



**HAL**  
open science

## Propriétés magnétiques des terres cuites et des roches

E. Thellier

► **To cite this version:**

E. Thellier. Propriétés magnétiques des terres cuites et des roches. Journal de Physique et le Radium, 1951, 12 (3), pp.205-218. 10.1051/jphysrad:01951001203020500 . jpa-00234370

**HAL Id: jpa-00234370**

**<https://hal.science/jpa-00234370>**

Submitted on 4 Feb 2008

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

## PROPRIÉTÉS MAGNÉTIQUES DES TERRES CUITES ET DES ROCHES

Par M. le Professeur E. THELLIER,  
 Directeur de l'Observatoire du Parc Saint-Maur.

**Sommaire.** — L'étude des propriétés magnétiques des terres cuites et des roches, importante en Géomagnétisme (anomalies magnétiques terrestres et recherche du champ magnétique fossile) a révélé un certain nombre de faits, d'une grande netteté, intéressants au point de vue purement magnétique et dont L. Néel vient de donner une théorie.

On traite d'abord de l'aimantation induite, en première approximation réversible : variation de la susceptibilité globale en fonction du champ et de la température, points de Curie, relations avec la composition minéralogique.

Mais terres cuites et roches sont faiblement ferromagnétiques. On étudie leur aimantation rémanente isotherme (notée A. R. I.) laissée par un champ donné ayant agi à température constante. On signale l'existence fréquente d'un traînage magnétique, parfois intense, au cours de cette aimantation et, après avoir suivi la variation de l'A. R. I. en fonction du champ inducteur, on s'intéresse à sa stabilité : désaimantation spontanée, désaimantation par action de champs faibles opposés, désaimantation par élévation de température.

Un phénomène plus remarquable est la faculté qu'ont les terres cuites et les roches volcaniques d'acquérir une aimantation thermorémanente (notée A. T. R.) par refroidissement dans un champ constant. On étudie successivement l'A. T. R. dite totale, acquise par refroidissement dans un champ  $H$  donné, depuis le point de Curie le plus élevé des constituants du corps jusqu'à la température ordinaire, et sa variation en fonction de  $H$ ; l'A. T. R. partielle, acquise dans les mêmes conditions, mais le champ  $H$  n'étant établi que pendant une fraction du refroidissement entre deux températures données. On montre l'existence d'une loi d'additivité remarquable des aimantations partielles acquises dans des intervalles consécutifs de température, par un corps donné, quelque complexe que soit sa composition. Puis on examine la stabilité de l'A. T. R., tout à fait différente de celle de l'A. R. I. : stabilité spontanée parfaite, insensibilité aux champs faibles, désaimantation par réchauffement. Cette désaimantation par réchauffement obéit à une loi simple, correspondant à une indépendance des moments acquis au refroidissement dans des intervalles arbitraires de température et à une sorte de réversibilité : le moment acquis par franchissement de l'intervalle  $T_1$ — $T_2$  au refroidissement disparaît complètement entre  $T_2$  et  $T_1$  au réchauffement.

Les faits précédents sont décrits en prenant surtout comme exemples le sesquioxyde de fer rhomboédrique et les terres cuites. Le cas des roches est ensuite examiné.

On signale enfin l'importance, observée expérimentalement, de la grosseur des grains des substances actives; cette grosseur des grains joue un rôle capital dans la théorie de Néel.

**1. Introduction.** — Cette étude, qui a donné lieu à un nombre considérable de publications, est essentielle dans deux chapitres importants du géomagnétisme : celui des anomalies magnétiques et celui des aimantations fossiles.

Je me propose de trier parmi les faits accumulés par les géophysiciens ceux qui peuvent avoir un intérêt plus général. En ce qui concerne leur explication, les géophysiciens n'ont jamais fait que de timides essais. Récemment, L. Néel [28] brassant d'un coup l'ensemble des observations, a élaboré une théorie qui a le grand mérite de s'étendre à tous les phénomènes observés en les coordonnant.

Remarquons au départ que les corps étudiés étant très hétérogènes les aimantations mesurées seront toujours des aimantations globales se rapportant à un échantillon qu'il sera bon de prendre assez

volumineux. Malgré cela, deux échantillons voisins auront toujours des paramètres magnétiques différents. Les comparaisons quantitatives précises ne seront intéressantes que si elles se rapportent à des états différents du même objet. D'autre part, si l'on convient d'éliminer quelques cas exceptionnels de roches massivement ferromagnétiques, les aimantations globales sont toujours très faibles. On qualifie de « très magnétiques » des roches dont la susceptibilité globale est de l'ordre de  $10^{-2}$  u. e. m. Enfin, les propriétés magnétiques seront souvent étudiées dans des champs très faibles de l'ordre de l'oersted.

Nous abandonnerons complètement tout ce qui a trait aux appareils de mesure (magnétomètres pendules magnétiques, inductomètres), un peu particuliers étant donnés les caractères des aimantations à mesurer.

2. **Aimantation induite réversible.** — Les terres cuites et les roches sont généralement à comportement ferromagnétique, mais on peut souvent, en première approximation, considérer l'aimantation induite par un champ imposé  $H$  comme réversible et considérer ainsi les susceptibilités  $k$  (ou coefficient d'aimantation  $\gamma$ ) comme bien définies.

1° *Susceptibilités initiales* (température ordinaire, champs faibles).

Un nombre considérable de déterminations de susceptibilités initiales ont été faites, à l'usage des prospecteurs surtout, sur des roches de toutes origines; beaucoup de données numériques ont été publiées, certaines correspondant à des roches analysées chimiquement et minéralogiquement [10, 16, 21, 26, 30, 46]. L'examen de quelques tableaux de valeurs montre qu'il n'y a pas de relation nette entre la susceptibilité et la position de la roche dans la classification pétrographique; cela vient surtout de ce que les quelques minéraux ferromagnétiques qui jouent le rôle principal dans l'aimantation des roches ne sont pour le pétrographe que des minéraux secondaires. Par exemple, dans une coulée volcanique, même récente, les propriétés magnétiques varient souvent nettement du centre au bord de la coulée, alors que l'observation pétrographique ne décèle que peu ou pas de changement [1, 31, 44]. Sur les roches anciennes, une altération, à laquelle les minéraux magnétiques semblent très sensibles, apporte souvent des changements de susceptibilité considérables [12, 38].

Cependant, il subsiste entre la composition et la susceptibilité des relations qualitatives, intéressantes pratiquement. En grossière approximation, on peut admettre que les roches sédimentaires sont normalement très peu magnétiques,  $\gamma$  compris les minerais de fer sédimentaires ( $\chi$  de l'ordre de  $10^{-5}$  u. e. m.); par cuisson (terres cuites) la susceptibilité croît généralement, parfois fortement [40]. Les roches cristallines acides (granite, gneiss, syénites, etc.) ont des susceptibilités encore faibles ( $\chi$  de l'ordre de  $10^{-4}$  u. e. m. souvent), tandis que les roches basiques, toutes volcaniques, ont des susceptibilités fortes ( $\chi$  de l'ordre de  $10^{-3}$  u. e. m.); ce sont elles qui produisent les anomalies magnétiques locales les plus importantes (de l'ordre du millier de  $\gamma$ ). La variation de susceptibilité avec la basicité de la roche, est intéressante en géophysique générale. Si l'on admet avec les géologues et les sismologues que la basicité des couches, qui constituent les premières dizaines de kilomètres de l'écorce terrestre, croît vite avec la profondeur (couche granitique, couche basaltique, couche péridotitique), il doit en résulter que la susceptibilité magnétique des couches successives doit croître très vite aussi en profondeur jusqu'à ce que l'élévation de température amène les roches au-delà de leur point de Curie le plus élevé.

La désignation pétrographique, même détaillée,

d'une roche ne permettant pas de prévoir ses propriétés magnétiques, les géophysiciens ont tenté de parvenir à cette prévision en faisant eux-mêmes la minéralogie magnétique des roches. Le compte rendu de ces recherches est une des parties les plus chargées de la littérature relative à notre sujet. Des chapitres importants de plusieurs Mémoires relativement récents [5, 13, 19, 21, 30, 39] sont consacrés à cette question que nous résumons à l'extrême. Des minéraux sont diamagnétiques et certaines roches, des roches sédimentaires seulement (gypses, sel gemme, calcaires et sables purs), sont globalement diamagnétiques. D'autres minéraux plus abondants sont paramagnétiques et certaines roches, sédimentaires et cristallines, sont globalement paramagnétiques. Mais les minéraux de beaucoup les plus importants, au point de vue des propriétés magnétiques, sont les ferromagnétiques (magnétite, titanomagnétites, pyrrhotine). L'étude de leur composition chimique a révélé une complication considérable sur laquelle nous reviendrons à la fin du chapitre relatif aux points de Curie. Reste un problème de pure physique, en partie indépendant du détail de la composition chimique de ces minéraux; ceux-ci sont, en effet, généralement dispersés dans la roche en cristaux de toutes dimensions et de toutes formes ([5], p. 399) et cette forme joue un rôle essentiel au point de vue magnétique. On peut traiter par le calcul des cas simples. Le plus simple, déjà très parlant, est celui d'une roche qui serait constituée par un ensemble amagnétique contenant des grains ferromagnétiques sphériques de susceptibilité vraie  $k_0$ , de diamètre quelconque, bien dispersés dans le milieu et de concentration  $s$  faible, quelques centièmes au maximum ( $s$ , rapport du volume  $v$  de l'ensemble des grains au volume  $V$  de l'échantillon considéré). Dans ces conditions, chaque grain se trouve dans le champ magnétique résultant du champ imposé  $H$  et de son propre champ démagnétisant, en négligeant l'effet, qu'on peut montrer faible, des autres grains; et l'échantillon entier se comporte comme s'il avait, dans le champ  $H$ , une susceptibilité apparente globale  $k = \frac{k_0 s}{1 + \frac{4}{3} \pi k_0}$ ;

pour  $k_0 \gg 1$ , la susceptibilité globale  $k$  tend vers  $\frac{3s}{4\pi}$ , limite supérieure de  $k$  qui ne dépend que de la concentration en éléments ferromagnétiques, quel que soit le détail de leur nature chimique.

Un problème plus général a été traité par R. Chevallier [2], celui de grains isotropes, ellipsoïdaux, semblables, de facteurs démagnétisants  $L$ ,  $M$ ,  $N$  suivant les trois directions principales de l'ellipsoïde. R. Chevallier tient compte de l'effet des autres grains sur un grain donné en admettant qu'ils agissent comme un milieu continu d'aimantation égale à l'aimantation globale effective de l'échantillon considéré. Son calcul, modifié par G. Grenet [11]

puis J. Coulomb [6], montre que l'échantillon se comporte comme un milieu homogène de susceptibilité apparente globale  $k$ , donnée par  $\frac{1}{k} = \frac{1}{k_0} + \frac{m}{S}$ , avec  $m = \frac{V-v}{v}$  et  $3S = \frac{k_0}{1+k_0L} + \frac{k_0}{1+k_0M} + \frac{k_0}{1+k_0N}$ . Comme précédemment, l'effet de la susceptibilité vraie  $k_0$  tend à disparaître dès que  $k_0$  est suffisamment forte. La forme des grains intervient par  $S$ , la susceptibilité  $k$  étant, toutes choses égales, minimum pour des grains sphériques  $L = M = N$ .

Le cas réel des roches est évidemment bien plus compliqué, les grains étant de formes variées et de susceptibilités différentes. J. Koenigsberger [19], puis T. Nagata ([26], p. 25) l'ont abordé en partant de calculs de F. Ollendorf, mais leur considération de facteur démagnétisant moyen est très discutable, ce qui me paraît enlever beaucoup d'intérêt à leur résultat.

Finalement, le cas simple des grains sphériques, qui donne une limite inférieure de  $k$ , pour  $k_0$  donné, conduit à un ordre de grandeur de  $2\ 500 \cdot 10^{-6}$  par unité pour-cent de minéral fortement ferromagnétique. C'est l'ordre de grandeur des susceptibilités observées dans les essais faits sur des roches synthétiques constituées par des grains de magnétite (artificielle ou cristaux broyés), dilués dans des corps inertes [19, 30]. Cet ordre de grandeur s'observe aussi dans les roches, à partir d'évaluations très grossières des minéraux ferromagnétiques. Mais ces résultats doivent être considérés comme qualitatifs; toute prévision minéralogique de susceptibilité est encore impossible.

Quelques auteurs ont fait la remarque, qui prendra toute son importance plus loin, que si le diamètre des grains magnétiques devenait très petit, la susceptibilité diminuait nettement par rapport à la prévision ([21], p. 123) [4, 30]; dans le même sens, on a observé que des roches vitrifiées par fusion au laboratoire sont nettement moins magnétiques que les roches dont elles proviennent, la susceptibilité croissant quand la cristallisation se poursuit par recuit ([5], p. 401). G. Grenet cependant trouve qu'il n'y aurait pas de différence systématique entre les susceptibilités des roches grenues, microgrenues, microlithiques et vitreuses ([10], p. 31). Dans les laves étudiées par R. Chevallier, les éléments ferromagnétiques fins sont des granules de 1 à 100  $\mu$  de diamètre ([5], p. 400); dans des varves pléistocènes étudiées par J. W. Graham au microscope électronique [9], ces particules ont des diamètres de 0,01 à 5  $\mu$ , les diamètres les plus fréquents étant compris entre 0,1 et 0,5  $\mu$ .

Dans un autre ordre d'idées, la susceptibilité globale peut présenter une certaine anisotropie dans le cas des roches schisteuses ou fluidales. Cet effet est signalé en plusieurs endroits [15] ([10], p. 71). Il peut avoir été exagéré par les procédés de mesure (magnétomètre).

2° *Variation de  $\chi = f(H)$  à la température ordinaire.* — La susceptibilité magnétique globale des terres cuites et des roches varie souvent nettement en fonction du champ, à température constante; des tableaux et des courbes illustrant ces variations ont été publiés [14, 26, 30]. Des susceptibilités constantes s'observent sur des corps peu magnétiques, il s'agit alors de roches à éléments tous para ou diamagnétiques; on trouverait des cas de décroissance [30], mais, en règle générale, la susceptibilité croît avec le champ jusqu'à des champs assez élevés, non atteints dans beaucoup de mesures. La variation peut être importante; pour un assez grand nombre de roches, K. Puzicha trouve une augmentation moyenne de 65 pour 100 pour  $H$  variant de 0 à 230 Oe, le maximum étant observé entre 20 et 220 Oe [30]. Il ne semble pas que ce phénomène mérite l'attention qu'on lui a souvent apportée: l'allure de la variation de la susceptibilité apparente dépend à la fois de celles des susceptibilités vraies des éléments ferromagnétiques et de la forme statistique des grains; elle ne caractérise rien de bien défini. Cette étude ne paraît donc pas avoir le pouvoir d'analyse des minéraux ferromagnétiques qu'on aurait pu espérer; elle ne fait que souligner le caractère plus ou moins franchement ferromagnétique du corps et l'irrégularité de forme des grains.

Récemment, T. Nagata [27] a pu tracer, pour des roches volcaniques variées, des courbes d'aimantation jusqu'à 4 000 Oe. Il trouve comme ordre de grandeur de l'aimantation spécifique  $\sigma$  maximum: 0,6 à 3 u. e. m.

3° *Variation  $\chi = f(T)$  à champ constant.* — Des analyses thermomagnétiques de nombreux échantillons de roches ont été faites à plusieurs reprises. Après celles de Allan, Honda et Takagi, Jacquet, deux importantes études sont celles de R. Chevallier et J. Pierre [5] et celle plus récente de T. Nagata [26]; l'une et l'autre portent sur des roches volcaniques et ont été poussées jusque vers 700° C, les champs utilisés ont été de l'ordre de 100 Oe dans la première et de 2 Oe dans la seconde.

Deux difficultés se présentent dans l'interprétation des courbes obtenues. D'abord la roche chauffée se modifie et des essais successifs sur le même échantillon donnent des courbes différentes ne correspondant plus au corps initial. Une autre complication vient de l'aimantation thermorémanente acquise par refroidissement en champ magnétique dans le cas des mesures à la balance de Curie.

Pour une roche contenant des grains sphériques d'un ferromagnétique fort, la courbe thermomagnétique doit tendre vers un palier se terminant par une chute rapide vers le point de Curie ferromagnétique, supposé bien défini, de la substance. En fait, on observe soit des courbes de ce type, mais avec

une partie arrondie en fin de chute correspondant à un point de Curie mal défini (et dans les champs faibles la possibilité d'une augmentation de  $\chi$  au début) (fig. 1 A), soit des courbes à plusieurs arcs (fig. 1 B) qu'on peut interpréter comme résultant

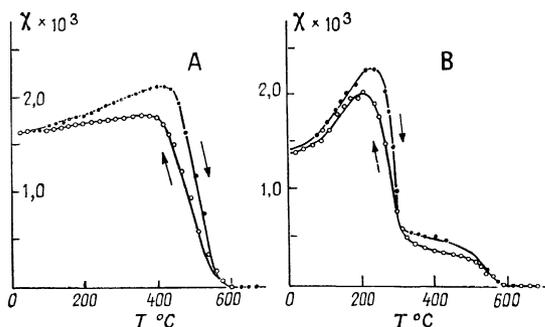


Fig. 1. — Variation  $\chi = f(T)$  (T. Nagata [26]).  
Laves basaltiques.

de la présence de plusieurs substances de points de Curie différents, eux aussi mal définis généralement; R. Chevallier et J. Pierre observent parfois des portions de courbes à chute continue qui les amènent à définir un « point de Curie équivalent » ([5], p. 435).

Si les minéraux magnétiques des roches se réduisaient à quelques corps bien définis, et stables en fonction de la température, les points de Curie observés, qui seraient d'ailleurs bien définis aussi, se retrouveraient de roches en roches et identifieraient ces minéraux, la courbe devant donner d'ailleurs une idée de leurs pourcentages. Il n'en est pas ainsi pratiquement. R. Chevallier et J. Pierre ont nettement montré que les « points de Curie » observés sur un grand nombre de roches volcaniques couvrent toute l'échelle des températures de la température ordinaire jusqu'à 580°C, point de Curie de la magnétite pure (dans les terres cuites le point de Curie supérieur observé est souvent 670°C). D'autre part, ils ont pu, par recuit d'une lave donnée, faire rétrograder progressivement ses points de Curie (variations atteignant 150°). Enfin, examinant des échantillons (39 au total) pris en divers points d'une même coulée de laves de l'Etna, ils ont montré que les courbes thermomagnétiques formaient un réseau régulier entre une courbe à point de Curie principal bas et une autre à point de Curie proche de celui de la magnétite; des échantillons pris dans une même carrière peuvent présenter des différences aussi grandes que celles observées sur toute la coulée. Ils sont ainsi conduits à conclure que les éléments magnétiques des roches sont des solutions solides, idée déjà soutenue par Ch. Jacquet à la suite d'une étude sur des roches volcaniques d'Auvergne. On aurait là en même

temps l'explication des arrondis signalés vers les points de Curie conventionnels. S'appuyant sur des résultats de W. Kopp et A. Brun, R. Chevallier et J. Pierre concluent en tentant une interprétation générale de la composition des minéraux ferromagnétiques des roches volcaniques, solutions solides des corps  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{FeO}$  et  $\text{TiO}_2$ .

Cette conclusion, dont les détails peuvent être discutés, semble devoir être généralisée de la façon suivante. Une roche forme un milieu à grand nombre de constituants chimiques; outre  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{FeO}$  et  $\text{TiO}_2$ , elles contiennent des oxydes basiques tels que  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , ... et les études des chimistes (celles des écoles françaises de G. Chaudron et H. Forestier en particulier) ont montré que ces corps étaient susceptibles de donner, par des réactions à l'état solide dont l'étude est si active actuellement, une variété étonnante de composés définis et de solutions solides, parmi lesquels tout le groupe des ferrites peu évoqué jusqu'ici par les géophysiciens. Par exemple, un travail récent de E. Pouillard [29] insiste sur la facilité avec laquelle les oxydes de Fer  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  et  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  subissent des substitutions diverses donnant des solutions solides à propriétés magnétiques progressivement différentes. Ainsi le système  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{FeO}$ ,  $\text{TiO}_2$  qu'il étudie en détail est susceptible de fournir plusieurs composés définis, des solutions solides limitées, des solutions solides totales, dont il donne le détail et dont il donne aussi les points de Curie ou les intervalles de variation de ces points. C'est, éclairée d'un coup, toute la chimie d'un groupe important de corps comprenant les ilménites et les titanomagnétites, corps qui sont des constituants magnétiquement importants des roches. Ainsi, le chimiste partant de ces trois oxydes seulement crée une variété déjà considérable de minéraux ferromagnétiques ayant des points de Curie étalés sur une grande étendue. Si l'on ajoute alors toutes les possibilités venant des autres constituants des roches, on comprend que tout essai pour établir la composition minéralogique des éléments magnétiques d'une roche soit voué à l'échec et que la recherche des points de Curie ne puisse pas apporter d'aide vraiment efficace dans cette détermination. L'espoir d'arriver à la connaissance minéralogique des roches pour en déduire ensuite tout le comportement magnétique, paraît vain. Tout compte fait, la structure de la roche, la dimension de ses grains ferromagnétiques en particulier, semble être, à certains points de vue, un caractère bien plus important que la composition chimique elle-même.

Cependant, la détermination des points de Curie effectifs, approchés, garde un certain intérêt au point de vue de l'étude des rémanences, qui donnera, d'ailleurs comme on le verra, d'autres procédés de détermination de ces points (procédés qui seront particulièrement utiles pour les terres cuites), la distinction des roches à point de Curie bas, de celles à

points de Curie plus élevés, est considérée comme de plus en plus importante pour les applications géophysiques [20]. Au point de vue, d'autre part, de la physique de l'écorce terrestre, la connaissance des points de Curie est essentielle pour tenter une prévision de l'état magnétique des couches dont la température croît avec la profondeur.

3. **Aimantation rémanente isotherme (A.R.I.).** — 1° *Cycles d'hystérésis.* — L'hystérésis apparaît nettement, dans toute mesure un peu précise d'aimantation induite globale sur la plupart des terres cuites et des roches volcaniques; plusieurs auteurs ont publié des cycles, qui sont toujours très effilés, correspondant à des corps et à des champs limites variés [26, 30].

Au point de vue des applications, ces cycles d'hystérésis proprement dits (aimantations mesurées dans le champ imposé) ne semblent pas présenter beaucoup d'intérêt; ils dépendent encore de la nature des ferromagnétiques et de la forme des grains. Ce sont seulement les aimantations rémanentes globales qui retiendront notre attention. Une telle aimantation  $\sigma_r$  correspondra, pour un échantillon donné, à une température donnée (presque toujours la température ordinaire 20°, conventionnellement) et au champ maximum  $H$  (champ extérieur) qui l'a provoquée. Strictement, il y aura toujours lieu de préciser lequel des deux mécanismes habituels a été utilisé: ou champ croissant de zéro à  $H$  puis ramené à zéro, ou cycles d'amplitude  $H$  avec retour final à zéro. C'est une telle aimantation que nous qualifierons, suivant la notation de L. Néel, de A. R. I.

La valeur du champ coercitif relevé sur les courbes d'hystérésis présente un certain intérêt. Pour des roches volcaniques variées, T. Nagata, dans un travail déjà cité [27], observe des champs coercitifs compris entre 60 et 450 Oe pour un champ maximum de 4 000 Oe ne réalisant pas franchement la saturation. Pour des champs de l'ordre de 20 Oe, ces champs coercitifs varient entre 0,5 et 2,5 Oe.

2° *Trainage magnétique.* — En réalité, l'aimantation  $\sigma_r$  n'est pas bien définie si l'on ne précise pas le temps d'action du champ  $H$  et le temps écoulé entre la suppression de ce champ et le moment de la mesure. Terres cuites et roches présentent, en effet, une viscosité magnétique marquée qui a particulièrement retenu l'attention de L. Néel dans son étude théorique [28].

Ses effets avaient déjà été notés dans d'intéressantes observations [23] quand je l'ai observée et étudiée systématiquement, tant à l'établissement du champ qu'à sa suppression, dans des mesures faites sur des échantillons cylindriques au moyen d'un bon magnétomètre à bobines. Le corps, parfaitement désaimanté, étant en place, on établit un champ  $H$  à l'instant zéro. L'aimantation induite

immédiatement acquise correspond à la susceptibilité du corps; puis l'aimantation croît progressivement, cette croissance restant mesurable après des heures et même des jours. Lorsqu'on supprime le champ  $H$ , l'aimantation diminue brusquement d'une quantité correspondant sensiblement à l'aimantation brusque initiale et il reste ainsi une aimantation rémanente visqueuse, d'autant plus forte, toutes choses égales, que l'action du champ a été plus prolongée ([40], § 73). Pour beaucoup de terres cuites, l'effet est relativement très faible dans des champs de quelques Oersted; il peut être important pour des roches; dans un essai sur un basalte ([40], § 91) l'aimantation provoquée par un champ de 1 Oe passait de  $4,45 \cdot 10^{-4}$  à l'établissement du champ, à  $6,5 \cdot 10^{-4}$  au bout de quatre jours.

Le champ magnétique étant supprimé, l'aimantation visqueuse restante décroît progressivement. Il en est de même pour une aimantation rémanente acquise par action brève d'un champ un peu fort; c'est ce cas qui a été le plus souvent étudié. Je n'ai pas essayé jusqu'ici de faire la distinction, qui pourrait être intéressante, entre les deux mécanismes. Ce phénomène est général et très ample; je l'ai observé sur toutes les terres cuites que j'ai étudiées et sur des roches ([40], § 73). E. F. Hérouin et A. F. Hallimond [14] ont donné trois courbes de décroissance de  $\sigma_r$  en fonction du temps  $\theta$ , pour une dolérite aimantée par un champ de 25 Oe et une tholéiite aimantée successivement dans les champs de 88 et 56 Oe et ils ont observé que la décroissance était sensiblement linéaire en  $\log \theta$ . Dans ces essais, la diminution au bout de quatre jours était de l'ordre du tiers de la valeur mesurée 1 mn après la suppression du champ. L. Néel observe la même loi en  $\log \theta$  sur les quelques résultats de mesures que j'ai publiés [28]. J'ai fait quelques observations sur de longues durées; par exemple, une brique ordinaire ( $C_1$ ), qui, ayant acquis par action d'un champ de 160 Oe un moment rémanent de 2,23 u.e.m., mesuré par induction 2 mn après la suppression du champ, présente des moments successifs de 2,06 après quatre jours, 1,96 après un mois, 1,82 après un an et 1,71 après sept ans. Mais, dans ces essais de longue durée, l'effet de temps interfère avec l'effet de température d'après les développements de L. Néel [28]. Je considère qu'il faut, à la lumière de ses idées, reprendre une expérimentation soignée sur le traînage magnétique de quelques corps définis, comme des ferrites ou des roches synthétiques à magnétite, puis sur des roches et des terres cuites, en séparant l'effet de temps de celui de température et aussi, en définissant bien les instants origine et en utilisant des corps exactement désaimantés au préalable, ce qui n'a pas toujours été fait dans les essais initiaux.

En ce qui concerne les recherches sur le champ fossile (que ce soit à partir d'aimantations thermo-

rémanentes, ou de particules orientées), on conçoit que ces phénomènes d'aimantation et de désaimantation visqueuse soient graves, les temps considérés en géomagnétisme étant très grands et il est évident que des corps très sensibles à ces aimantations sont d'avance sans intérêt comme témoins fidèles du champ ancien d'une époque donnée.

3° *Courbes de rémanences isothermes.* — Il est intéressant de suivre la variation, en fonction de  $H$ , de l'aimantation rémanente  $\sigma_r$ , acquise par un échantillon, à la température ordinaire, dans des conditions données (cycles ou champ simple, temps d'action et de repos avant la mesure), dans des champs  $H$  successifs croissants. La courbe de  $\sigma_r$  en fonction de  $H$  se compose d'une partie d'allure parabolique, suivie après une droite d'inflexion d'une courbe de saturation. Dans les champs faibles, généralement considérés en géomagnétisme, le phénomène est entièrement caractérisé par le paramètre  $b$  de la relation  $\sigma_r = bH^2$ , relative à la partie initiale de la courbe. Pour le sesquioxyde de fer, disons pour un certain échantillon de sesquioxyde de fer en poudre agglomérée et stabilisé par recuit [33] on a :  $b = 3 \cdot 10^{-10}$  u. e. m. (susceptibilité initiale  $\chi = 27 \cdot 10^{-6}$ ) (fig. 2). Pour des terres cuites de

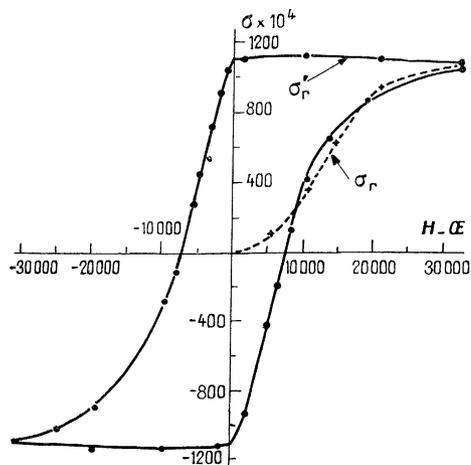


Fig. 2. —  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . A. R. I. (J. Roquet [33]).

Courbe de rémanence :  $\sigma_r = f(H)$ .

Cycle de rémanence :  $\sigma'_r = f(H)$ .

susceptibilités  $\chi$  de l'ordre de  $20 \cdot 10^{-6}$ ,  $b$  est de l'ordre de  $10^{-8}$  à  $10^{-9}$ . Pour des roches volcaniques, les valeurs de  $b$  sont couramment de l'ordre de  $10^{-7}$  à  $10^{-6}$ .

Les aimantations rémanentes de champs intenses ont été étudiées, en relation avec le problème de l'aimantation des roches par les courants dus à la foudre. Pour les corps précédemment cités, elles sont de l'ordre de  $10^{-1}$  u. e. m. pour le sesquioxyde,  $10^{-2}$  pour les terres cuites et de l'ordre de quelques

unités e. m. pour les roches volcaniques ([10], p. 59), [14, 30, 33, 34].

4° *Stabilité de l'A. R. I. : désaimantation par champs opposés.* — L'aimantation rémanente isotherme, on l'a vu, diminue spontanément en fonction du temps, même en l'absence de tout champ magnétique extérieur. Si l'on considère une aimantation acquise depuis plusieurs jours, cette variation peut être négligée. Dans ces conditions, faisons agir sur l'échantillon portant une telle aimantation  $\sigma_r$ , acquise dans un champ  $H_0$ , des champs successifs  $H$  croissant en valeur absolue et opposés à l'aimantation et mesurons chaque fois l'aimantation rémanente restante après suppression du champ  $H$  (bien entendu, il faut préciser encore les durées d'action et le temps s'écoulant avant la mesure). Si l'on fait varier  $H$  jusqu'à  $-H_0$ , puis si l'on fait agir à nouveau  $H$  dans le sens initial, les points  $\sigma'_r = f(H)$  constituent un cycle de rémanence que l'on peut compléter par quelques essais correspondant à des valeurs décroissantes de  $H$  entre  $H_0$  et zéro. J'ai tracé de tels cycles de rémanence pour les terres cuites [40]; M<sup>lle</sup> J. Roquet l'a fait récemment pour le sesquioxyde de fer [33] (fig. 2). On observe que les branches de désaimantation au voisinage de  $H = 0$  sont presque linéaires et de forte pente, alors que la pente de la courbe de rémanence initiale est nulle vers  $H = 0$ . Ainsi, l'A. R. I. est sensible à des champs opposés très faibles qui ne laisseraient pas de rémanence mesurable sur le corps non aimanté. Une caractéristique numérique de ces cycles est le champ  $H_d$  (champ de désaimantation) qui ramène à zéro l'aimantation du corps (mesurée dans un champ nul). C'est une sorte de champ coercitif de l'A. R. I. Quelques résultats récents de M<sup>lle</sup> Roquet sur une terre cuite illustrent la variation de  $H_d$  en fonction de  $H_0$  [36]. Pour une comparaison ultérieure, il est intéressant de noter que ce champ  $H_d$  est toujours inférieur au champ magnétisant  $H_0$ .

5° *Disparition de l'A. R. I. par chauffage.* — Un corps portant une A. R. I. sensiblement stabilisée,  $\sigma_r$  est porté à une température  $T$ , en principe dans un champ extérieur nul. On le ramène à la température ordinaire et l'on mesure son aimantation rémanente restante  $\sigma'_r$ . On fait croître progressivement  $T$ . Strictement, la durée du séjour à la température  $T$  intervient, mais relativement peu et un réchauffement renouvelé à une température  $T$  précédemment atteinte est pratiquement sans effet.

Des courbes de  $\sigma'_r$  en fonction de  $T$  pour différentes valeurs de l'aimantation initiale ont été publiées pour des terres cuites [35, 40]. Ces courbes, dont l'allure est très différente de celles obtenues sur les mêmes corps par analyse thermomagnétique ont, pour des corps définis, une forme simple caracté-

térisée par une décroissance rapide au voisinage de la température ordinaire et une concavité vers le haut, l'ordonnée nulle marquant le point de Curie du corps; pour des corps à composition complexe comme l'est une terre cuite (fig. 3 B) elles présentent

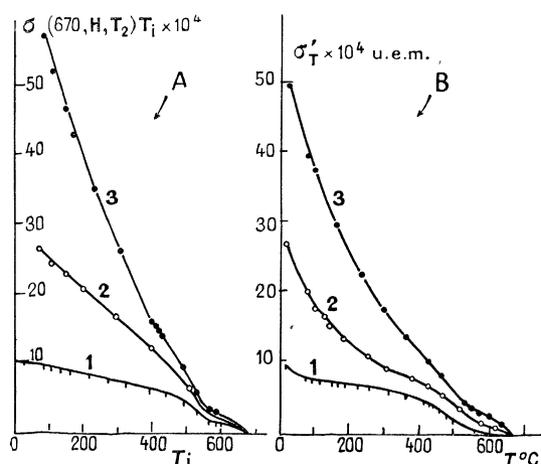


Fig. 3. — Désaimantation par chauffe. Terre cuite.

A, A. T. R., moyenne et forte  $\sigma(670, H, T_2) T_i$  en  $f(T_i)$  :  
 1,  $H = 17$  Oe;  $T_2 = 20^\circ\text{C}$ ; 2,  $H = 119^\circ$  Oe,  $T_2 = 66^\circ\text{C}$ .;  
 3,  $H = 7700$  Oe,  $T_2 = 90^\circ\text{C}$ .  
 B, A. R. I., moyenne et forte :  $\sigma'_T = f(T)$ .  
 Champs magnétisants initiaux : 1, 1470 Oe; 2, 7600 Oe;  
 3, 26 800 Oe.

des arcs correspondant à des points de Curie inférieurs plus ou moins nettement marqués.

La conclusion, intéressante en géophysique, est que des réchauffements modérés ont un effet relativement grand sur une A. R. I., même sur un corps à point de Curie élevé ( $\text{Fe}_2\text{O}_3\alpha$ ).

#### 4. Aimantation thermorémanente A. T. R. —

Les premières observations sur le phénomène sont très anciennes; Melloni (1853), Gherardi (1862), Folgheraiter (1890) ont montré expérimentalement que des roches ou des terres cuites chauffées au rouge et refroidies dans le champ magnétique terrestre s'aimantaient et que l'aimantation ainsi acquise était dirigée comme le champ, qu'elle était relativement forte, étant donné la faible valeur de ce champ, et remarquablement stable. Ultérieurement, ces principes ont été appliqués en géomagnétisme dans un grand nombre de travaux. Plus tard, les chimistes étudiant le sesquioxyde de fer et les ferrites à la balance de Curie ont retrouvé ce phénomène : c'est l'aimantation à chaud de H. Forestier [7, 24, 29].

La thermorémanence constitue de beaucoup le chapitre le plus important et le plus intéressant dans l'étude des propriétés magnétiques des roches volcaniques et des terres cuites où elle est générale. Sans doute n'est-elle pas, comme

l'affirme T. Nagata [27], absolument spéciale à ces corps naturels, mais elle constitue, en tout cas chez eux, une particularité remarquable.

Pendant longtemps les géophysiciens ont davantage cherché à se servir de la thermorémanence qu'à l'étudier systématiquement. Avec K. Puzicha [30], J. Koenigsberger [17, 18, 21, 22], commence vraiment un travail méthodique, riche en résultats et en conséquences pour les recherches de géomagnétisme fossile. J'ai ensuite étudié les mêmes problèmes sur les terres cuites naturelles, y compris les briques tout à fait ordinaires, mais surtout sur des argiles fines moulées en cylindres et cuites dans des conditions variées de température, d'atmosphère du four, de champ magnétique [40, 41]. Ultérieurement, une étude analogue a été entreprise par M<sup>lle</sup> Roquet sur le sesquioxyde de fer rhomboédrique [32] en même temps que des essais nouveaux sur les terres cuites, surtout en ce qui concerne l'effet de champs intenses [34]. J'exposerai d'abord les résultats ainsi obtenus et je reviendrai ensuite sur le cas des roches.

#### 1° Terres cuites stabilisées. A. T. R. totale. —

La plupart des essais comporteront des chauffes et des refroidissements; j'attache une grosse importance à ce que ces opérations ne provoquent plus de variations irréversibles dans la composition de la terre cuite, au moins dans ses éléments ferromagnétiques. Cette stabilisation est assez générale pour des terres, cuites à température relativement élevée et pendant un temps assez long, ce qui est le cas de toutes les pièces céramiques, y compris les terres cuites grossières. Au laboratoire, les cuissons d'essais sont souvent plus rapides et des recuits sont souvent nécessaires; il est parfois indispensable aussi d'opérer en atmosphère définie, neutre par exemple, pour obtenir la stabilité cherchée.

Admettons au départ comme un fait expérimental que toute terre cuite, réchauffée puis refroidie en *champ magnétique nul*, est rigoureusement désaimantée dès que sa température a dépassé une certaine valeur  $T_0$ . Cette température est souvent  $670^\circ\text{C}$  et dans tout ce qui suit, au lieu de  $T_0$ , j'emploierai cette valeur  $670^\circ$  plus parlante. L'expérience de base est la suivante : on chauffe une terre cuite (échantillon cylindrique ou brique ordinaire) jusqu'à  $670^\circ$  et on la laisse se refroidir dans un champ magnétique  $H$  donné, qui peut être très faible; c'est par exemple le champ magnétique terrestre, soigneusement mesuré là où se trouve l'objet. Le corps étant revenu à la température ordinaire, que nous supposons toujours égale à  $20^\circ$ , il porte un moment magnétique permanent que l'on mesure. On observe les faits suivants :

— le moment est dirigé dans l'objet comme l'était le champ agissant au refroidissement;

— le moment ne change pas par manipulations dans le champ terrestre;

— le moment est le même si l'on reprend une nouvelle chauffe en changeant l'orientation du corps par rapport au champ (terre cuite stable par hypothèse, non franchement anisotrope dans son ensemble; les champs démagnétisants liés à la forme de l'objet sont insignifiants);

— le moment est le même quel que soit le champ qui pouvait agir sur le corps pendant la chauffe;

— le moment reste le même si la chauffe a été poussée au delà de 670° et quel que soit le champ ayant agi de la température supérieure de chauffe à 670°;

— enfin, mais avec quelques réserves (une expérimentation fine restant à faire) le moment ne dépend pas, pratiquement, de la vitesse de refroidissement.

Désignons par  $\sigma_{(670, H, 20)}$  l'aimantation spécifique globale du corps (moment moyen par gramme); nous la qualifierons de totale pour indiquer que le champ a agi pendant tout le refroidissement.

2° Variation de l'A. T. R. totale en fonction du champ magnétisant. — L'opération d'aimantation par refroidissement de 670 à 20° dans un champ magnétique est répétée pour différentes valeurs de  $H$ . Des courbes de variation correspondantes,  $\sigma_{(670, H, 20)}$  en fonction de  $H$ , ont été établies pour des terres cuites et pour des champs relativement faibles (jusqu'à 40 Oe environ) ([40], § 55) et plus récemment pour du sesquioxyde de fer et pour une terre cuite, les essais ayant été poussés jusqu'à des champs élevés (7 700 Oe) [34].

*Champs très faibles.* — Dans la région des champs très faibles, de l'ordre de l'Oersted, l'A. T. R.  $\sigma_{(670, H, 20)}$  est proportionnelle au champ. Elle présente le caractère remarquable d'être relativement élevée. Pour un objet donné, le rapport  $\frac{\sigma_{(670, H, 20)}}{H}$ , qui a les dimensions d'une susceptibilité massique, est grand par rapport à la susceptibilité de l'objet, mesurée à 20° et considérable vis-à-vis du quotient (extrapolé vers les champs faibles),  $\frac{\sigma_r}{H}$ ,  $\sigma_r$  étant l'A. R. I. que laisserait à 20° l'action brève du champ  $H$ . Par exemple, on a, pour  $H$  de l'ordre de l'Oersted,

	$\frac{\sigma_{(670, H, 20)}}{H}$	$\gamma$	$\frac{\sigma_r}{H}$
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (échantillon n° 4)			
[32] .....	3,7 · 10 <sup>-4</sup>	27 · 10 <sup>-6</sup>	3 · 10 <sup>-10</sup>
Terre cuite [40, § 55] .....	1,2 »	20 »	3 · 10 <sup>-8</sup>
» [34] .....	190 »	400 »	—
Brique ordinaire .....	1,0 »	20 »	1 · 10 <sup>-9</sup>
	10 »	—	1 · 10 <sup>-9</sup>

*Champs moyens.* — Un autre fait remarquable apparaît immédiatement : dans les champs de quelques

Oersted, l'A. T. R. totale croît moins vite que le champ et bientôt beaucoup moins vite (fig. 4).

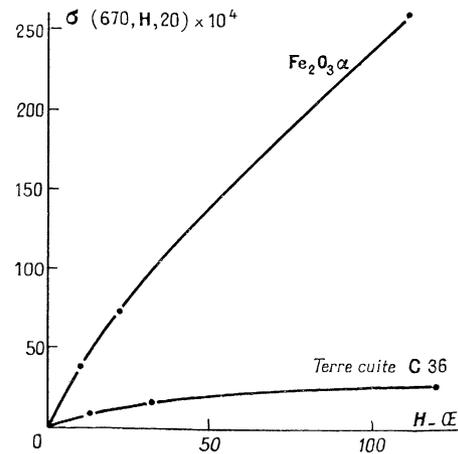


Fig. 4.  
A. T. R. :  $\sigma_{(670, H, 20)}$  en fonction de  $H$  (J. Roquet).  
Champs faibles et moyens.

Ainsi, la variation en fonction du champ est très différente de celle de l'aimantation induite et de la rémanence qui croissent, dans cette région, presque linéairement pour la première et beaucoup plus vite que le champ pour la seconde.

*Champs forts.* — Il est intéressant de comparer l'A. T. R. à l'A. R. I. Les deux aimantations tendent vers une intensité de saturation qui pourrait être commune, l'A. T. R. restant toujours supérieure à l'A. R. I. pour un champ donné (fig. 5). Pour la

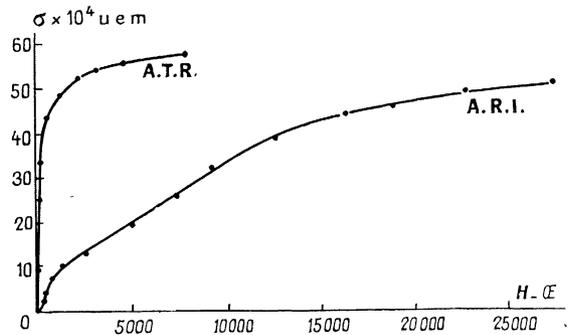


Fig. 5.  
Terre cuite. A. T. R. et A. R. I. en fonction de  $H$ .  
(J. Roquet [34]). Champs forts.

terre cuite étudiée par M<sup>lle</sup> Roquet [34], cette saturation est presque atteinte pour l'A. T. R. dans le champ maximum utilisé, de 7 700 Oe; elle n'est pas atteinte encore pour l'A. R. I. dans le champ de 26 800 Oe. L'aimantation rémanente à saturation

reste faible : de l'ordre de  $1000 \cdot 10^{-1}$  u. e. m. pour  $\text{Fe}_2\text{O}_3\alpha$ ,  $60 \cdot 10^{-1}$  pour la terre cuite. Ainsi, les deux mécanismes A. T. R. et A. R. I. si différents dans les champs faibles, semblent converger vers un même effet dans les champs très forts.

3° *Aimantations partielles. Loi d'additivité.* — Un objet donné étant réchauffé à  $670^\circ$ , on peut ne faire agir le champ  $H$  magnétisant que dans un intervalle donné de température, de  $T_1$  à  $T_2$ , le champ agissant dans les deux intervalles  $670^\circ - T_1$  et  $T_2 - 20^\circ$  étant rendu nul. Désignons par  $\sigma_{(T_1, H, T_2)}$  l'aimantation spécifique globale rémanente ainsi acquise, mesurée à la température ordinaire :

— cas de  $T_2 = 20^\circ$ .

Dans des essais successifs, faisons varier  $T_1$ ,  $T_2$  étant toujours la température ordinaire et  $H$  ayant une valeur fixée. L'aimantation acquise  $\sigma_{(T_1, H, 20^\circ)}$  (que j'ai parfois appelée aimantation inférieure relative à  $T_1$  dans le champ  $H$ ) croît avec  $T_1$  d'abord lentement, puis rapidement et atteint un palier à la température  $T_0$  de désaimantation totale précédemment définie. A partir de  $T_0$ , elle a évidemment atteint la valeur  $\sigma_{(670, H, 20^\circ)}$  ou aimantation totale. L'expérience montre qu'il est inutile de revenir chaque fois à  $670^\circ$ ; on arriverait au même résultat si, partant d'une terre cuite préalablement désaimantée, on la portait à  $T_1$  ou au-dessus de  $T_1$ , puis la laissait refroidir de  $T_1$  à  $20^\circ$  en champ  $H$  et si l'on répétait cette opération pour  $T_1$  de plus en plus élevé. L'accord de ces deux séries d'essais suppose que la température  $T_1$  mesurée est bien celle de l'échantillon, lui-même à température uniforme; sinon l'erreur commise dans l'évaluation de  $T_1$  n'est pas la même dans les deux cas et il pourrait y avoir un léger désaccord apparent dans les valeurs trouvées pour une même température  $T_1$ .

— cas de  $T_1 = 670^\circ$ .

Faisons, au contraire, agir le champ dès  $670^\circ$  et faisons varier  $T_2$  dans des essais successifs. L'aimantation ainsi acquise sera désignée par  $\sigma_{(670, H, T_2)}$  (aimantation supérieure par rapport à  $T_2$ , dans le champ  $H$ ). L'aimantation nulle pour  $T_2 = 670^\circ$  croît quand  $T_2$  décroît pour atteindre évidemment la valeur de l'aimantation totale  $\sigma_{(670, H, 20^\circ)}$  quand  $T_2 = 20^\circ$ . Des essais nombreux, la plupart d'ailleurs indirects, comme on le verra plus loin, montrent que les deux courbes sont symétriques par rapport à une parallèle à l'axe des  $T$  passant par l'ordonnée moyenne, ce qu'on peut traduire par la relation

$$\sigma_{(670, H, 20^\circ)} = \sigma_{(670, H, T_1)} + \sigma_{(T_1, H, 20^\circ)}.$$

*Généralisation. Loi d'additivité.* — On peut découper l'intervalle de température en plus de deux intervalles partiels limités par les températures  $670^\circ, T_1, T_2, \dots, 20^\circ$ . On a vérifié avec une précision relativement grande (1 pour 100) qu'on

avait alors (cas de trois intervalles) [37] :

$$\sigma_{(670, H, 20^\circ)} = \sigma_{(670, H, T_1)} + \sigma_{(T_1, H, T_2)} + \sigma_{(T_2, H, 20^\circ)}.$$

Les relations précédentes valent-elles hors de l'intervalle de proportionnalité de l'A. T. R. au champ  $H$ ? Elles n'ont pas été étudiées, jusqu'ici, franchement hors de cette région; d'une part parce que les applications géomagnétiques correspondent toujours à des champs très faibles et que, d'ailleurs, la loi d'additivité sous sa forme directe n'est pas utilisée en fait, d'autre part à cause de la difficulté de maintenir un four pendant des heures dans un champ un peu intense, constant, et reproductible d'une expérience à l'autre.

4° *Stabilité dans le temps de l'aimantation thermo-rémanente.* — De très nombreux essais sur des terres cuites au laboratoire, sur des briques ordinaires et récemment sur un échantillon de sesquioxyde de fer, ont montré une stabilité tout à fait remarquable de l'A. T. R. Un tel moment, provoqué au laboratoire et mesuré dès la sortie du four de l'objet, ne nous a jamais montré de variation franche dépassant la limite de précision des appareils, cette précision étant telle qu'elle permet une mesure des variations apportées par traînage magnétique (A. R. I. visqueuse) dans le champ terrestre où sont abandonnés les objets et par deux effets de température qui seront étudiés (réversible et irréversible). Compte tenu de ces légères variations, facilement isolables, la stabilité de l'A. T. R. me paraît totale, certaines observations étant maintenant poursuivies sur une dizaine d'années. Précisons qu'il s'agit d'objets conservés au laboratoire et d'A. T. R. acquises en champs relativement faibles. Le comportement de l'A. T. R. est donc, à ce point de vue aussi, très différent de celui de l'A. R. I., à évolution spontanée si marquée.

5° *Désaimantation par champs opposés.* — De nombreux essais ont été faits [36, 40], tant sur les terres cuites que sur le sesquioxyde de fer, dans lesquels on a opposé, à une A. T. R., des champs magnétiques croissants, agissant pendant un temps donné et mesuré chaque fois le moment magnétique résultant.

*Champs faibles.* — Des champs de quelques dizaines d'Oersted pour les terres cuites (quelques centaines pour  $\text{Fe}_2\text{O}_3\alpha$ ) n'ont aucune action mesurable sur l'A. T. R., quelle que soit la direction qu'on leur donne par rapport à celle de cette A. T. R. On observera que ces champs peuvent être de beaucoup supérieurs au champ  $H$  ayant provoqué l'A. T. R.

*Champs moyens.* — Des champs de plusieurs centaines d'Oersted pour les terres cuites (plusieurs milliers pour  $\text{Fe}_2\text{O}_3\alpha$ ) modifient le moment total observé d'un corps portant initialement une A. T. R.

pure. En étudiant l'effet de cycles de rémanence, comme on l'a fait pour l'A. R. I., on voit que l'effet est double; tout se passe comme si le champ, d'une part, provoquait une A. R. I. comme il le ferait sur le corps dépourvu d'aimantation, d'autre part réduisait partiellement l'A. T. R. Par exemple, un champ moyen agissant perpendiculairement à l'A. T. R. provoque une A. R. I. (prévisible) suivant cette direction et modifie peu l'A. T. R. D'autre part, j'ai fait à plusieurs reprises l'expérience suivante : par action d'un champ suffisant, agissant en sens opposé à l'A. T. R., on amène le moment magnétique total d'un objet à être nul. On observe alors de jour en jour ce fait assez paradoxal à première vue : une aimantation apparaît spontanément et croît dans le sens de l'A. T. R. initiale. En réalité, l'aimantation n'était pas nulle, mais le corps portait deux aimantations, en quelque sorte indépendantes, un reste d'A. T. R. et une A. R. I. opposée : la première stable, la seconde visqueuse disparaissant progressivement. Le problème de la stabilité propre de l'A. T. R. est ainsi posé; il pourra être étudié par action de champs alternatifs.

*Champs très forts.* — L'action de champs intenses sur des A. T. R., dues à des champs faibles et forts, qui n'a pas jusqu'ici d'application géophysique n'avait pas été explorée. Récemment M<sup>lle</sup> Roquet en a commencé l'étude sur une terre cuite en comparant d'ailleurs le comportement d'aimantations thermorémanentes et rémanentes isothermes du même ordre de grandeur et elle a donné les courbes de désaimantation correspondantes [36]. Sur ces courbes, on peut relever les champs  $H_d$  de désaimantation (disons apparente) considérablement plus élevés que le champ  $H$  magnétisant pour les A. T. R. faibles et moyennes (c'est, on l'a vu, l'inverse pour l'A. R. I.); ils se rapprochent de  $H$  et l'égalent vers 7 700 Oe et sont alors peu différents de  $H_d$  correspondant aux A. R. I. du même ordre de grandeur.

Les faits qui précèdent marquent une nouvelle différence, fondamentale dans les champs faibles, entre l'A. T. R. et l'A. R. I., la première étant insensible à des champs faibles opposés, la seconde très sensible; la différence s'atténue cependant dans les champs très élevés comme elle s'atténuait dans le mécanisme de l'aimantation.

*6° Désaimantation par réchauffement.* — Une étude étendue de ces phénomènes a été faite pour les terres cuites [36, 40, 41] et le sesquioxyde de fer [37].

*Cas de l'A. T. R. totale.* — Un objet portant une A. T. R. totale  $\sigma_{(670, H, 20)}$ , mesurée à 20°, est réchauffé à la température  $T_i$  et refroidi en *champ nul* jusqu'à 20°. On mesure son moment restant qu'on désignera par  $\sigma_{(670, H, 20) T_i}$ ; on fait varier  $T_i$ .

Observons d'abord qu'un réchauffement à  $T_i$ , même bref, ayant été effectué, un deuxième réchauffement identique n'a aucun effet nouveau. Donc  $\sigma_{(670, H, 20) T_i}$  est une fonction bien définie de  $T_i$ . La courbe correspondante descend lentement, puis rapidement et se termine à la température  $T_0$ , caractéristique de l'échantillon. Le fait expérimental important est que cette courbe est symétrique

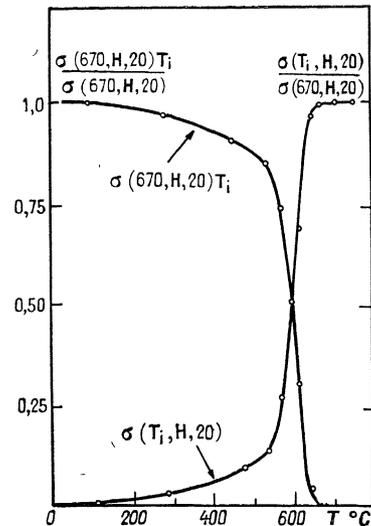


Fig. 6. —  $\text{Fe}_2\text{O}_3$   $\alpha$ . A. T. R.

Courbe d'aimantation inférieure :  $\sigma_{(T_i, H, 20)} = f(T_i)$ .  
 Courbe de désaimantation :  $\sigma_{(670, H, 20) T_i} = f(T_i)$ .  
 (Valeurs relatives).

(fig. 6) de la courbe d'aimantation partielle inférieure  $\sigma_{(T_i, H, 20)}$  en fonction de  $T_i$ , par rapport à une parallèle à l'axe des  $T$  passant par l'ordonnée  $\frac{1}{2} \sigma_{(670, H, 20)}$  (première relation); il en résulte,

d'après ce qui a été indiqué précédemment, que les courbes de désaimantation  $\sigma_{(670, H, 20) T_i}$  en fonction de  $T_i$  et d'aimantation supérieure  $\sigma_{(670, H, T_i)}$  en fonction de  $T_i$  coïncident (deuxième relation). La première relation établie depuis longtemps [40] a été démontrée à nouveau dans des essais très précis sur des terres cuites [41] et sur du sesquioxyde de fer [37]. Elle traduit le fait suivant : un réchauffement à  $T_i$  fait disparaître la fraction d'aimantation que provoque le champ  $H$  agissant de  $T_i$  à 20° (première relation) et elle ramène ainsi l'aimantation à ce qu'elle serait si le champ  $H$  n'avait agi qu'entre 670° et  $T_i$  (deuxième relation).

*Cas de l'A. T. R. partielle.* — Si maintenant on réchauffe un corps portant une A. T. R. partielle  $\sigma_{(T_i, H, T_i)}$ , on observe ce fait très important, établi maintenant par un grand nombre d'essais : tout réchauffement à  $T_i \leq T_2$  est sans effet; un

réchauffement à  $T_i \geq T_1$  fait disparaître toute thermorémanence.

Tous les faits qui viennent d'être établis, relativement au sesquioxyde de fer et à un très grand nombre de terres cuites de composition aussi variée que celle d'une brique ordinaire — ce qui est assez inattendu — révèlent une sorte d'autonomie des moments A. T. R. acquis dans différents intervalles de température. Cette autonomie est réelle et, qui plus est, géométrique si l'on veut. On peut superposer dans un corps des aimantations de direction différente correspondant à différents intervalles de température; chacune semble tout à fait indépendante des autres et, par réchauffement, disparaît pour son propre compte dans son intervalle de température d'acquisition. Par exemple, j'ai fait à plusieurs reprises l'expérience suivante, plus paradoxale encore que celle relative à l'A. T. R. et à l'A. R. I. opposées. Étant donné un corps dont on connaît la loi d'aimantation  $\sigma_{(T_1, H, 20)} = f(T_1)$ , on détermine la température  $T_1$  pour laquelle l'aimantation correspondante est exactement moitié de l'aimantation totale  $\sigma_{(670, H, 20)}$ . Ayant donné au corps l'aimantation totale  $\sigma_{(670, H, 20)}$ , dans une certaine direction, on le réchauffe à  $T_1$  et le refroidit dans le champ  $-H$ . On observe, après retour à  $20^\circ$ , une aimantation nulle. En réalité, le corps porte véritablement deux aimantations autonomes, mais opposées :  $\sigma_{(670, H, T_1)}$  reste de l'A. T. R. totale initiale et  $-\sigma_{(T_1, H, 20)}$  acquise au refroidissement dans le champ  $-H$ . En effet, si on le réchauffe une nouvelle fois à  $T_1$  et le refroidit, cette fois en champ nul, on retrouve une aimantation dans le sens initial, dont la valeur est  $\frac{1}{2} \sigma_{(670, H, 20)}$ , mais qui est maintenant insensible à tout nouveau réchauffement à  $T_i \leq T_1$ ; elle représente  $\sigma_{(670, H, T_1)}$  restante. Faut-il ajouter qu'un réchauffement à  $T_1$  suivi d'un refroidissement dans le champ  $+H$  reconstituerait exactement l'aimantation totale initiale.

L'ensemble des faits relatifs à l'A. T. R. permet de préciser de nombreux points délicats dans la recherche du champ magnétique terrestre fossilisé dans les terres cuites et il nous a permis d'établir une méthode de recherche de l'intensité de ce champ passé [40, 43, 45]. On remarquera qu'un corps donné est défini au point de vue de ses propriétés thermorémanentes par l'une des courbes indiquées, par exemple  $\sigma_{(T_1, H, 20)}$  en fonction de  $T_1$ . Les autres courbes (aimantation supérieure, désaimantation) s'en déduisent immédiatement et, si l'on fait varier  $H$ , les aimantations varient proportionnellement si l'on reste dans les champs faibles. Pratiquement, il y aurait intérêt à présenter toujours cette courbe pour un champ de 1 Oe. Pour un corps complexe comme une terre cuite, cette courbe présente aussi des arcs définissant plus ou moins nettement des points de Curie [37].

La désaimantation par réchauffement marquée, elle aussi, une différence entre A. T. R. et A. R. I. La courbe de réchauffement de l'A. R. I. diffère de celle de l'A. T. R., systématiquement semble-t-il, par une pente plus forte à l'origine. J'ai donné quelques résultats sur cette comparaison [40]; M<sup>lle</sup> Roquet l'a étudiée soigneusement pour une terre cuite (A. R. I. et A. T. R. totale) (*fig. 3, A et B*) [35]. Beaucoup d'observations intéressantes pourraient être faites sur ces courbes (composément différent d'un constituant du type  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  et d'un autre du type magnétite). Je retiendrai seulement que, là encore, A. T. R. et A. R. I. dues à des champs élevés tendent à avoir le même comportement. Ainsi, constamment le fossé se creuse entre A. T. R. et A. R. I. faibles et il se comble entre A. T. R. et A. R. I. fortes.

7° *Variation réversible de l'A. T. R. en fonction de la température.* — L'A. T. R. débarrassée de toute variation irréversible aux températures ordinaires, par exemple après réchauffement à  $50^\circ$  et refroidissement, puis conservation en champ nul, présente, comme les aimants permanents, une variation réversible en fonction de la température à laquelle on la mesure; on a  $\sigma_t = \sigma_0 (1 - at)$ ,  $\sigma_t$  étant l'aimantation mesurée à la température  $t$  et  $\sigma_0$  à  $0^\circ$ . Le coefficient  $a$  est relativement élevé et  $a$ , en très grossière approximation, pour ordre de grandeur dans les terres cuites ordinaires, le coefficient  $\alpha$  de dilatation des gaz [42]. Dans des mesures précises, la température doit être fixée au degré près.

8° *La thermorémanence dans les roches.* — Beaucoup d'études expérimentales ont été faites sur l'acquisition et les propriétés des aimantations thermorémanentes dans les roches. Les nombreux résultats de J. Koenigsberger, exposés dans les notes déjà citées, s'expliquent bien maintenant en admettant pour les roches, qu'il a surtout étudiées, les propriétés établies pour les terres cuites précédemment. Quelques essais de E. F. Herroun et A. F. Hallimond sont en bon accord avec ce point de vue [14] qui est surtout confirmé par T. Nagata. Celui-ci a fait une étude très étendue de l'A. T. R. dans les roches volcaniques, dont plusieurs chapitres sont parallèles aux chapitres précédents relatifs aux terres cuites et qui conduisent aux mêmes lois (variation en fonction du champ, variation de l'A. T. R. inférieure en fonction de  $T_1$ , aimantations partielles dans l'intervalle  $T_1 - T_2$ , désaimantation par réchauffement). Le mode de présentation de ses résultats diffère de celui que j'ai employé : au lieu de caractériser un corps, au point de vue de l'A. T. R., par la fonction  $\sigma_{(T_1, H, 20)}$  de  $T_1$  [pour lui  $\sigma_{(T_0, 1, 0)}$ ], il prend la dérivée de cette fonction par rapport à  $T_1$ , c'est sa fonction caractéristique  $P_{T_1}$ . Il n'y a là qu'une différence de nota-

tion. Des innovations intéressantes dans ce travail sont la recherche d'une relation entre la fonction  $P_{it}$  et la variation  $\chi = f(T)$  et des mesures de l'A. T. R. à toutes températures.

Finalement, les lois énoncées pour les terres cuites seraient valables pour les roches. Il est important, je crois, de ne pas généraliser pour toutes les roches, même pas pour toutes les roches volcaniques. Deux difficultés graves se présentent, en effet, dans le cas des roches. La première est celle de la stabilisation. On a vu, à propos des susceptibilités, que les roches se modifiaient souvent par recuit et qu'elles continuaient à évoluer par recuits successifs. La condition, évidemment essentielle, de stabilité minéralogique, n'est donc pas souvent remplie. Nous avons, dans de nombreux cas, rencontré cette difficulté dans l'étude d'aimantations naturelles de roches diverses sur lesquelles nous tentions de rechercher l'intensité du champ passé. Une deuxième difficulté vient de la nature même des constituants magnétiques des roches dont certains se comportent comme des ferromagnétiques très doux; les roches correspondantes prennent alors dans des champs de l'ordre de l'Oersted des A. R. I. appréciables et la distinction entre A. R. I. et A. T. R. s'évanouit. Si l'on reprend une à une toutes les propriétés relatives à l'A. R. I. et à l'A. T. R. qui ont été exposées successivement, on est conduit à considérer que terres cuites et roches se classent sur une échelle au sommet de laquelle se trouve  $\text{Fe}_2\text{O}_3\alpha$ , sorte de limite des composés naturels : son A. T. R. est très stable à tous les points de vue; puis viennent les terres cuites et, en commençant par les laves, le groupe largement étalé de toutes les roches qui, au bas de l'échelle, se présentent avec leurs A. R. I. fortes dans les champs très faibles. La zone de champs dans laquelle il existe un fossé entre A. R. I. et A. T. R. s'est abaissée progressivement et, dans le champ terrestre déjà, la distinction A. T. R., A. R. I. n'est plus nette. Il est intéressant de remarquer que la capacité, en quelque sorte, d'aimantation thermorémanente n'est pas réduite systématiquement du haut en bas de l'échelle précédente; si on la qualifie par le rapport  $Q = \frac{\sigma_{(670, H, 20)}}{\chi H}$ , ce rapport  $Q$ , compris entre 5 et 50 pour  $\text{Fe}_2\text{O}_3\alpha$  et les terres cuites que j'ai citées, est du même ordre de grandeur pour des roches volcaniques : par exemple, il est compris entre 8 et 43 dans un tableau de résultats de T. Nagata relatif à des roches volcaniques variées ([26], p. 94).

9° A. T. R. et grosseur de grain. — Les mêmes efforts qui avaient été déployés pour relier la susceptibilité des roches à leur contenu magnétique l'ont été pour expliquer les différences dans le comportement thermorémanent. Celui-ci décèle aussi des points de Curie plus ou moins nets qu'on a essayé d'expliquer par la composition. Ces efforts ne

semblent pas avoir eu de résultats appréciables, condamnés qu'ils étaient, à l'avance, par l'énorme complexité minéralogique de tous les corps étudiés.

Mais chemin faisant beaucoup d'auteurs ont fait des remarques intéressantes, d'ordre physique, dont celles sur la grosseur des grains ferromagnétiques [17, 19, 22, 25]. Dans les roches à grains ferromagnétiques dispersés (roches synthétiques ou roches naturelles), il semble que toutes choses égales la capacité d'aimantation thermorémanente aille en croissant quand le diamètre des grains décroît. La grosse capacité d'A. T. R. des laves récentes semi-vitreuses, bien connue des géophysiciens, et peut-être une plus grande stabilité de l'A. T. R., sont d'accord avec ce point de vue. Mais cette question de grosseur de grains vaut aussi pour le sesquioxyde de fer, corps qui, exceptionnellement dans notre étude, est à un seul constituant. R. Chevallier a déjà appelé l'attention sur son importance magnétique [4] et antérieurement H. Forestier avait étudié le mécanisme cristallin de cet effet sur les ferrites, dont la magnétite et l'oligiste, et montré, d'une façon très nette, que la thermorémanence de la magnétite n'apparaît que lorsque celle-ci est réduite en grains très fins analogues à ceux des ferrites obtenus par précipitation [8].

Si l'on se retourne vers les roches, on peut penser que les gros cristaux ferromagnétiques sont les responsables principaux de la susceptibilité et de la facilité d'acquisition d'A. R. I., et que les grains fins sont les responsables de la capacité d'aimantation thermorémanente. Cette remarque explique un fait souvent observé dans une coulée volcanique, que les variations d'aimantation permanente (supposée A. T. R.) et de susceptibilité, d'un point à un autre, s'accompagnent très mal [44].

Des faits précédents, il résulte que le rapport  $Q_n = \frac{\sigma_n}{\chi H}$  de Koenigsberger, constamment considéré par les géophysiciens pour caractériser l'état d'aimantation *naturelle* d'une roche ( $\sigma_n$  aimantation rémanente naturelle,  $H$  champ actuel), s'il intéresse la prospection magnétique en qualifiant le rapport entre les aimantations permanente et induite, sur le terrain, ne peut pas qualifier le champ ancien, responsable en principe de  $\sigma_n$ , comme l'espérait son auteur. De la même façon, il n'y a aucune raison pour que ce rapport  $Q$  reste constant ( $H$  étant maintenant le champ ayant provoqué l'A. T. R. de valeur  $\sigma$ ) quand la roche varie par recuit, propriété posée implicitement dans beaucoup de recherches, celles de J. Koenigsberger particulièrement dans ses essais sur l'intensité du champ terrestre ancien sur les roches volcaniques [20].

**Conclusion.** — Deux questions se rattachent à cet exposé purement phénoménologique des propriétés des terres cuites et des roches. D'une part, c'est tout le problème de l'application à la recherche

du champ magnétique fossile qui a été seulement évoqué de place en place; nous en abandonnerons la discussion aux géophysiciens. D'autre part, c'est le problème des explications des phénomènes observés et leur intégration dans les théories actuelles du ferromagnétisme. Je le laisserai aux spécialistes du magnétisme, non sans rappeler que l'éminent organisateur de cette réunion vient d'y consacrer un travail capital pour nous [28]; dès maintenant, il oriente de nouvelles recherches et il doit permettre, en Géomagnétisme, l'exploration des effets du facteur temps, à l'échelle géologique, qui échappent évidemment à tout essai de laboratoire.

*Demande de M. Bertaut.* — Est-ce que le pourcentage de  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  dispersé dans les terres cuites permettrait une étude aux rayons X de la dimension des particules ?

*Réponse de M. Thellier.* — Cela paraît peu probable car la proportion est de l'ordre du pour-cent.

*Question de M. Taglang.* — Ces propriétés ont-elles été appliquées aux recherches sur le champ magnétique dans le passé ?

*Réponse de M. Thellier.* — L'aimantation thermorémanente a été utilisée depuis plus d'un demi-siècle pour la recherche de la direction du champ magnétique terrestre passé (terres cuites et laves). Les faits exposés ont permis de préciser les méthodes, condamnant certains résultats anciens, mais créant de nouvelles possibilités : la recherche de l'intensité du champ ancien par exemple.

Pour illustrer, d'une manière frappante, les possibilités offertes par les lois d'additivité et d'indépendance des moments correspondant à différents intervalles de température, on peut citer le cas suivant : les thermes gallo-romains dits de Jullien, à Paris, ont subi un incendie au Moyen âge. Les briques qu'ils contiennent, cuites initialement « de champ », avaient pris à l'époque de cette cuisson, une aimantation  $\sigma_{(670, H, 20)}$  dans le champ  $H$  de l'époque. La brique, placée « à plat » dans le mur, s'est trouvée réchauffée par l'incendie à une température  $T$ . Son aimantation ancienne a été alors réduite à la valeur  $\sigma_{(670, H, T)}$  et par refroidissement une nouvelle aimantation  $\sigma_{(T, H, 20)}$ , acquise dans la

direction du nouveau champ  $H'$ , s'est ajoutée géométriquement à la précédente. Par réchauffement progressif, nous avons pu, ma femme et moi, retrouver la température  $T$  et, en principe, les champs  $H$  et  $H'$  : en effet, jusqu'à la température  $T$ ,  $\sigma_{(670, H, T)}$  ne varie pas, alors que  $\sigma_{(T, H', 20)}$  disparaît progressivement et, au-dessus de  $T$ , on suit la disparition progressive de  $\sigma_{(670, H, T)}$ .

*Remarque de M. Chevallier.* — B. Brunhes a étudié jadis des argiles cuites par des coulées de laves et il a trouvé un parallélisme de l'aimantation dans la roche volcanique et dans l'argile sous-jacente. Étant donné la stabilité de l'aimantation thermorémanente dans l'argile cuite, on peut conclure à une stabilité semblable dans la roche. Ce fut le point de départ de l'utilisation des laves de date connue pour retrouver l'orientation du champ magnétique terrestre à des époques reculées. Nous avons pu suivre, par cette méthode, les variations de la déclinaison en Sicile depuis le XIII<sup>e</sup> siècle.

*Remarque de M. Néel.* — Dans les phénomènes mis en jeu dans l'aimantation des terres cuites et des laves, il faut soigneusement distinguer l'aimantation thermorémanente d'une part, et l'indépendance des aimantations acquises dans des intervalles de température extérieurs l'un à l'autre d'autre part. La première est un phénomène banal que tous les ferromagnétiques présentent plus ou moins et qui est particulièrement sensible ici à cause de la grandeur du champ coercitif et du fait que les substances en question peuvent être chauffées au-dessus de leur point de Curie sans subir de modifications physicochimiques. Le second phénomène est beaucoup plus remarquable et c'est à M. Thellier que nous devons nos connaissances expérimentales à ce sujet. Il semble lié à l'extrême division de la matière ferromagnétique et au temps de relaxation des grains très fins : dans les champs faibles, il n'est possible de modifier l'aimantation d'un grain très fin à grand champ coercitif que dans un intervalle étroit de température; c'est l'intervalle où le temps de relaxation est de l'ordre de grandeur de la durée des expériences. Au-dessus de cet intervalle de température l'aimantation du grain suit réversiblement les variations du champ faible; au-dessous, l'aimantation reste bloquée suivant sa direction initiale (Cf. Néel, *Ann. de Géophys.*, 1949, 5, 99).

## BIBLIOGRAPHIE.

- [1] BRUCKSHAW MC G. et ROBERTSON E. I. — The magnetic properties of the tholeiite dykes of north England. *Monthly Not. Roy. Ast. Soc. Geophysical. Suppl.*, 1949, 5, 8, 308-320.
- [2] CHEVALLIER R. — Aimantation des poudres ferromagnétiques dans les champs faibles. *C. R. Acad. Sc.*, 1932, 194, 1327-1329.
- [3] CHEVALLIER R. — Aimantation des poudres macroscopiques dans les champs faibles. *C. R. Acad. Sc.*, 1932, 194, 1468-1471.
- [4] CHEVALLIER R. et MATHIEU M<sup>lle</sup> S. — Variation de la susceptibilité magnétique d'une poudre d'hématite en fonction de la taille des grains. *C. R. Acad. Sc.*, 1937 204, 854-857.

- [5] CHEVALLIER R. et PIERRE J. — Propriétés thermomagnétiques des roches volcaniques. *Ann. Physique*, 1932, **18**, 383-477.
- [6] COULOMB J. — Sur l'aimantation des roches due à des grains disséminés. *C. R. Acad. Sc.*, 1943, **216**, 351-352.
- [7] FORESTIER H. — Transformations magnétiques du sesquioxyde de fer. *Thèse Fac. Sc.*, Paris, 1928; *Ann. Chimie*, 1928, **10**, 9.
- [8] FORESTIER H. — Aimantation à chaud des poudres ferromagnétiques. *C. R. Acad. Sc.*, 1935, **201**, 45-47.
- [9] GRAHAM J. W. — The stability and significance of magnetism in sedimentary rocks. *J. of Geoph. Res.*, (ex *Terr. Magn.*), 1949, **54**, 131-167.
- [10] GRENET G. — Sur les propriétés magnétiques des roches. *Thèse Fac. Sc.*, Paris, 1930; *Ann. Physique*, 1930, **13**, 263-348.
- [11] GRENET G. — La théorie des poudres ferromagnétiques et la susceptibilité magnétique des roches. *C. R. Acad. Sc.*, 1933, **197**, 746-748.
- [12] GRENET G. — Quelques mesures d'aimantation permanente et remarques sur les méthodes de détermination de la valeur du champ magnétique terrestre dans le passé. *Ann. Géophys.*, 1944, **1**, 256-263.
- [13] HAALCK H. — Der Gesteinmagnetismus. *Becker und Erler Kom. Ges.*, Leipzig, 1942, 90 pages.
- [14] HERROUN E. F. et HALLIMOND A. F. — Laboratory experiments on the magnetization of rocks. *Proc. Phys. Soc.*, 1943, **55**, 214-221.
- [15] KÖNIGSBERGER J. — Zur anisotropie der physikalischen Parameter von Gesteinen speziell der magnetischen Suszeptibilität. *Z. Geophys.*, 1929, **5**, 62-64.
- [16] KÖNIGSBERGER J. — Größenverhältnis von remanentem zu induziertem Magnetismus in Gesteinen; Größe und Richtung des remanenten Magnetismus. *Z. Geophys.*, 1930, **6**, 190-207.
- [17] KÖNIGSBERGER J. — Thermoremanenz und spontane Magnetisierung. *Phys. Zeitsch.*, 1932, **33**, 468-474.
- [18] KÖNIGSBERGER J. — Über remanenten Magnetismus von Gesteinen. *Gerl. Beitr. z. Geophys.*, 1932, **35**, 204-216.
- [19] KÖNIGSBERGER J. — Magnetische Eigenschaften der ferromagnetischen Mineralien in den Gesteinen. *Beit. z. ang. Geophys.*, 1934, **4**, **3**, 385-394.
- [20] KÖNIGSBERGER J. — Die Abhängigkeit der natürlichen remanenten magnetisierung bei Eruptivgesteinen von deren Alter und Zusammensetzung. *Beit. z. ang. Geophys.*, 1935, **5**, 193-246.
- [21] KÖNIGSBERGER J. — Natural residual magnetism of eruptive rocks. Part I: *Terr. Magn.*, 1938, **43**, 119-130.
- [22] KÖNIGSBERGER J. — Id. Part II: *Terr. Magn.*, 1938, **43**, 299-320.
- [23] MERCANTON P. L. — Encore l'aimantation des terres cuites et la méthode de Folgheraiter. *Arch. Soc. Sc. phys. et nat.*, Suisse, 1923, p. 39-42.
- [24] MICHEL A. — Propriétés magnétiques de quelques solutions solides. *Thèse Fac. Sc.*, Paris, 1937; *Ann. Chim.*, 1937, **11**, 8.
- [25] NAGATA T. — The mode of causation of thermo-remanent magnetism in igneous rocks. Preliminary note. *Bull. Earth. Res. Inst.*, 1941, **19**, **1**, 49-79.
- [26] NAGATA T. — The natural remanent magnetism of volcanic rocks and its relation to geomagnetic phenomena. *Bull. Earth. Res. Inst.*, Tokyo, 1943, **XXI**, **1**, 1-191.
- [27] NAGATA T. — Local geomagnetic anomalies in volcanic regions and their interpretation. *Comm. au Congrès d'Oslo de l'U. G. G. I.*, 1948, I. A. T. M. E.
- [28] NÉEL L. — Théorie du traînage magnétique des ferromagnétiques en grains fins avec application aux terres cuites. *Ann. Géophys.*, 1949, **5**, 99-136.
- [29] POUILLARD E. — Sur le comportement de l'alumine et de l'oxyde de titane vis-à-vis des oxydes de fer. *Thèse Fac. Sc.*, Lille, 1949; *Ann. Chim.*, 1950, **5**, 164-214.
- [30] PUZICHA K. — Die magnetischen Eigenschaften der Eruptivgesteine. *Z. prakt. Geologie*, 1930, **38**, 161-172 et 184-189.
- [31] ROCHE A. — Observations inédites sur la coulée basaltique de Beaumont (Auvergne), 1950.
- [32] ROQUET M<sup>lle</sup> J. — Sur les propriétés magnétiques du sesquioxyde de fer faiblement magnétique. *C. R. Acad. Sc.*, 1946, **222**, 727-729.
- [33] ROQUET M<sup>lle</sup> J. — Sur l'aimantation rémanente isotherme du sesquioxyde de fer. *C. R. Acad. Sc.*, 1947, **224**, 1418-1420.
- [34] ROQUET M<sup>lle</sup> J. — Sur la variation des aimantations thermorémanente et rémanente isotherme des terres cuites en fonction du champ appliqué. *C. R. Acad. Sc.*, 1949, **229**, 1135-1137.
- [35] ROQUET M<sup>lle</sup> J. — Sur la décroissance des aimantations thermorémanente et rémanente isotherme des terres cuites par réchauffement successifs à températures croissantes. *C. R. Acad. Sc.*, 1950, **230**, 282-285.
- [36] ROQUET M<sup>lle</sup> J. — Sur la décroissance des aimantations thermorémanente et rémanente isotherme des terres cuites par action de champs opposés croissants. *C. R. Acad. Sc.*, 1950, **230**, 1939-1941.
- [37] ROQUET M<sup>lle</sup> J. et THELLIER E. — Sur des lois numériques simples, relatives à l'aimantation thermorémanente du sesquioxyde de fer rhomboédrique. *C. R. Acad. Sc.*, 1946, **222**, 1288-1290.
- [38] SCHNEIDER E., THELLIER E. et THELLIER M<sup>me</sup> O. — Contribution géophysique à l'étude du trias ophitique pyrénéen. *Ann. Géophys.*, 1948, **4**, 15-46.
- [39] SCHUMANN W. — Erdmagnetische Anomalien in Eurcpa und ihre Beziehungen zu den Geologischen Verhältnissen. *Abh. des Geophys. Inst. Potsdam*, 1949, **14**, 147 p.
- [40] THELLIER E. — Sur l'aimantation des terres cuites et ses applications géophysiques. *Thèse Fac. Sc.*, Paris; *Ann. I. P. G.*, Paris, 1938, **XVI**, p. 157-302.
- [41] THELLIER E. — Sur les propriétés de l'aimantation thermorémanente des terres cuites. *C. R. Acad. Sc.*, 1941, **213**, 1019-1022.
- [42] THELLIER E. et THELLIER M<sup>me</sup> O. — Sur les variations thermiques de l'aimantation thermorémanente des terres cuites. *C. R. Acad. Sc.*, 1941, **213**, 59-61.
- [43] THELLIER E. et THELLIER M<sup>me</sup> O. — Sur l'intensité du champ magnétique terrestre, en France, trois siècles avant les premières mesures directes. *C. R. Acad. Sc.*, 1942, **214**, 382-384.
- [44] THELLIER E. et THELLIER M<sup>me</sup> O. — Recherches géomagnétiques sur des coulées volcaniques d'Auvergne. *Ann. Géophys.*, 1944, **1**, 37-52.
- [45] THELLIER E. et THELLIER M<sup>me</sup> O. — Sur l'intensité du champ magnétique terrestre, en France, à l'époque gallo-romaine. *C. R. Acad. Sc.*, 1946, **222**, 905-907.
- [46] THELLIER E. et THELLIER M<sup>me</sup> O. — Sur les propriétés magnétiques des roches éruptives pyrénéennes. *C. R. Acad. Sc.*, 1949, **228**, 1958-1960.