

RECHERCHES SUR LA DIRECTION D'AIMANTATION DES ROCHES VOLCANIQUES (1);

Par M. BERNARD BRUNHES,

1. *Introductions*. — Nous avons, en 1901, poursuivi, M. David et moi, une série de recherches systématiques sur la direction d'aimantation des roches volcaniques en place.

Le fait même de l'aimantation de ces roches est connu de plus long-temps. L'intensité de cette aimantation et son caractère de stabilité ont donné lieu à plusieurs travaux, notamment de Giuseppe Folgheraiter en Italie (2), de Abt (3) et de Pockels (4), en Allemagne. Abt a reconnu que la magnétite de Moravie a un magnétisme permanent considérable. Folgheraiter a établi une distinction entre les *pyroxénites*, ou roches formées de poussières agglomérées et les basaltites ou andésites, provenant de véritables coulées de lave. Dans ces derniers cas, des baguettes taillées dans la roche et examinées au laboratoire n'ont perdu, au bout de quelques mois ou d'un an, qu'une très-petite traction (au plus $\frac{1}{20}$ ou $\frac{1}{15}$) de leur aimantation primitive. Dans le cas des *pyroxénites*, l'aimantation rémanente est au contraire très faible par rapport à l'aimantation induite par le champ terrestre actuel. Folgheraiter, cherchant la raison chimique de ces différences, croit avoir démontré que la transformation du sesquioxyde de fer en magnétite, dans les sels de fer que contiennent les roches, rend l'aimantation plus stable. Ce sont ces remarques qui l'ont conduit à l'étude systématique de l'aimantation rémanente de la brique; il a montré que l'argile ferrugineuse conserve, après la cuisson, la direction de l'aimantation du champ ma-

(1) Conférence faite le samedi 21 avril 1906, à l'Institut de Physique, sous la présidence de M. Giuseppe L. S. *Atti della Commissione per la ricerca della direzione del campo magnetico terrestre*, série 3a, Lett. 1.
p. 1. *Atti della Commissione per la ricerca della direzione del campo magnetico terrestre*, série 3a, Lett. 1.
vol. 1. — *Atti della Commissione per la ricerca della direzione del campo magnetico terrestre*, série 3a, Lett. 1.
Atti della Commissione per la ricerca della direzione del campo magnetico terrestre, série 3a, Lett. 1.
1^o sem. 1895, p. 203. — *Atti della Commissione per la ricerca della direzione del campo magnetico terrestre*, série 3a, Lett. 1.
Atti della Commissione per la ricerca della direzione del campo magnetico terrestre, série 3a, Lett. 1.
Vol. 1, 2^o semestre 1895.
Atti della Commissione per la ricerca della direzione del campo magnetico terrestre, série 3a, Lett. 1.
Ann. C. N. U. P.
(Wi.)

gnétique dans lequel on l'a cuite⁽¹⁾. On connaît les beaux travaux par lesquels il en a conclu à la variation de l'inclinaison magnétique depuis le VII^e siècle avant notre ère jusqu'à nos jours. Il a étudié des vases d'argile cuite, allant depuis la période de la céramique étrusque jusqu'à celle de l'industrie pompéienne, et a déduit de leur forme et de la distribution de l'aimantation à leur surface l'angle que devait faire avec la verticale la direction du champ terrestre à l'époque de leur cuisson.

Il a été ainsi amené à penser que les vases les plus anciens ont été fabriqués à une époque où l'inclinaison, dans l'Italie centrale, était en sens inverse de ce qu'elle est aujourd'hui, où le pôle Nord de l'aiguille aimantée se dirigeait vers le haut⁽²⁾. C'est ce résultat surprenant qui n'a pas été admis en général par les physiciens qui s'occupent de magnétisme terrestre et qu'a contesté le physicien suédois Carlheim-Gyllenskjöld en particulier⁽³⁾.

Certaines singularités du magnétisme terrestre dans les régions volcaniques ont donné lieu également à un certain nombre de travaux en Allemagne et en Italie. Filippo Keller, parcourant la Campagne romaine, y a reconnu un certain nombre de points isolés, « punti distinti », où l'aiguille aimantée devient folle et change brusquement de direction entre deux points très voisins. Ces points ont été étudiés par G. Folgheraiter⁽⁴⁾; il les a attribués, pour la plupart des cas, à l'action de la foudre, qui, tombant sur une roche magnétique, a déterminé au voisinage du point de chute un champ magnétique intense créant une aimantation permanente. Tœpler a étudié, en Allemagne, un grand nombre de ces points, et s'est préoccupé du sens de distribution du champ circulaire autour des points de chute; si ce sens est connu, on en déduit immédiatement le sens dans lequel le courant

(1) Divers auteurs avaient bien remarqué que la brique peut être aimantée, légèrement d'ailleurs, mais d'une façon très stable; Boyle, notamment. En indique au XVIII^e siècle; mais Folgheraiter est le premier qui ait cuit de l'argile dans un champ magnétique donné, et vérifié que la direction du champ est celle de l'aimantation que conserve l'argile cuite.

(2) G. FOLGHERAITER, *J. de Phys.*, 3, VIII, 660. — On trouvera, à cet article du *Journal de Physique*, la bibliographie des communications aux *Lincei* de Folgheraiter sur les propriétés de la brique et sur l'inclinaison magnétique dans l'antiquité.

(3) *Terrestrial Magnetism*, t. II, p. 117.

(4) G. FOLGHERAITER, *I punti distinti delle rocce magnetiche et le fulminazione* *I rammenti concernenti la geofisica dei pressi di Roma*, n. 5.

solidifiées; mais il pense qu'en général il faut attribuer un effet plus ou moins intense à l'action lente et prolongée de l'induction terrestre sur les roches déjà solidifiées et refroidies. Cette dernière action serait même prépondérante dans le cas des tufs et des roches formées de poussières agglomérées.

Pour avoir une idée de cette action, Folgheraiter s'est borné à chercher, non pas l'orientation réelle de l'aimantation dans une couche, mais seulement le *sens de la composante verticale de cette aimantation*. Il a opéré par deux procédés qui se contrôlent: il a taillé des échantillons de roches en forme de baguettes allongées verticales et a constaté que, dans tous les cas étudiés, le pôle Sud était en haut et le pôle Nord en bas. Il a examiné un certain nombre de bancs horizontaux de lave solidifiée sur plusieurs mètres d'épaisseur, coupés par des tranchées de route, et a cherché, en se plaçant loin de tout *point distinct*, ce qu'indiquait la boussole sur le sens de l'aimantation de la base supérieure et de la base inférieure; la base inférieure a toujours présenté une aimantation Nord, sans aucune exception; la base supérieure, une aimantation Sud avec une seule exception.

Mais, pas plus que personne jusqu'ici, il n'avait fait de mesure d'orientation de l'aimantation dans une coulée volcanique, et n'avait cherché jusqu'à quel point cette direction peut être constante et définie.

II. *La brique naturelle*. — C'est ce problème que nous avons abordé. Nous avons commencé par étudier la direction d'aimantation dans un type de roches assez rare et dont les propriétés magnétiques n'avaient jamais été signalées: il s'agit de la *brique naturelle*, de l'argile métamorphisée et cuite sur place par des coulées de lave qui l'ont recouverte⁽¹⁾.

Nous avons examiné plusieurs de ces gisements d'argiles métaphoriques, d'abord près du village de Beaumont, où l'argile est sous la lave du volcan de Montjoli, et près du village de Boisséjour, où l'argile a été cuite par la lave du volcan de Gravenoire⁽²⁾; puis à

(1) BRUNHES et DAVIN, *Sur la direction d'aimantation dans des couches d'argile transformées en brique par des coulées de lave* [C. R., t. CXXXIII, p. 153, 15 juillet 1904].

(2) Cette argile métamorphique nous fut signalée au cours d'une promenade par M. L. BOISSÉJOUR, géologue, qui a fait une monographie géologique détaillée du volcan de Gravenoire.

Royat, où se trouve une carrière étendue de brique naturelle reposant sur une coulée de lave antérieure ¹⁾ par une coulée qui vient du petit puy de Dôme; enfin, en divers points du département du Cantal, et notamment à Pontfavein (commune de ²⁾ où une carrière de brique naturelle, mise au jour par une route, suit la route sur plus de 100 mètres de long, au-dessous d'une couche de basalte des plateaux miocène ³⁾.

La brique présente un intérêt exceptionnel, car, des nombreuses expériences de Folgherauter sur les poteries et de ses observations sur des fragments de vases antiques, il résulte que l'aimantation rémanente de l'argile cuite présente une stabilité absolue. Si l'on a, dans les bancs d'argile naturelle, une direction d'aimantation bien définie et qui diffère de la direction du champ terrestre actuel, on est donc fondé à admettre que la direction d'aimantation est bien celle du champ terrestre à l'époque où la coulée volcanique a transformé en brique l'argile.

Or nous avons reconnu que, dans des bancs voisins, situés sous la même coulée, mais de couleur et d'allure différentes, parce que la composition de l'argile, et notamment sa teneur en fer, est différente, il arrive que l'intensité de l'aimantation rémanente varie dans de larges proportions (de 1 à 5 et plus), tandis que la direction, dans le même banc, est la même, et cette direction, définie, est, en général, différente de la direction actuelle du champ terrestre.

Pour étudier cette direction, nous détachons du banc, et de la roche en général, des *échantillons chaque fois orientés sur place*.

On commence par dresser, au niveau, une face horizontale supérieure. Sur cette face horizontale on place une petite boussole de déclinaison, et l'on trace sur la roche une flèche parallèle à la direction actuelle de l'aiguille de déclinaison, la pointe de la flèche étant dirigée vers le Nord magnétique. On découpera dans la face horizontale un carré, dont les cotés sont respectivement parallèles et perpendiculaires à la direction de cette flèche. Avant de détacher l'échantillon de la roche, on dresse une des faces verticales, par exemple la face Nord ou la face Sud, suivant la disposition de la carrière. On détache ensuite un bloc plus gros que l'échantillon à conserver, et on en achève la taille à l'échelle ou au laboratoire.

¹⁾ Cette carrière nous a été indiquée par M. Auvry, ingénieur des Ponts et

en s'astreignant absolument à ne retoucher, dans aucun cas, la face horizontale supérieure où est tracée la flèche.

Parfois il n'est pas commode de tailler des faces verticales exactement perpendiculaires et parallèles au méridien magnétique actuel. On peut, soit tailler quatre faces verticales orientées NW.-SW., SE., NE., soit encore tailler quatre faces verticales satisfaisant simplement à la condition de découper un carré sur la face horizontale supérieure, la flèche ayant par rapport aux côtés de ce carré une orientation quelconque.

La détermination des trois composantes du moment magnétique suivant les trois arêtes rectangulaires du cube donne l'orientation du vecteur qui représente son aimantation par rapport à la verticale et au méridien magnétique actuel, c'est-à-dire l'inclinaison et la déclinaison de la roche en place.

La mesure des trois composantes du moment magnétique se fait en portant les échantillons cubiques (qui ont, suivant les cas, de 5 à 10 centimètres d'arête, généralement 8 à 9 centimètres) à côté d'un déclinomètre Mascart, dans la première position de Gauss, et observant la déviation par la méthode subjective. On place l'échantillon dans une position AB, puis à la même place dans la position BA, en échangeant les faces A et B. Cela donne la composante du moment magnétique suivant AB (*fig. 1*).

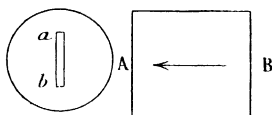


FIG. 1.

Pour chaque face de cube tournée vers le déclinomètre, il y a quatre positions possibles du cube : on lui donnera en général ces quatre positions successives, qui doivent donner la même déviation si le cube est disposé d'une façon bien symétrique par rapport au barreau du déclinomètre (le centre du cube sur une horizontale perpendiculaire au barreau en équilibre et passant par le centre du barreau) et s'il est formé d'une matière homogène, uniformément aimantée. Si un échantillon bien centré donne, entre les quatre lectures faites pour une même face tournée vers le barreau, des écarts trop grands, il est inutilisable. Si les écarts sont faibles, on prend une moyenne des quatre lectures.

La force démagnétisante est négligeable dans toutes ces mesures, et on en a une contre-épreuve dans ce fait que des échantillons voisins, taillés l'un N.-S. l'autre avec faces verticales (SW. et NW.-SE.), donnent exactement la même direction de déclinaison dans la roche.

La méthode de fixation de l'orientation de la roche est sujette à une objection assez grave. La boussole de déclinaison peut être affectée par la roche elle-même et ne pas donner des directions parallèles en deux points, pourtant voisins, du même banc, au cas où l'intensité de l'aimantation de la roche serait très variable, ou bien où l'on serait inégalement éloigné d'un pôle. Ce procédé est appliqué toutefois à cause de sa rapidité et de sa commodité, et parce que, quand on prend les précautions nécessaires, il est suffisant, étant donné l'approximation à attendre de ces mesures. Toutefois il est à noter qu'en général les déclinaisons dans un même banc présentent entre elles des écarts plus notables que les inclinaisons, et, de plus, que, dans le cas où les échantillons ont été taillés par nous-mêmes ou tout au moins sous nos yeux, les écarts entre les orientations obtenues sont notablement moindres que lorsqu'il est arrivé de recevoir des échantillons taillés, d'ailleurs, suivant notre méthode et par des collaborateurs qui nous avaient vus opérer, mais qui ne se mettaient pas au même degré à l'abri des erreurs possibles.

Nous avons pu prendre plusieurs échantillons à quatre principales carrières de brique.

A. Carrière de la route de Boisséjour (coulée de Gravenoire).

Premier échantillon (13 mai 1901) :

$$\begin{aligned} \text{Déclinaison} &= \text{déclinaison actuelle} && 42 \text{ W.} \\ \text{Inclinaison} &= \text{inclinaison} && 96 \text{ :} \end{aligned}$$

Deuxième échantillon :

$$\begin{aligned} \delta &= \Delta + 36 \text{ W.} \\ I &= 57^{\circ}30 \text{ :} \end{aligned}$$

Troisième échantillon (n° 8, Soc. Phys., 1902) :

$$\begin{aligned} \delta &= 66 \text{ W.} \\ I &= \end{aligned}$$

B. Carrières de la route de Beaumont (coulée du volcan de Montjoli).

Il y a ici plusieurs carrières d'argile métamorphique sous la même coulée, notamment une carrière notée n° 5 et une n° 7 dans notre carnet d'observations.

Carrière n° 5. — Échantillon n° 2 (B. 9. de notre collection actuelle) :

$$\begin{aligned}\delta &= \Delta + 7^{\circ} 30' \text{ Est,} \\ I &= 57^{\circ} 40';\end{aligned}$$

Carrière n° 7. — Échantillon n° 4 :

$$\begin{aligned}\delta &= \Delta + 9^{\circ} 30' \text{ Est,} \\ I &= 58^{\circ} 30';\end{aligned}$$

Échantillon n° 3 :

$$\begin{aligned}\delta &= \Delta + 2^{\circ} 10' \text{ Est,} \\ I &= 58^{\circ} 15';\end{aligned}$$

Échantillon n° 4 :

$$\begin{aligned}\delta &= \Delta + 8^{\circ} 35' \text{ Est,} \\ I &= 58^{\circ} 30';\end{aligned}$$

Échantillon n° 5 :

$$\begin{aligned}\delta &= \Delta + 6^{\circ} 30' \text{ Est,} \\ I &= 56^{\circ} 30'.$$

Tous ces échantillons ont été taillés par M. David lui-même. A part peut-être l'échantillon 3 pour la déclinaison, ils montrent une concordance excellente.

Les carrières n° 5 et n° 7 sont distantes de 30 mètres, et surtout elles ne sont pas formées de la même argile. Les échantillons de la carrière n° 7 sont beaucoup plus aimantés.

Nous allons donner pour deux échantillons, le numéro 2 et le numéro 5, par exemple, les valeurs des nombres lus directement au déclinomètre.

Échantillon (2), carrière n° 5 (cube de 9 centimètres d'arête) :

$$HB = - 3,9$$

(composante verticale du moment magnétique, dirigée vers le haut),

$$\begin{array}{r} NS \quad \quad 3,7, \\ EW \quad - \quad 0,5.\end{array}$$

Nous comptons la composante verticale du moment magnétique HB positivement vers le haut, la composante horizontale N.-S. posi-

tivement vers le Nord, et la composante E.-W. positivement vers l'Est.

L'unité est la petite division de l'échelle divisée lue dans la lunette. Le dixième de petite division ne s'apprecie pas exactement : chacun de ces nombres résulte de la moyenne

On en tire :

$$\text{tang}(\delta - \Delta) = \frac{\text{EW}}{\text{NS}} = 7^{\circ}30' \text{ (à 1/2 de l'unité près)}$$

et

$$\cos I = \frac{\text{NS}}{\text{HB}} = 57^{\circ}40'.$$

Voici maintenant les lectures dans l'échantillon (5), carrière 7 (échantillon de même dimension, mis à la même place) :

$$\begin{aligned} \text{HB} &= 22,7, \\ \text{NS} &= 14,9, \\ \text{EW} &= 1,5, \\ \text{tang} \delta - \Delta &= \frac{\text{EW}}{\text{NS}} = 6^{\circ}30', \\ \cos I &= 36^{\circ}30'. \end{aligned}$$

Un tel accord est, hâtons-nous de le déclarer, tout à fait fortuit. En effet, nous avons, pour l'échantillon n° 2, une composante E.-W. égale à 0,5. Ce nombre 0,5 est obtenu par une différence de lectures, différence du nombre de divisions lu dans la lunette lorsque c'est la face E. et lorsque c'est la face W. du cube qui sont en regard du déclinaimètre. C'est la différence de deux nombres sur chacun desquels il n'est pas inadmissible de commettre une erreur de 0,25, ou 1/2 de petite division. En réalité, nous pouvons penser que l'aimantation E.-W. du numéro 2 est comprise entre 0 et + 1. Mais cet écart entre 0 et + 1 pour la composante E.-W. donnerait un écart pour la déclinaison entre 0° et 15°.

Il en sera de même toutes les fois qu'on aura des roches très peu aimantées. L'aimantation de cet échantillon a été trouvée environ 0,00045 C. G. S. Il faudra donc se garder de tirer de ces fréquences imprudentes de l'examen de deux ou trois cubes, et surtout de vouloir deduire, à quelques degrés près, la direction d'aimantation dans une roche de l'examen de quelques échantillons. Et, par contre, il ne faudra pas conclure de lectures un peu grandes prises sur les échantillons d'une carrière donnée à la non-existence d'une direc-

tion définie, bien que difficile à déterminer avec certitude, pour l'aimantation de la roche.

Ici nous avons rapproché précisément les échantillons n° 2 (carrière 5, et n° 5 (carrière 7) de la route de Beaumont. Le second présente une aimantation sensiblement quadruple de celle du premier. Et cependant la direction d'aimantation est remarquablement identique dans les deux.

Nous avons repris récemment, en 1906, l'examen de l'échantillon n° 2, et nous avons vérifié les résultats obtenus en 1901. Dans cet intervalle de temps, l'échantillon a été placé au laboratoire et a occupé des positions quelconques. Il n'a donc pas changé depuis cinq ans.

Les échantillons précédents sont tous taillés exactement N.-S. et E.-W., sauf l'échantillon n° 3 qui est taillé NE.-SW. et NW.-SE.

H. Carrière de Royat. Coulée du petit puy de Dôme. — Premier échantillon taillé en 1901 :

$$\begin{aligned}\delta &= \Delta + 56^{\circ} 30' \text{ W.}, \\ I &= 73^{\circ}.\end{aligned}$$

Échantillons taillés en 1903 (David):

N° 1 :

$$\begin{aligned}\delta &= \Delta + 52^{\circ}, \\ I &= 70^{\circ} 30';\end{aligned}$$

N° 2 :

$$\begin{aligned}\delta &= \Delta + 54^{\circ}, \\ I &= 73^{\circ};\end{aligned}$$

N° 3 :

$$\begin{aligned}\delta &= \Delta + 44^{\circ} 40', \\ I &= 72^{\circ}.\end{aligned}$$

Échantillons taillés en 1905: n° 1 (R. B. 1):

$$\begin{aligned}\delta &= \Delta + 57^{\circ}, \\ I &= 73^{\circ};\end{aligned}$$

N° 2 (R. B. 2):

$$\begin{aligned}\delta &= \Delta + 44^{\circ}, \\ I &= 71^{\circ};\end{aligned}$$

N° 3 (R. B. 3):

$$\begin{aligned}\delta &= \Delta + 58^{\circ} 30', \\ I &= 79^{\circ}.\end{aligned}$$

Échantillons de 1906 :

N° 1 (R' 1):

$$\begin{aligned}\delta &= \Delta + 45^{\circ}, \\ I &= 76^{\circ};\end{aligned}$$

N° 2 R' 2 :

$$\begin{aligned}\delta &= \Delta - 35^{\circ} 30', \\ I &= 73 - 30.\end{aligned}$$

On trouve ici des écarts très notables, surtout entre les diverses valeurs de la déclinaison. Les échantillons de 1905 et 1906 n'ont pas été taillés par nous-mêmes, et, en outre, il faut observer que l'aimantation est en général très faible, et la grandeur des composantes horizontales mal déterminée.

Si nous trouvons que, malgré tout, dans ces échantillons qui sont d'aspect, de couleur et de gisement différents (quoique toujours sous la même coulée), comme c'est le cas pour Royat, existe une composante horizontale dirigée vers l'Ouest magnétique, du même ordre de grandeur que la composante dirigée vers le Nord magnétique; si, dans des briques de la carrière taillées à 45° du méridien, nous trouvons que la composante NE.-SW. est, pratiquement, nulle, la composante horizontale perpendiculaire étant notable, nous serons en droit de conclure que la déclinaison occidentale révélée par la brique est supérieure d'environ 45° à la déclinaison actuelle, sans toutefois que nous soyons scandalisés s'il arrive de trouver, pour cet angle, des valeurs variant de 40° à 60°.

D. Carrière de Pontfarein, commune de Cezens (Cantal). — Il s'agit ici d'une carrière d'argile grasse, qui est restée assez molle à la cuisson, et qui est extrêmement friable; les échantillons ont dû être conservés dans des boîtes cubiques en bois.

Cette carrière a été mise à jour par la construction d'un chemin vicinal: elle s'étend sur 100 mètres de long, sous une couche de 4 à 5 mètres d'épaisseur de basalte miocène, dit des *plateaux*, à 1.050 mètres d'altitude moyenne.

Le premier échantillon (orienté N.-S.), examiné, a donné les résultats suivants:

$$\begin{aligned}\text{HB} &= + 7,0, \\ \text{NS} &= - 2,0, \\ \text{EW} &= \dots\end{aligned}$$

d'où l'on conclut:

$$\begin{aligned}\delta &= \Delta - 17^{\circ} W., \\ I &= - 74^{\circ}.\end{aligned}$$

Deuxième échantillon:

$$\begin{aligned}\text{HB} &= + 3,5, \\ \text{NS} &= - 0,5, \\ \text{EW} &= - 0,5;\end{aligned}$$

ce qui donnerait :

$$\begin{aligned}\delta &= \Delta + 135^\circ \text{ W.}, \\ I &= - 78^\circ.\end{aligned}$$

Troisième échantillon (morceau γ) :

$$\begin{aligned}\text{HB} &= + 5,5, \\ \text{NS} &= - 1,5, \\ \text{EW} &= - 1,5, \\ \delta &= \Delta + 135^\circ \text{ W.}, \\ I &= - 69^\circ.\end{aligned}$$

Les mêmes remarques que nous avons faites pour la brique de Royat s'appliquent ici, et la détermination exacte de la déclinaison notamment est très difficile, vu la faiblesse de l'aimantation horizontale. Plusieurs autres échantillons donnent des résultats compris entre ces valeurs extrêmes.

Mais ce qui ressort de ces nombres, c'est d'abord que le pôle Nord est, dans ces échantillons, tourné vers le Sud ; c'est surtout que ce pôle Nord est ici en haut au lieu d'être en bas. L'inclinaison est négative.

Donc, si la direction d'aimantation de l'argile métamorphisée nous donne la direction du champ terrestre à l'époque de la coulée, nous savons qu'en un moment de l'époque miocène, aux environs de Saint-Flour, le pôle Nord était dirigé vers le haut ; c'est le pôle Sud de la terre qui était le plus voisin de la France centrale.

Cette conclusion me semble s'imposer. En effet il n'est pas possible d'admettre un retournement sens dessus dessous de cette longue couche horizontale d'argile métamorphique, sans quoi la lave qui l'a cuite serait trouvée au-dessous et non au-dessus⁽¹⁾. Cette lave, comme nous allons voir, a la même direction d'aimantation que l'argile qu'elle recouvre.

De nombreux échantillons, échelonnés sur une longueur de 100 mètres, donnent constamment ce même résultat, ce qui exclut absolument l'hypothèse d'un pôle purement local. Si certaines roches ont une force coercitive assez faible — ce qui ne paraît nullement être le cas de la brique — pour que, comme l'indique Folgheraiter, l'action prolongée du champ terrestre leur ait communiqué à froid une certaine aimantation qui ait pu altérer l'aimantation primitive, cette action de

⁽¹⁾ Les premiers échantillons ont été taillés sur place par moi-même.

la terre depuis plusieurs siècles n'aurait pu agir que pour transformer des roches ayant leur pôle Nord en haut en roches ayant leur pôle Nord en bas, et nullement pour opérer la transformation inverse. Il nous semble donc que la conséquence que nous en avons tirée sur l'inclinaison négative dans la France centrale, à un moment de l'époque miocène, a désormais en sa faveur un argument tiré de la géologie, quelque paradoxale qu'elle ait paru aux physiciens occupés de magnétisme terrestre, habitués à regarder l'équateur magnétique comme une ligne sinueuse qui ne s'est jamais écartée en aucun point de plus d'une vingtaine de degrés de l'équateur géographique.

M. Carlheim Gyllenskjöld notamment, qui a entre les mains un échantillon de notre brique de Pontfavein, s'est rallié à notre manière de voir.

Ajoutons que, lors de nos premières recherches en 1901, il nous est arrivé de rencontrer, sur la route de Boisséjour, une toute petite carrière d'argile métamorphique, paraissant cuite par une coulée distincte de celle qui a donné la carrière n° 1, et dont nous n'avions pu extraire que deux échantillons, l'argile étant extrêmement friable et très peu étendue. Aussi notre cahier d'observations n'indique les nombres relevés qu'à titre de renseignement, avec la mention « pas de contrôle possible ». Or ces deux échantillons, d'ailleurs assez peu concordants entre eux, présentent le pôle Nord en haut.

III. *Identité des directions d'aimantation dans la brique naturelle et dans la lave supérieure.* — La comparaison de la direction d'aimantation dans des échantillons cubiques pris dans la couche de brique naturelle et dans la lave supérieure présente un intérêt particulier.

Pour la brique, nous avons lieu de penser que la direction d'aimantation représente celle du champ magnétique terrestre au lieu et à l'époque de la cuisson.

Si la direction d'aimantation est la même dans la couche de basalte qui a cuit l'argile, ce sera une vérification expérimentale précieuse de l'hypothèse suivant laquelle c'est en se refroidissant et se solidifiant que la lave s'est aimantée, pour ne plus se modifier une fois refroidie.

Nous avons particulièrement examiné la carrière de Royat, et prélevé des échantillons cubiques, de composition chimique assez variées, dans la couche de basalte qui a cuit l'argile.

été un véritable fleuve charriant des scories, des cendres, ayant constitué des roches diverses, qui ont donné des résultats assez concordants.

Voici les résultats de l'examen de quatre échantillons de lave pris en divers endroits de la coulée par M. David en 1903 (1) :

N° 1 :	$\delta = 52^{\circ} 30' - \Delta,$ $I = 69^{\circ};$
N° 2 :	$\delta = 40^{\circ} 20' + \Delta,$ $I = 68^{\circ};$
N° 3 :	$\delta = 50^{\circ},$ $I = 68^{\circ} 30';$
N° 4 :	$\delta = 42^{\circ} 20',$ $I = 68^{\circ} 30'.$

Voici des échantillons récemment taillés en 1904 et examinés de même :

R ₂ ' :	$\delta = \Delta + 45^{\circ} 30',$ $I = 77^{\circ} 30';$
R ₃ ' :	$\delta = \Delta + 34^{\circ} 30' W.,$ $I = 71^{\circ};$
R ₄ ' :	$\delta = \Delta + 49^{\circ} W.,$ $I = 72^{\circ}.$

La déclinaison est supérieure à la déclinaison actuelle de 40° à 50° (dans un cas, un peu moins). L'inclinaison est voisine de 70° (dans un cas, un peu plus).

L'argile avait, dans l'ensemble, la même direction d'aimantation. La lave est, en général, plus aimantée que l'argile.

Nous avons en tous les cas, ici, une contre-épreuve caractéristique. Dans une cave très voisine de la carrière de briques, on atteint la partie inférieure de la couche d'argile, et l'on reconnaît qu'elle repose elle-même sur une coulée de basalte. Cette coulée est évidemment antérieure à l'autre; entre les deux s'est écoulée la période nécessaire pour le dépôt de la couche d'argile. Or un échantillon cubique découpé dans ce basalte nous a donné une direction d'aimantation très différente des échantillons de la lave supérieure, une déclinaison de

(1) *C. R.*, t. CXXXVII, p. 971, 7 décembre 1903.

1° à l'Ouest de la déclinaison actuelle et une inclinaison de 3°.

Il nous semble que ce seul fait suffirait pour affirmer que cette première coulée n'est pas contemporaine de l'autre, et que cette autre est contemporaine de la cuisson de l'argile.

A Pontfavein, nous n'avons pu avoir que deux échantillons cubiques de basalte : si l'on songe que cette coulée est dans un pays perdu, à 20 kilomètres de Saint-Flour, et que les burins se brisent contre ce basalte très dur, que les échantillons eux-mêmes éclatent sous l'outil, on ne sera pas surpris de ce maigre résultat. Les deux échantillons, examinés, ont présenté leur pôle Nord en haut. Voici les résultats fournis par l'un d'eux (1) :

$$\begin{aligned} \text{HB} &= + 49, \\ \text{NS} &= - 4,1, \\ \text{EW} &= - 2,0; \end{aligned}$$

ce qui donne :

$$\begin{aligned} \delta &= \Delta - 136^{\circ} \text{W.}, \\ I &= 76. \end{aligned}$$

Au degré de précision des mesures, nous avons là la même direction que dans les argiles cuites de Pontfavein (2).

IV. *Applications.* — *Explication d'anomalies du champ terrestre actuel.* — Il est clair que l'on peut fonder sur l'étude de la direction d'aimantation des roches en place une méthode d'appréciation des concordances ou des discordances entre diverses couches géologiques. Mais il serait prématuré d'aller plus loin, et de parler, en l'état actuel de la question, de tentatives de chronologie géologique.

Quelques problèmes géologiques mieux définis paraissent susceptibles de trouver dans ces études magnétiques les éléments de leur solution.

C'est ainsi que la domite du puy de Dôme présente, en divers points de la montagne, les directions d'aimantation les plus variées,

(1) L'autre échantillon avait une aimantation verticale du même ordre que l'autre et une aimantation horizontale énorme, surtout dans la direction (environ 20 fois l'aimantation verticale). Il se cassait d'un bloc vertical distinct. Nous avons voulu étudier la distribution de l'aimantation en détail, et nous avons tenté de le faire débiter, à l'atelier de Royat, en 27 petits cubes. Il s'est brisé en mille débris sous le choc.

(2) Cet échantillon a été pris en un point situé à l'ouest de la déclinaison horizontale de l'échantillon d'argile n° 1, pris à l'origine, et à 5 mètres de distance verticale.

depuis des aimantations presque horizontales jusqu'à une aimantation presque verticale. Il est probable que le mécanisme de la formation de cette montagne est le même que M. Lacroix a vu et décrit dans son bel ouvrage sur la montagne Pelée; une aiguille centrale, surgissant sous la poussée intérieure, s'élève progressivement, et se sépare en morceaux qui tombent à droite et à gauche chaque fois que la hauteur est devenue suffisante pour rendre la colonne instable.

La distinction entre l'aiguille centrale et les morceaux qui en sont de simples éclats paraît rendue possible par l'étude de la direction d'aimantation en divers points.

L'aimantation de la domite en place doit satisfaire à la condition d'expliquer, par le magnétisme de la masse de la montagne, la perturbation du champ terrestre qui a été précédemment étudiée par nous (1).

Considérons, dans une première approximation, la montagne comme formée d'un cône d'axe vertical terminé par une calotte sphérique tangente au cône suivant le parallèle de 45°. Une aimantation de la masse, dans une direction verticale de haut en bas, produira une perturbation du champ horizontal au voisinage du sommet, qui sera suffisamment représentée par un vecteur centripète atteignant son intensité maximum sur le parallèle de 45°. Or c'est bien la distribution à laquelle nos études antérieures nous ont conduits. Nous trouvons le maximum de déclinaison à l'Est, le minimum à l'Ouest, le maximum de composante horizontale au Nord, et le minimum au Sud, sensiblement sur le parallèle de raccordement de la calotte terminale et du cône à arêtes à 45°, et nos mesures fixant à 0^{gauss},015 la valeur maximum de la composante horizontale de ce vecteur perturbateur.

Or, si nous considérons un hémisphère reposant par son grand cercle sur un plan horizontal et aimanté dans le sens vertical, nous trouvons : 1° que le maximum du champ horizontal dû à l'aimantation est bien sur le parallèle de 45° ; 2° qu'il a pour intensité $2\pi Z$, Z étant l'intensité d'aimantation verticale. De plus — et c'est là une contre-épreuve intéressante — la composante verticale sur le sommet de l'hémisphère doit dépasser de $\frac{8}{3}\pi Z$ la valeur de la composante verticale en un point soustrait à l'influence de l'hémisphère aimanté.

(1) *J. de Phys.*, 4^e série, t. II, p. 202 ; 1903.

Si $2\pi Z = 15$ milligauss, on en déduit $Z = 0,0024 \text{ C. G. S.}$ et $\frac{8}{3}\pi Z = 0,020$: c'est-à-dire que le champ vertical au sommet doit être d'environ $\frac{1}{20}$ supérieur au champ vertical $z = 0$ dans nos régions, lequel est d'environ $0,0014$. Nous avons reconnu, en effet, dans une exploration préliminaire, que la composante verticale sur le sommet du puy de Dôme dépasse d'environ 500 la valeur de la composante verticale en bas.

Une aimantation générale de la montagne de direction verticale (pôle Nord en bas) et d'intensité égale à $0,0024 \text{ C. G. S.}$ expliquerait donc parfaitement, dans ses grandes lignes, l'anomalie que nous avons découverte et dont nous avons fait l'étude (1).

Or le résultat général de nos mesures d'aimantation sur des échantillons cubiques de domite du puy de Dôme est: 1° que l'intensité d'aimantation est d'environ $0,0027 \text{ C. G. S.}$ et 2° que, dans les échantillons qui *paraissent* provenir de l'aiguille centrale, l'inclinaison est assez grande pour permettre de se borner, dans une première approximation, à l'effet de la composante verticale (2).

V. *Étude de M. David sur l'origine des dalles du temple de Mercure.* — En 1902, des fouilles archéologiques au sommet du puy de Dôme ayant mis au jour la découverte d'un mur romain en petit appareil, M. David reconnut que les moellons de basalte et de scories présentaient des aimantations de direction tout à fait variable de l'un à l'autre. Folgheraiter avait fait une constatation analogue pour des murs romains en briques. Donc, depuis deux mille ans,

(1) Cette cause générale suffit très bien à expliquer l'ensemble de l'anomalie. Pour en expliquer les détails, il faudrait d'une part tenir compte du relief topographique exact, d'autre part faire appel à des causes secondaires. C'est ainsi que le long de la voie nouvellement tracée pour le tramway, nous avons trouvé une anomalie restreinte, mais nettement délimitée, au N-W du puy de Dôme, au point de la route qui passe au-dessus du rebord du bourrelet qui limite l'un des anciens cratères du petit puy de Dôme. Il faudrait des légions de travail-leurs pour mener à bonne fin l'étude magnétique de la région.

(2) Les travaux du tramway du puy de Dôme, qui se sont poursuivis pendant l'été 1907, ont provoqué, depuis lors, de grandes tranchées où l'on a prélevé de nombreux échantillons qui paraissent bien appartenir à l'aiguille centrale. Le résultat général que j'ai indiqué dans ma conférence, sur l'explication de l'anomalie magnétique du sommet, est confirmé par les mesures préliminaires qu'on a pu faire. Mais, en ce qui concerne la direction d'aimantation de l'aiguille centrale, il reste des mesures de comparaison à faire avant de publier des résultats définitifs.

l'action terminant de la même façon sur les moellons voisins, n'a pas réussi à uniformiser leur aimantation.

Mais la forme irrégulière des moellons, la difficulté de les orienter en place, rendaient les mesures très peu précises.

M. David porta alors son attention sur un dallage horizontal, très bien conservé, du temple de Mercure, qui se trouve au sommet du puy de Dôme, et date des premiers siècles avant notre ère. Ces pierres sont en domite, mais non en domite du puy de Dôme; ainsi qu'on le verra. Elles forment de grands rectangles parfaitement homogènes de 1 mètre de large sur 1^m,50 à 1^m,80 de long (et 0^m,40 de hauteur).

Il a reconnu (1) :

1° Que la direction d'aimantation en deux échantillons d'une même dalle est bien la même ;

2° Que les déclinaisons de plusieurs dalles en place, juxtaposées, sont très variables de l'une à l'autre ;

3° Que l'inclinaison est la même dans toutes les quatre, *au signe près*.

Voici ces mesures :

Dalle n° 1. — Premier échantillon :

Déclinaison.....	144° E.
Inclinaison.....	-- 55°

Deuxième échantillon :

δ.....	143° E.
l.....	-- 58°

Dalle n° 2. — Premier échantillon :

δ.....	86° E.
l.....	-- 52°

Deuxième échantillon :

δ.....	85°.
l.....	-- 54°

Dalle n° 3. — Premier échantillon :

δ.....	74 W.
l.....	+ 53°

AIMANTATION DES ROCHES

Deuxieme echantillon :

δ..... 70 W.
I.....

Dalle n° 4. — Premier échantillon :

δ..... 14 E.
I..... 0

On voit que l'on a **des résultats** plus concordants pour l'inclinaison que pour la brique de Royat ou de Pontfarcin. Cela tient : 1° à ce que l'intensité d'aimantation est beaucoup plus forte : 20 fois plus grande que celle de nos échantillons de brique de Pontfarcin ; 2° à ce que l'observateur a pu tailler à loisir, sur place, des pierres qui se prêtaient admirablement à la taille.

Les différences de déclinaison, et le fait que deux dalles voisines peuvent avoir conservé des inclinaisons opposées, prouvent que l'action terrestre n'a pu modifier les aimantations depuis deux mille ans au moins que les dalles sont en place.

Ces dalles ont dû être taillées dans des bancs parallèles, très probablement horizontaux. La taille de rectangles dans ces bancs a pu donner des pierres orientées, en déclinaison, d'une façon quelconque, l'inclinaison restant la même pour toutes; mais, à la pose, l'une d'elles a été retournée sens dessus dessous; de là l'explication du changement de signe de l'inclinaison.

Ce résultat acquis, M. David a voulu l'appliquer à la recherche de l'origine de ces énormes blocs.

Des cubes taillés dans la domite même du Puy de Dôme donnent, on l'a vu, des résultats discordants sur le sommet, parce qu'il s'agit de blocs détachés, d'éboulis qui se sont séparés de l'aiguille centrale. Des cubes taillés dans ce qui paraît être cette aiguille centrale ont des inclinaisons supérieures à 70°. Ajoutons que la domite du puy de Dôme n'a pas la composition de celle des dalles du temple.

Au nord du puy de Dôme, à 4 kilomètres environ, est une montagne domitique, le puy de Clerzou, où se trouvent des carrières qui ont été jadis des carrières. On a, dans les grottes du puy de Clerzou, taillé des échantillons cubiques, qui ont donné les résultats suivants :

Carrière n° 1 :

$\delta = \Delta \quad 30^\circ \text{ E.},$

I = 100.

Carrière n° 2 :

$\delta = \Delta \quad 6^\circ 13' \text{ E.},$

I

On remarque donc dans les carrières de cette montagne la même inclinaison que dans les dalles du temple.

Toutefois une difficulté subsiste. L'intensité d'aimantation dans la domite du Clerzou est un peu inférieure à celle de la domite du temple.

Voici quelle paraît être l'explication la plus naturelle. La teneur en mica ou en amphibole, dont les cristaux sont englobés dans la pâte de la roche, varie visiblement d'un point à l'autre de la montagne, ainsi que le prouve un simple examen à l'œil nu. Il est naturel qu'il en soit de même de la magnétite, et qu'on trouve dans la même montagne des échantillons plus ou moins riches en magnétite, par suite plus ou moins aimantés, tout en conservant la même direction d'aimantation, comme nous l'avons reconnu nous-mêmes pour les couches de brique de Beaumont ou de Royat.

Le résultat obtenu ne dispense donc pas de la recherche exacte de la carrière où se trouvent des pierres identiques à celles des dalles du temple. Mais l'identité de l'inclinaison magnétique conduit à penser que les dalles viennent de quelque carrière du Clerzou ou d'une montagne voisine, exactement contemporaine, — et cela dans un cas où la simple étude chimique ou minéralogique des roches aurait fait apparaître des différences.

La connaissance exacte de la carrière où ont été prises les dalles du temple serait d'un grand intérêt archéologique, car elle pourrait permettre d'aborder avec des éléments nouveaux cet autre problème, encore sans solution : par quel chemin les Gallo-Romains accédaient-ils au sommet du puy de Dôme ? Il serait curieux que l'on fût « mis sur la voie » par des études de magnétisme terrestre.
