendu pour de la pyrrhotite, la température de Curie des deux échantillons est de l'ordre de 320 °C.

L'aimantation rémanente (fig. 2) de l'échantillon 2 991 m est relativement élevée et montre une décroissance régulière classique en fonction de la température. A l'opposé, l'échantillon 2 786 m est peu rémanent et la variation de ce paramètre en fonction de la température suggère la présence de plusieurs aimantations partielles superposées de directions différentes.

La variation de l'aimantation induite instantanée en fonction de la température (fig. 3) est globalement positive entre 20 °C et 220 °C. L'échantillon 2 991 m montre une augmentation régulière supérieure à 32 %. L'aimantation induite instantanée de l'échantillon 2 786 m croît de plus de 45 % dans cet intervalle de température. Dans ce dernier cas, l'augmentation n'est cependant pas régulière, la courbe présentant une bosse aux environs de 80 °C. Celle-ci, corrélable avec une chute de l'aimantation rémanente dans cette gamme de température, pourrait correspondre à une phase magnétique dont le point de Curie serait de cet ordre de grandeur.

La figure 4, représente la variation de l'aimantation visqueuse en fonction de la température et illustre l'importance de ce paramètre. D'une valeur quasi nulle

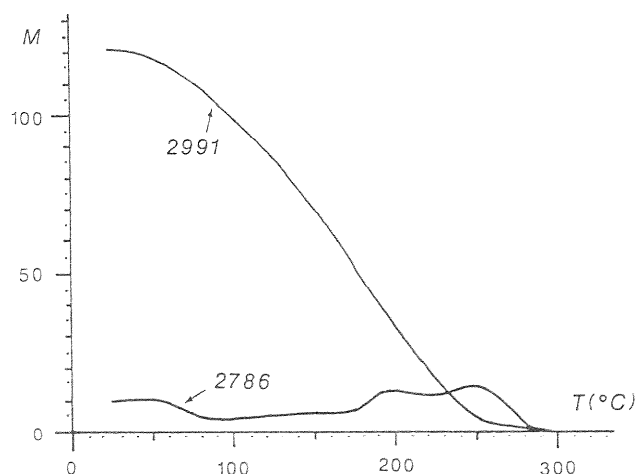


Fig. 2. - Variation de l'aimantation rémanente en fonction de la température pour les deux échantillons présentés. (J.-P. Pozzi, G. Dubuisson, A. Tabbagh, 1988).

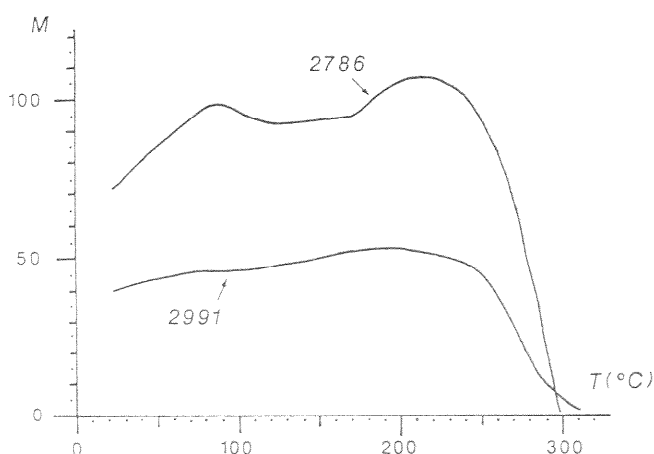


Fig. 3. - Variation de l'aimantation induite instantanée en fonction de la température pour les deux échantillons présentés. (J.-P. Pozzi, G. Dubuisson, A. Tabbagh, 1988).

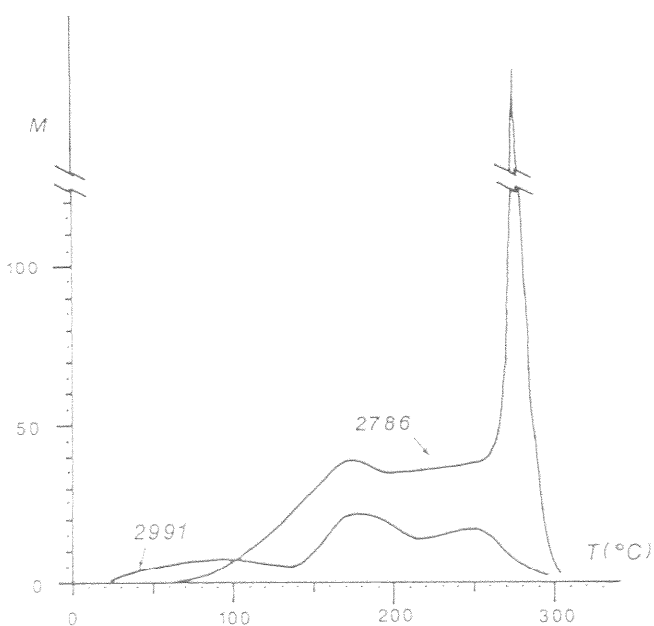


Fig. 4. - Variation de l'aimantation visqueuse en fonction de la température pour deux échantillons présentés. (J.-P. Pozzi, G. Dubuisson, A. Tabbagh, 1988).

à température ambiante, l'aimantation visqueuse croît de manière importante et représente une part non négligeable de l'aimantation totale des deux échantillons. L'aimantation visqueuse augmente donc de nombreux ordres de grandeur entre 20 °C et 250 °C. Pour l'échantillon 2 786 m et près du point de Curie, on observe une augmentation très importante de l'aimantation visqueuse qui serait maximale aux environs de 280 °C. Cette augmentation est à nouveau de plusieurs ordres de grandeur, et ce, par rapport à la valeur observée vers 250 °C qui était déjà significative.

## Conclusion

Les deux exemples présentés ci-dessus montrent :

1) l'importance de l'aimantation visqueuse dès lors que l'on se situe dans des zones où la température est suffisamment élevée ;

2) l'importance du paramètre température sur l'intensité de l'aimantation des roches, nécessitant sa prise en compte systématique si l'on veut modéliser une anomalie magnétique dont les sources probables sont situées à des profondeurs plurikilométriques.

Ces deux exemples montrent également que l'effet de la température sur l'aimantation des roches ne peut pas être simplement déduit d'un nombre très limité de mesures, même si dans les deux cas une augmentation de la température implique une augmentation des aimantations induite instantanée et visqueuse. En effet, les ordres de grandeur de ces variations et leur importance comparativement à l'aimantation rémanente sont très différents pour les deux échantillons.

Enfin, d'autres phénomènes peuvent intervenir et jouer un rôle non négligeable dans la constitution d'un corps magnétique profond. M. Bina *et al.* (1991 et 1992) signalent la transformation minéralogique de la pyrite en pyrrhotite et magnétite sous l'effet de la chaleur. Un tel processus permettrait d'envisager l'existence de minéraux magnétiques au-delà des 9 km (profondeur de Curie de la pyrrhotite) jusqu'à une quinzaine de km (température de Curie de la magnétite 550 °C) : les aimantations atteintes par la magnétite sont beaucoup plus fortes que celles de la pyrrhotite et contribueraient de façon plus significatives à l'anomalie magnétique du bassin de Paris.

## Références

- BINA M., CORPEL J., DALY L., DEBEGLIA N. (1991). - Transformation de la pyrrhotite en magnétite sous l'effet de la température : une source potentielle d'anomalies magnétiques. *C.R. Acad. Sci. Fr.*, **313**, (2), pp. 487-494.
- BINA M., DALY L. (1992). - Chemical remanent magnetization in pyrrhotite and magnetite obtained from mineralogical transformation of pyrite by heating. 17<sup>e</sup> Ass. gén. EGS, Edinburgh 6-10/04/1992.
- BINA M., DALY L., CORPEL J., DEBEGLIA N. (1992). - Mineralogical transformation of pyrite and pyrrhotite to magnetite by heating as a potential source of magnetic anomalies. 17<sup>e</sup> Ass. gén. EGS - Edinburgh - 6-10/04/1992.

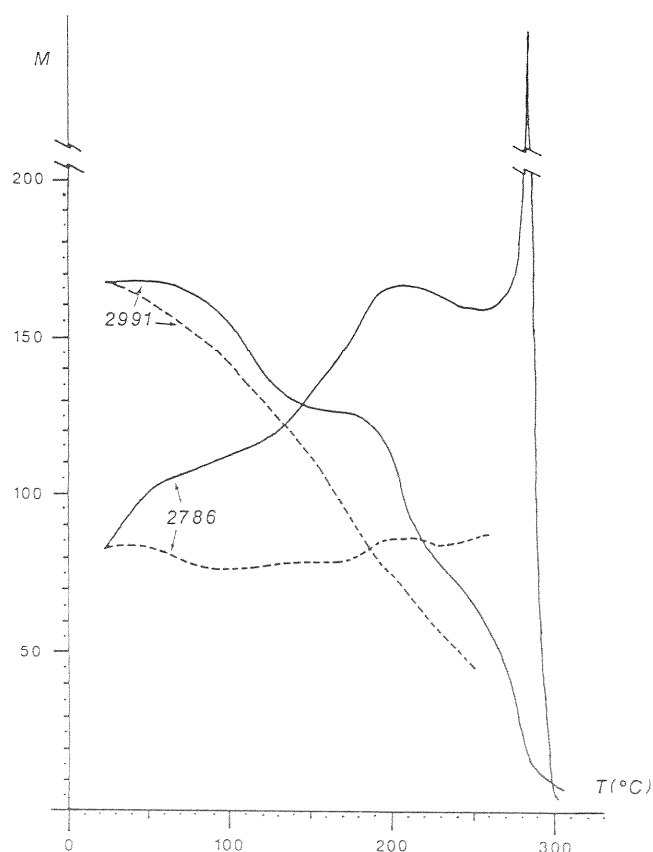


Fig. 5. - Variation de l'aimantation apparente (« in situ ») des échantillons présentés en fonction de la température (traits pleins) dans l'hypothèse où la direction de l'aimantation rémanente serait identique à celle du champ appliqué (champ terrestre).

Les courbes en pointillés représentent un modèle simpliste de variation de l'aimantation en fonction de la température de ces échantillons calculé en extrapolant l'aimantation visqueuse mesurée à température ambiante et en l'additionnant à l'aimantation rémanente à différentes températures. (J.-P. Pozzi, G. Dubuisson, A. Tabbagh, 1988).

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

POZZI J.-P., DUBUISSON G., TABBAGH A. (1988). - Importance du paramètre température sur l'aimantation de roches profondes : données préliminaires. Documents du BRGM, n° 138, pp. 235-244.

SMITH B. (1988). - Étude des principales caractéristiques magnétiques d'échantillons du socle du forage de Couy. Documents du BRGM, n° 138, pp. 97-114.

TABBAGH A., ALVAREZ R., BAYER R., GUILLEN A., HUTIN R., LEBERT F., MARTIN J.-P., MILLON R., POCCACHARD 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.