

SUR L'INTENSITÉ DU CHAMP MAGNÉTIQUE TERRESTRE
DANS LE PASSÉ HISTORIQUE ET GÉOLOGIQUE (*)par E. THELLIER et M^{me} O. THELLIER.

(Institut de Physique du Globe de Paris.)

SOMMAIRE. — *Les études archéo ou paléomagnétiques portent le plus souvent sur la direction du champ ancien ; on s'intéresse ici à son intensité. On décrit les développements d'une méthode dont les bases avaient été jetées dès 1937 et on dresse le bilan de ses résultats. Le mémoire peut être considéré comme comprenant 2 parties de 3 chapitres chacune.*

Dans la première partie, après un rappel sommaire des faits de base, on examine les quelques tentatives qui ont été faites pour retrouver l'intensité fossile. Puis, on décrit la méthode des auteurs utilisant les aimantations thermorémanentes et consistant, en principe, à comparer l'aimantation naturelle d'un objet à des aimantations provoquées dans le même objet. Une succession d'essais est progressivement prévue, destinée à éliminer un à un les nombreux défauts que comporterait la méthode sous sa forme simple. Au passage des résultats sont exposés relatifs aux siècles récents.

La seconde partie comporte principalement l'exposé des résultats obtenus pour la période historique, classés par époque et par région (époque gallo-romaine en France et en Suisse, époque punique à Carthage).

La décroissance massive du champ terrestre, que l'on observe dans l'ouest de l'Europe, depuis 2 000 ans, est discutée en particulier pour ce qui concerne ses conséquences possibles sur la datation au Carbone 14. Des résultats sommaires sont ensuite donnés pour les temps géologiques, mais limités jusqu'ici à l'époque quaternaire. Le mémoire s'achève sur un certain nombre de suggestions relatives à la poursuite des recherches d'intensité.

Les idées essentielles de tout ce travail ont été présentées dans une des séances tenues par l'Association internationale de Géomagnétisme et Aéronomie durant l'Assemblée Générale de l'Union Géodésique et Géophysique internationale à Toronto, en septembre 1957.

ABSTRACT. — *Archeo or paleomagnetical studies are devoted generally to the direction of the ancient (magnetic) field ; the present paper deals with the intensity of this field. Successive phases of the method which the authors have developed since 1937 for this purpose are exposed, followed by a general perspective of its results. The paper can be divided in two parts, each one including three chapters.*

In the first part, after a brief summing up of the basic facts, the few tentatives which have been put into action in order to find the intensity of the ancient field are examined. Then the method proper to the authors and which consists in comparing thermoremanent magnetizations artificially given to a sample, with the one that the same sample presented in nature when it had been found, are described. Systematic series of trials are necessary in order to be able to eliminate, one by one, the numerous defects which prevent of making a safe use of the method in its simplest form. Some results are incidently brought out regarding the last past centuries.

(*) Cet article paraît simultanément en russe dans le *Bulletin de l'Académie des Sciences de l'U. R. S. S.*

The second part mainly consists in a presentation of the results which have been obtained for the historical times, classified by epochs and by geographical regions (Gallo-roman epoch for France and for Switzerland, Punic epoch at Carthage). The massive decreasing of the intensity of the earth field which is observed in Western Europe since 2 000 years, is discussed in regard of possible interferences with the ways of using Carbon 14 for dating purposes. Brief results are then given for geological times but only, at least so far, for the quaternary epoch. The paper ends with different suggestions as how to extend the present work of determining the intensity of the field.

Most of the basic ground of this work taken as a whole was presented in one of the Meetings held by the International Association of Geomagnetism and Aeronomy during the General Assembly of the Union of Geodesy and Geophysics, September 1957 in Toronto.

En magnétisme terrestre on peut s'intéresser aux variations, incessantes mais relativement faibles, du champ instantané (pulsations, variations diurnes, agitation magnétique), à leurs causes et à leurs relations avec d'autres phénomènes, solaires et terrestres. On ouvre un chapitre très différent en considérant, pour chaque lieu, à une époque donnée, le champ obtenu en prenant la moyenne des champs observés sur une durée assez longue (en principe dix années) centrée sur l'époque considérée. C'est la répartition de ce champ moyen que décrivent les cartes magnétiques, et son analyse montre qu'il est dû presque entièrement à des causes situées à l'intérieur du Globe [19]. Sa propriété la plus remarquable est une lente variation d'année en année conduisant progressivement à des changements considérables à l'échelle du siècle.

Cette variation séculaire du champ moyen serait irrémédiablement mal connue si l'on ne disposait que des résultats des mesures directes, effectuées au cours des siècles passés, dont les plus anciennes, très imprécises, ne remontent qu'au XVI^e siècle. On sait que l'étude d'aimantations portées par des roches volcaniques (ou des terres cuites) et aussi maintenant par des roches sédimentaires, permet dans des cas favorables une mesure indirecte du champ terrestre qui existait à l'époque de leur mise en place. Remarquons en passant que le point de vue est nécessairement différent lorsqu'il s'agit des époques historique et préhistorique, durant lesquelles on peut espérer suivre pas à pas la variation du champ siècle par siècle, ou lorsqu'il s'agit des époques géologiques lointaines pour lesquelles, tout compte fait, on s'intéresse à un champ moyen d'un tout autre ordre, pris sur des périodes très longues. Nous utilisons le vocable archéomagnétisme pour le premier cas et celui de paléomagnétisme pour le second.

Le plus souvent on ne s'intéresse qu'à la *direction* du champ fossile. Ainsi, sur des terres cuites demeurées en place, comme des parois de fours ou des foyers de thermes, sur des roches volcaniques en coulées ou intrusives et sur des roches sédimentaires, on peut, non sans restrictions, déterminer la déclinaison D et l'inclinaison I du champ terrestre à l'époque du refroidissement ou du dépôt. Il faut pour cela prélever des échantillons sur lesquels on matérialise un repérage exact de leur position. Avec des terres cuites déplacées après leur cuisson (tuiles, briques,

poteries) on peut encore, dans des cas favorables, retrouver l'inclinaison magnétique. Ces déterminations de direction, qu'on n'a pas craint de pousser récemment jusqu'aux époques géologiques les plus reculées, connaissent une grande vogue à en juger par le nombre de laboratoires et de chercheurs qui s'y consacrent et par l'abondance des publications qui s'y rapportent. On remarquera que les vedettes actuelles du paléomagnétisme : inversion de sens du champ terrestre, dérive des pôles terrestres et dérive des continents, ressortissent seulement à ce problème de la direction du champ ancien.

Est-ce à dire que son *intensité* soit sans intérêt ? En aucune façon. Dans les recherches théoriques actuelles sur la génération du champ moyen et les causes de sa variation séculaire [14, 104, 15, 31, 55, 32, 16] il serait fondamental de connaître les variations de cette intensité F_0 au cours des temps géologiques. En particulier, il serait intéressant de savoir si elle a été parfois très supérieure à sa valeur actuelle, si lors des inversions du champ elle s'est annulée, si sa répartition sur le Globe a pu se trouver très différente de celle d'un champ de dipôle centré que nous observons actuellement, au moins en très grossière approximation. Pour les périodes historique et préhistorique, la variation de F_0 , si elle était régulière et de longue période, fournirait une possibilité de datation. Enfin, des études d'archéophysique comme celle de la répartition géographique des aurores polaires dans le passé et l'application de l'échelle de temps du Carbone 14, devraient tenir compte de ses changements s'il est reconnu que ceux-ci ont été importants au cours des siècles passés. Mais la détermination de l'intensité du champ ancien est beaucoup plus délicate que celle de sa direction et elle a peu tenté les chercheurs jusqu'ici. Essayant de dresser un bilan, nous rappellerons d'abord un certain nombre d'essais, plus ou moins indirects et qualitatifs, qui ont été effectués, ou interprétés, dans ce sens ; puis nous exposerons les résultats de notre étude systématique, directe et quantitative.

À la base de toutes les méthodes se trouve évidemment la mesure de la valeur des aimantations rémanentes ; en effet, quel que soit le mécanisme de la « fossilisation » magnétique, l'intensité d'aimantation rémanente dépend de l'intensité du champ qui l'a provoquée à l'origine ; mais elle dépend aussi, et c'est là toute la difficulté, de la composition toujours compliquée, et susceptible de changements, du corps considéré et, surtout, des altérations ou additions que les aimantations originelles ont pu subir ultérieurement.

Expérimentalement, il faudra mesurer des intensités d'aimantations rémanentes portées par les corps hétérogènes que sont les roches et les terres cuites, et il n'y a pas là de difficulté plus sérieuse que dans la mesure de la direction des mêmes aimantations. À la vérité, les deux mesures sont difficiles dès que l'on s'impose une précision raisonnable absolument indispensable à l'établissement des tests de contrôle. Ces tests constituent la partie la plus laborieuse de toute étude paléo-

magnétique valable. S'ils sont souvent négligés dans la recherche de la direction du champ passé, ce dont nous n'avons pas à juger ici, ils sont d'une nécessité absolue dans la recherche de l'intensité. L'un de leurs buts, difficile à atteindre d'ailleurs, est de remonter de l'aimantation « naturelle » que nous mesurons à l'aimantation originelle sur laquelle nous comptons. On se trouve là en présence de problèmes compliqués dans lesquels un rôle essentiel est joué par les faits suivants : les propriétés des minéraux magnétiques, les divers mécanismes d'aimantation des roches et des terres cuites, les modifications minéralogiques subies par ces corps au cours des temps, soit spontanément soit par actions physiques ou chimiques, et éventuellement les modifications qu'ils subissent au laboratoire lors des recuits que peuvent comporter les essais. Ces mêmes faits intervenant à tout moment dans notre exposé, nous les présenterons d'abord en les résumant.

I. SOMMAIRE DES PROPRIÉTÉS MAGNÉTIQUES DES ROCHES INTÉRESSANT L'ANALYSE DES AIMANTATIONS NATURELLES.

A. *Minéralogie magnétique.*

Les minéraux capables de porter des rémanences magnétiques (oxydes de fer et oxydes mixtes de fer et de titane, principalement) sont soit des composés définis soit, et surtout d'ailleurs, des solutions solides ; ce sont non des ferro mais des ferri-magnétiques. Ils se présentent en « grains » de toutes dimensions dispersés dans un ensemble pratiquement amagnétique ou susceptible seulement d'aimantations induites faibles.

Pris individuellement, chaque grain est anisotrope et ses propriétés magnétiques, si elles dépendent de sa composition chimique, dépendent aussi beaucoup de sa structure cristalline, de sa forme d'où résulte un champ démagnétisant puissant, propre au grain, et des tensions mécaniques auxquelles il peut être soumis. Des grains peuvent être groupés en amas et certains peuvent comporter plusieurs phases en lamelles alternées. L'inventaire des différents minéraux magnétiques des roches avait depuis longtemps retenu l'attention des géophysiciens [93, 66] ; leur étude, expérimentale et théorique, s'est considérablement développée récemment, l'intérêt se portant surtout sur la famille des titanomagnétites et sur celle des ilménites-hématites. On a beaucoup étudié : la composition chimique, la structure cristallographique et les propriétés magnétiques d'un grand nombre de tels minéraux, obtenus par synthèse ou extraits de roches [92, 21, 2, 79, 3, 128, 89], les conséquences magnétiques de la coexistence de plusieurs phases voisines ou intimement juxtaposées [126, 127, 84], l'équilibre physico-chimique des différentes phases en fonction de la température et leurs transformations soit au cours d'un refroidissement lent, soit par retour progressif à l'équilibre de phases trempées (exsolution à partir d'une phase homogène), soit inversement par recuit naturel

ou provoqué [61, 62]. Dans l'étude théorique des mécanismes d'aimantation, les progrès essentiels sont dus à L. NÉEL; il a d'abord analysé le cas de grains si fins qu'ils constitueraient chacun un seul domaine de WEISS [86], puis il a pu traiter le cas de grains gros, susceptibles d'aimantations par déplacements de parois [88]. Toutes ces connaissances en minéralogie magnétique ont permis d'expliquer un certain nombre de phénomènes, à première vue singuliers, que présentent les terres cuites et les roches et qui sont, comme nous le verrons, d'importance capitale en géomagnétisme.

À l'échelle d'un fragment de roche, la complexité minéralogique microscopique peut, à certains points de vue au moins, être négligée, à condition de considérer un volume de matière très grand comparé à celui des grains magnétiques les plus gros. Aussi avons-nous toujours préconisé, quand il s'agit de corps naturels, d'utiliser des échantillons relativement volumineux, de l'ordre du décimètre cube. Dans ces conditions, par effet statistique (et le champ démagnétisant de forme de l'échantillon étant souvent très faible), le corps est pratiquement isotrope, en ce sens que le moment magnétique rémanent global provenant de l'action d'un champ magnétique a pour *direction* celle de ce champ. Cependant, il n'est pas nécessairement homogène, la *valeur de l'intensité* d'aimantation moyenne pouvant différer fortement d'une région à l'autre de l'échantillon. Il en résulte qu'il ne faut jamais raisonner par proportionnalité aux volumes (ou aux masses); tout échantillon de roche ou de terre cuite doit être considéré comme un être que l'on ne peut dissocier et les comparaisons quantitatives ne doivent porter que sur les aimantations imposées au même objet dans des essais successifs.

B. Les différentes sortes d'aimantations rémanentes.

L'étude des lois régissant l'acquisition des différents types d'aimantation et leurs propriétés a constitué et constitue encore l'une des activités de notre laboratoire [112, 119, 113, 101, 99, 118, 94, 95, 96, 97]. On trouvera un raccourci des faits essentiels correspondants dans une mise au point de l'un de nous [116] ou dans le résumé introductif de L. NÉEL [86]. Nous ne rappellerons que les définitions.

Nous appelons A. R. I. (aimantation rémanente isotherme) l'aimantation retenue par un échantillon vierge après qu'il a été soumis à un champ H appliqué pendant un temps bref (par exemple une minute) que nous choisissons par convention comme unité de temps: nous désignerons par σ_r son intensité spécifique, c'est-à-dire le moment rémanent par gramme ⁽¹⁾. On sait que cette rémanence, négligeable dans les champs très faibles, croît d'abord approximativement suivant

(¹) En réalité, nous utilisons toujours le moment rémanent global de l'échantillon considéré, sans le ramener à l'unité de masse.

une loi parabolique, $\sigma_r = aH^2$, et, après une inflexion, tend vers une valeur limite qui est la rémanence σ_{rs} de saturation. D'un minéral à l'autre, l'allure de la variation est la même, mais avec des échelles de champ fort différentes ; pour un corps magnétiquement très dur comme $Fe_2O_3\alpha$ l'inflexion se trouve au-dessus de 10 000 Oe [99] ; elle est vers 200 Oe dans le cas de la magnétite en grains fins dispersés dans du kaolin (roche synthétique simple) et ce sont les valeurs de cet ordre de grandeur qu'on observe dans les terres cuites ; l'inflexion est beaucoup plus bas pour la plupart des roches volcaniques, tellement que pour certaines, magnétiquement très douces, le champ terrestre, de l'ordre du demi-Oersted, est déjà un champ fort.

Lorsque dans les conditions précédentes (température ordinaire, champ H continu) le champ agit pendant un temps t plus long, la rémanence est plus grande. Terres cuites et roches présentent en effet une viscosité magnétique parfois très forte que nous avons découverte il y a longtemps [109, 112 p. 255 et 283 à 286] et dont l'étude a été poursuivie activement [121, 106, 60, 99 p. 24 à 30, 95, 26, 97]. Nous appellerons A. R. V. (aimantation rémanente visqueuse), le supplément d'aimantation σ_v dû à ce que l'action du champ H s'est prolongée pendant le temps t , ce supplément étant compté à partir de l'A. R. I. qui aurait été acquise pendant le temps d'action $t = 1$. On sait que σ_v est, pour un champ H donné, linéaire en $\log t$, dès l'origine pour les champs forts ou moyens, mais après un certain temps seulement pour les champs faibles [97]. Cette loi simple est importante parce qu'elle permet, à partir d'essais faits sur quelques jours ou quelques mois, d'extrapoler pour des durées considérables. Un autre fait notable est que l'A. R. V., qui est relativement faible par rapport à l'A. R. I. pour H fort, peut être très forte en valeur relative pour H très faible. C'est ainsi que beaucoup de roches qui présentent une A. R. I. négligeable dans les champs aussi faibles que le champ terrestre peuvent y acquérir à la longue des A. R. V. importantes.

Nous appellerons A. T. R. totale (aimantation thermorémanente totale) la rémanence gardée par un corps qui, porté à une température supérieure ou égale au point de CURIE θ le plus élevé de ses constituants, a été refroidi jusqu'à la température ordinaire (20° conventionnellement) dans un champ H constant ; nous noterons sa valeur spécifique $\sigma_{(0,H,20^\circ)}$. On sait que cette aimantation est proportionnelle au champ pour H très faible, la droite $\sigma_{(0,H,20^\circ)} = f(H)$ ayant une pente forte ; pour des champs H forts l'A. T. R. tend vers la même valeur limite σ_{rs} que l'A. R. I. Le point de CURIE maximum que l'on rencontre dans les roches et les terres cuites est celui du sesquioxyde de fer rhomboédrique : 670°.

Nous dirons que l'A. T. R. est partielle si le champ H n'a été établi qu'entre les températures t_1 et t_2 , le reste du refroidissement ayant eu lieu en champ nul et nous la désignerons par $\sigma_{(t_1,H,t_2)}$. On sait qu'il y a en général additivité : l'A. T. R. totale étant la somme géométrique des aimantations partielles qui

auraient été acquises séparément dans des intervalles arbitraires consécutifs de θ à 20° [116]. Ces lois simples sont toujours observées sur les terres cuites ; mais certaines roches présentent un comportement plus compliqué résultant d'interactions entre phases dans les grains magnétiques et pouvant aller jusqu'à l'auto-inversion du sens de l'aimantation [87, 80, 126, 127, 84, 128]. On considère actuellement qu'il s'agit là de cas rares qu'il faut éliminer des études paléomagnétiques [128, p. 62].

Enfin, nous appellerons A. R. A. (aimantation rémanente anhystérique) l'aimantation acquise à la température ordinaire après action d'un champ continu H auquel était superposé un champ alternatif dont on a fait décroître l'intensité efficace d'une valeur $H \sim$ jusqu'à zéro. On sait que pour une valeur donnée H du champ continu, l'A. R. A. croît avec $H \sim$ tendant vers une limite σ_a . Cette valeur σ_a est fonction de H , la courbe $\sigma_a = f(H)$ étant pour H faible une droite de pente forte, quoique inférieure à celle correspondant à l'A. T. R. [96, 97]. Il semble que σ_a tende encore vers σ_{rs} pour H augmentant indéfiniment (¹).

Pour un corps donné, ces rémanences qu'on peut lui communiquer séparément dans des essais successifs (²) ont des comportements différents vis-à-vis des causes de désaimantation : élévation de température, action de champs continus opposés à l'aimantation, action de champs alternatifs. Ces différences qui s'atténuent rapidement au fur et à mesure qu'on considère des rémanences de plus en plus voisines de la saturation, peuvent être très grandes dans le cas des aimantations faibles. Parmi tous les faits expérimentaux maintenant solidement établis signalons les plus importants.

L'A. R. I. faible diminue spontanément en fonction du temps, d'une façon appréciable et suivant une loi encore linéaire en $\log t$; par action de champs alternatifs, qu'on ramène à zéro depuis une valeur efficace maximum $H \sim$, elle est détruite lorsque $H \sim$ est sensiblement égal au champ H magnétisant. L'A. R. V. est de plus en plus dure magnétiquement au fur et à mesure que le temps d'action t du champ magnétisant augmente ; le champ $H \sim$ nécessaire pour atteindre la désaimantation totale peut être considérablement supérieur au champ H magnétisant [95, 97]. L'A. T. R. faible est complètement insensible aux champs alternatifs faibles et moyens ; elle ne disparaît que par action de champs relativement forts. Vis-à-vis des élévations de température, l'A. T. R. partielle normale acquise en champ faible, est remarquable par le fait de « la mémoire magnétique » : une

(¹) L'aimantation induite σ qui existe sous la tension actuelle d'un champ H et qui est proportionnelle au champ dans les champs faibles $\sigma = \chi H$ (χ susceptibilité ou mieux coefficient d'aimantation si l'on se rapporte à l'unité de masse), est finalement sans intérêt en paléomagnétisme alors qu'elle joue un rôle essentiel en prospection magnétique. Dans les champs très forts σ tend vers σ_s , saturation proprement dite, évidemment supérieure à σ_{rs} qui n'est que ce qui reste de σ_s après suppression du champ.

(²) Après avoir chaque fois désaimanté le corps en le chauffant jusqu'à θ et le refroidissant complètement en champ nul. La désaimantation par champs alternatifs ne conduit pas au même état initial [88, 97].

élévation de température de t_2 à t_1 détruisant spécifiquement le moment acquis pendant le refroidissement initial de t_1 à t_2 [113, 116]. L'A. R. A. est une aimantation relativement dure s'apparentant plutôt à l'A. T. R. qu'à l'A. R. I. [96, 97].

Mais un même corps peut porter *simultanément* plusieurs de ces aimantations. Par exemple, une roche peut avoir reçu différentes A. T. R. partielles acquises dans des intervalles successifs de température par action de champs différant en grandeur et direction ; la même roche peut recevoir ensuite une A. R. I. par action d'un champ agissant brièvement à la température ordinaire ou une A. R. I. et une A. R. V. par action prolongée de ce même champ. Pour des corps relativement durs magnétiquement (les terres cuites sont remarquables à ce point de vue), ces aimantations tant qu'elles restent faibles présentent une véritable autonomie et peuvent être séparées. Par exemple, des réchauffements progressifs permettent de séparer exactement des A. T. R. partielles ; l'action de champs alternatifs permet de séparer A. R. I. et A. T. R., c'est-à-dire qu'on peut retrouver en valeur et en direction chacune des aimantations composantes, telle qu'on l'aurait obtenue si la cause dont elle résulte avait agi seule sur le corps. C'est là une particularité vraiment étonnante de ces assemblages compliqués de minéraux que sont les terres cuites et les roches, mais nous avons pris soin de bien souligner les limites de possibilité d'une telle analyse.

C. Modifications minéralogiques par chauffage.

Les lois relatives aux A. T. R. ne sont bien définies et utilisables que si les essais portent sur des objets dont les minéraux magnétiques ne changent pas sous l'effet des chauffages nécessaires à la création même de ces rémanences. Dès nos premiers travaux, nous avons insisté sur l'utilisation de corps « *minéralogiquement stables* » [112] et, dans toutes les recherches qui se sont faites autour de nous, les mêmes précautions ont été prises. Pour l'étude des lois d'aimantation, quand les essais nécessitent un chauffage, les corps utilisés, qu'ils soient de synthèse (sesquioxyle de fer aggloméré, magnétite en grains dispersés) ou naturels (roches ou terres cuites), sont toujours recuits longuement jusqu'à ce que leurs propriétés soient stabilisées ; ce ne sont plus évidemment les corps initiaux dont on étudie les propriétés, mais ce sont des corps constants, ce qui nous paraît essentiel lorsqu'on parle de phénomènes dans la définition desquels interviennent justement des recuits.

Si l'on s'intéresse non plus aux lois des phénomènes mais aux aimantations naturelles et à leur comparaison avec des aimantations provoquées dans les mêmes corps, on se heurte de front à l'altération minéralogique par chauffage. Ce fait, qui est l'un des plus gênants en paléomagnétisme, a été rencontré par de nombreux auteurs, soit qu'ils aient mesuré, après des recuits successifs, les susceptibilités ou les capacités d'aimantation, A. R. I. ou A. T. R. dans des champs donnés, soit qu'ils aient tracé des cycles d'hystérésis et mesuré des aimantations rémanentes

ou à saturation ou des champs coercitifs [41, 65, 51, 4, 85, 37, 12, 100, 28]. Tous ont insisté sur l'ampleur souvent énorme des changements et certains ont essayé de les interpréter : transformation de $\text{Fe}_2\text{O}_3\gamma$ en $\text{Fe}_2\text{O}_3\alpha$, oxydation de la magnétite, réduction du sesquioxyde et surtout, maintenant, changements de phase dans les solutions solides, les titanomagnétites particulièrement.

Nous avons, en ce qui nous concerne, un très grand nombre de résultats expérimentaux relatifs aux modifications par recuit. Deux faits importants s'en dégagent, qui ont conditionné la tournure de nos recherches :

— 1^o Comme nous le montrerons plus loin sur des exemples précis, les terres cuites sont le plus souvent peu sensibles ou parfaitement insensibles aux recuits. Cela s'explique simplement par le fait qu'elles proviennent, par nature, d'un recuit souvent prolongé et à température relativement élevée, de minéraux antérieurement formés. A cause des possibilités ouvertes par cette stabilité, nous avons porté l'essentiel de notre effort sur elles.

— 2^o Les roches volcaniques qui nous intéressaient *a priori* parce qu'elles permettent de remonter loin dans le passé, ne nous ont jamais donné un seul cas de bonne stabilité. Nous leur avons consacré beaucoup d'efforts dont nous n'avons pratiquement pas fait état, sûrs que nous étions de ne pas atteindre une précision raisonnable, que ce soit dans la recherche de l'intensité ou dans celle de la direction du champ passé.

Donnons, comme exemple, les modifications que nous avons observées sur les roches volcaniques suivantes dont les quatre premières, cataloguées par A. LACROIX, appartiennent à la collection du Laboratoire de Minéralogie du Muséum :

A, basalte porphyrique à olivine et pyroxène (augite),

B, basalte porphyrique à augite et feldspaths,

C, basalte doléritique,

D, basalte poreux,

M, lave du Pedregal de San Angel, près de Mexico,

AV, andésite de Volvic (fragment recueilli à côté du bloc 9) [121],

CG, basalte de Châteaugay (échantillon taillé dans le bloc 24) [121].

Dans le tableau 1, σ_{rn} est l'aimantation spécifique naturelle de la roche, χ_0 sa susceptibilité massique ⁽¹⁾ et $\sigma_{0(30)}$ l'A. R. I. due à un champ de 30 Oe, ⁽²⁾ avant chauffage ; χ_1 est la nouvelle susceptibilité après une chauffe assez brève (4 heures) en azote purifié, à 670° C, et σ_{r1} l'A. T. R. acquise par refroidissement dans le champ terrestre du laboratoire (0,40 Oe à l'emplacement du four) ; χ_2 , $\sigma_{2(30)}$ et σ_{r2} les grandeurs précédemment définies observées après un second chauffage à 670°.

⁽¹⁾ Mesurée dans un champ de l'ordre de 10 Oe.

⁽²⁾ Champ appliqué par cycles lents d'amplitude 30 Oe; mesure vingt minutes après la suppression du champ.

Cette température de 670° étant supérieure, ou au moins égale à tous les points de CURIE des minéraux magnétiques, toutes les aimantations antérieures sont détruites à chaque recuit. Les grandeurs du tableau sont exprimées en u. e. m. $\times 10^{-4}$.

TABLEAU 1

EFFET DE RECUIITS SUR LES PROPRIÉTÉS MAGNÉTIQUES DES ROCHES VOLCANIQUES

ROCHE	σ_{rn}	σ_{r1}	σ_{r2}	χ_0	χ_1	χ_2	$\sigma_{0(30)}$	$\sigma_{2(30)}$
A	18,0	35,1	42,0	11,3	9,3	7,5	41,8	13,1
B	7,8	76,7	144,0	1,1	5,4	8,0	2,1	9,2
C	8,6	11,1	14,9	8,3	7,7	6,3	25,3	14,3
D	28,1	45,2	48,3	17,6	8,6	8,5	66,0	4,5
M	34,2	56,8	44,0	2,2	2,4	2,6	10,7	0,3
AV	11,1	21,0	20,0	4,6	4,1	3,6	3,6	2,6
CG	3,8	36,0	37,0	17,0	10,9	11,3	22,3	9,0

Pour chaque échantillon on observe des changements très importants des propriétés avant et après chauffage (χ_0 , χ_1 et χ_2 ; $\sigma_{0(30)}$ et $\sigma_{2(30)}$) ; l'évolution se poursuivant sous l'effet d'un nouveau recuit (σ_{r1} et σ_{r2} ; χ_1 et χ_2). D'autre part ces changements n'ont pas la même ampleur relative pour les différents types d'aimantation (induite avec χ , A. R. I. avec $\sigma_{(30)}$ et A. T. R. avec σ_r) et leurs sens peuvent être opposés pour un même échantillon. Il faut remarquer que nous n'avons pas choisi des cas exceptionnels : on rencontre souvent des variations encore plus importantes. Remarquons aussi que dans cette véritable débandade des minéraux magnétiques par recuit, les roches volcaniques récentes et quaternaires se comportent en général moins mal que les plus anciennes.

D. *Modifications minéralogiques provoquées et spontanées,
au cours des temps.*

Des roches volcaniques ou sédimentaires anciennes ont pu se trouver enfouies à de grandes profondeurs, se comptant en kilomètres. Sous l'effet combiné de la température, de la pression et de l'action chimique d'agents gazeux divers, elles ont subi de profondes transformations décrites en pétrographie sous le nom de métamorphisme, qu'il soit général ou local. Les minéraux magnétiques n'échappent pas à ces actions énergiques. Ceux qui existaient à l'origine peuvent être transformés en minéraux nouveaux, magnétiques ou non ; d'autres peuvent être apparus à partir de composés peu ou pas magnétiques.

En dehors de ce phénomène de métamorphisme, la situation n'est guère meilleure lorsqu'il s'agit de roches anciennes. Celles qui sont plus ou moins voisines de la surface du sol subissent des transformations chimiques importantes dont cer-

taines sont étudiées en pédologie, et il est bien connu que les composés du fer sont particulièrement mobiles. L'ampleur de ces actions est démontrée par le phénomène, découvert par E. LE BORGNE [68, 69], d'une susceptibilité relativement très élevée dans les premiers centimètres des sols les plus variés, indépendamment des propriétés magnétiques du sous-sol sous-jacent. Elle est bien montrée aussi par les variations considérables des propriétés magnétiques des roches volcaniques d'un même gisement depuis l'intérieur de la masse rocheuse jusqu'à la périphérie où l'altération est visible ; parmi d'autres, nous en avons rencontré des cas frappants [121, 106] et nos observations s'accordent avec celles de G. GRENET [42, 43] et celles plus récentes de A. ROCHE [98] pour montrer que les roches volcaniques d'Auvergne antérieures au quaternaire sont fortement altérées dans leurs constituants magnétiques.

A ces modifications provoquées par des actions physiques ou chimiques, il faut ajouter les modifications minéralogiques spontanées pouvant résulter du retour lent d'un état d'équilibre métastable à un état stable. De travaux récents de N. KAWAI et de ses élèves [61, 62], dont nous avons souligné déjà l'importance en paléomagnétisme, il résulterait que les solutions solides de titanomagnétites qui se forment à température élevée, à partir des magmas, sont à points de CURIE moyens ; puis elles évolueraient (exsolution) vers deux solutions solides en équilibre à la température ordinaire, l'une à point de CURIE bas, vers 100°, l'autre à point de CURIE proche de celui de la magnétite. Ce phénomène est illustré d'une façon très parlante par le graphique [62, p. 458] résumant une étude statistique des points de CURIE principaux des roches volcaniques japonaises épanchées depuis le tertiaire jusqu'à l'époque actuelle. D'importants travaux anglais [89, 90] se rapportent aussi à l'étude expérimentale de ces problèmes d'équilibre entre les minéraux des roches.

Les transformations minéralogiques, provoquées ou spontanées, subies par les roches anciennes ont une première conséquence, un peu analogue à celle qui résultait du recuit : la roche sur laquelle nous pouvons expérimenter, en particulier pour comparer son aimantation naturelle à des aimantations provoquées, n'est plus la roche originelle. Nous pouvons souligner ici un caractère piquant des roches anciennes, une sensibilité presque malade à l'aimantation visqueuse. Nous pensons que cette propriété, assez désagréable, est due à des minéraux de néoformation ; le sesquioxyde cubique de fer ($\text{Fe}_2\text{O}_3\gamma$) pourrait jouer un rôle appréciable [68, 69], mais sans doute aussi les titanomagnétites d'exsolution à point de CURIE bas, ce qui expliquerait ce fait, qui nous a surpris, que des roches paraissant non altérées à l'examen pétrographique soient à gros traînage. Le lien entre forte viscosité magnétique et présence de titanomagnétites à point de CURIE bas sera facile à contrôler par quelques essais sur des titanomagnétites de synthèse. Dès maintenant, il apparaît assez nettement dans un travail de J. ROQUET [100] conduit pour un tout autre but ; si l'on compare le traînage des huit échantillons

en essais avec leurs diagrammes d'A. T. R. partielle, on remarque que les roches à traînage fort (N_{11}^2) et très fort (N_{13}) sont respectivement riches et très riches en minéraux à point de CURIE peu élevé, et inversement pour les roches à traînage modéré (G_2 , AB_{11} , G_5) ou négligeable (Oa_2 et AK_2).

L'autre effet, très important au point de vue du paléomagnétisme, des transformations subies par les minéraux des roches anciennes, est la modification de leur aimantation originelle, quel que soit le mécanisme générateur de celle-ci. D'une part, les minéraux porteurs de moments magnétiques perdent ces moments en se transformant, ce qui peut conduire à des roches peu aimantées quoique très magnétiques. D'autre part, inversement, il peut se faire que les minéraux qui apparaissent acquièrent des aimantations parasites, par le simple fait que leur réseau cristallin s'organise très lentement en présence du champ magnétique terrestre. Cette « aimantation par cristallisation » dont nous avons à plusieurs reprises suggéré l'étude (*a priori* difficile) a été évoquée, surtout ces dernières années, par plusieurs auteurs [66, 74, 29, 25, 53, 54, 46, 9,]; elle n'est que probable, mais elle pourrait jouer un rôle important dans le cas des roches à très faible rémanence telles que les roches sédimentaires.

A ces modifications des aimantations originelles par changement minéralogique viennent s'en ajouter d'autres, sans doute aussi importantes, par effet direct des agents physiques. Dans le cas du métamorphisme, l'élévation de *température* fait disparaître toute thermorémanence acquise entre la température de réchauffement et la température ordinaire; inversement les minéraux originels ou nouveaux prennent de l'A. T. R. partielle au cours du refroidissement lent qui les ramène à la température ordinaire, à laquelle ils se trouvent finalement quand nous les prélevons; il resterait cependant à prouver que l'extrême lenteur du refroidissement ne réduit pas l'acquisition d'A. T. R. Ces effets de la température peuvent être désastreux pour l'aimantation originelle; beaucoup de minéraux en effet sont à point de CURIE bas, et l'A. T. R. partielle, prise par exemple entre 200° et la température ordinaire, peut représenter une fraction importante de la rémanence naturelle, tout particulièrement dans les roches volcaniques très anciennes et les roches sédimentaires. Toujours dans le cas des roches métamorphisées, la *pression* a pu avoir un effet important sur l'aimantation par le phénomène de magnétostriction, soit pendant que la roche était progressivement comprimée, soit ultérieurement à la décompression. Le phénomène, qui est évidemment très différent suivant que la compression est isotrope ou non, n'avait reçu jusqu'ici que peu d'attention; des travaux récents de J. W. GRAHAM l'ont subitement fait passer au premier plan, cet auteur [40] ayant montré que des compressions, relativement faibles, pouvaient modifier complètement les aimantations naturelles des roches. Pour toutes les roches, la présence du *champ* terrestre lui-même apporte de l'aimantation supplémentaire de traînage dont nous soulignerons plus loin l'ordre de grandeur

possible. Enfin la *foudre*, par le champ bref mais intense des courants de décharge, peut provoquer des aimantations parasites (A. R. I.) intenses. Il est bien connu qu'on rencontre souvent, en prospection magnétique, des régions très limitées, des pitons rocheux tout particulièrement, présentant des anomalies magnétiques fortes (avec des points d'anomalies maximums, positive et négative, distants de quelques mètres seulement) et correspondant à des roches sous-jacentes anormalement aimantées [91, 20, 71, 103, 102, 78]. C'est une raison supplémentaire pour laquelle les aimantations de roches anciennes recueillies à la surface du sol sont souvent inutilisables ; cela a particulièrement gêné le travail de A. ROCHE en Auvergne [98] ; c'est cela aussi qui a incité D. I. GOUGH, dans son étude des dykes du Pilansberg, à travailler sur des échantillons recueillis dans des mines [44], précaution que recommandaient déjà A. F. HALLIMOND et E. F. HERROUN en 1933 [47].

Toutes les modifications des aimantations originelles que nous venons de classer, si elles sont très graves lorsqu'on s'intéresse, comme nous le faisons, à la recherche de l'intensité du champ, le sont aussi pour ce qui concerne sa direction, tellement qu'on a pu imaginer à partir de certaines d'entre elles des mécanismes d'auto-inversion progressive du sens de l'aimantation [87, 126, 37, 61].

II. RAPPEL ET DISCUSSION D'ESSAIS QUALITATIFS DE RECHERCHE DE L'INTENSITÉ.

A. Résultats de J. Koenigsberger sur les roches volcaniques.

Lorsqu'un magma volcanique se refroidit dans le champ terrestre d'intensité F_0 , la valeur σ_r de l'aimantation spécifique thermorémanente qu'il acquiert dépend de F_0 (comme on l'a vu, on peut admettre qu'il y a proportionnalité) et de la composition minéralogique de la roche. Supposant connues les propriétés magnétiques des différents minéraux, on pourrait penser qu'en déterminant la nature et la quantité des constituants magnétiques de la roche considérée, il serait possible de prévoir quantitativement son comportement magnétique, donc, en particulier, de retrouver F_0 en mesurant σ_r . La méthode s'appliquerait aux terres cuites et aux roches volcaniques, bien entendu à condition de supposer en plus que l'aimantation et la composition minéralogique de roches anciennes ont pu demeurer immuables.

Depuis longtemps on sait que, même au prix d'un effort énorme, il est impossible d'établir, ne serait-ce que grossièrement, une telle relation. L'intéressant travail de K. PŮZICHA [93], souvent oublié, le montrait clairement dès 1930 ; et, depuis, l'énorme développement des études de minéralogie magnétique n'a fait que confirmer de plus en plus fermement ce principe. Même s'il n'y avait dans une roche donnée qu'un seul minéral magnétique, aux propriétés bien connues macroscopi-

quement, son effet, à l'état dispersé, pour une concentration donnée, dépendrait déjà considérablement de la forme de ses grains, de leur grosseur, de leur arrangement. Mais, de fait, les minéraux magnétiques sont extrêmement variés chimiquement et cristallographiquement, et de petites différences dans leur composition, l'existence même en faible proportion d'un élément supplémentaire, changent considérablement leurs propriétés magnétiques. On se heurte ainsi d'un côté à l'excessive importance de données presque insaisissables et cette méthode, la plus intuitive pour déterminer l'intensité du champ passé, se trouve inapplicable.

1. Méthode indirecte utilisant la susceptibilité magnétique.

Mais une voie de secours ne s'ouvrirait-elle pas en faisant intervenir la susceptibilité magnétique χ de la roche, grandeur facile à mesurer et qui dépend comme σ_r de tous les détails de la composition en minéraux magnétiques ; c'est une donnée expérimentale intégrant, en quelque sorte, toute la complexité minéralogique de la roche. S'il existait un rapport constant Q entre χ , susceptibilité d'aimantation induite, et σ_r/F_0 , sorte de « susceptibilité » de thermorémanence, qui ne dépendent l'une et l'autre que de la nature, de l'état et de la quantité des minéraux magnétiques, notre problème serait évidemment résolu, la mesure de σ_r et χ donnant l'intensité du champ ancien ayant provoqué la rémanence σ_r . Encore faut-il faire l'hypothèse que la roche n'a pas subi d'évolution minéralogique dont l'effet peut être de diminuer σ_r et d'augmenter χ si les minéraux qui se forment sont relativement magnétiques.

J. KOENIGSBERGER, dans de nombreux travaux de terrain et de laboratoire consacrés aux aimantations et à la minéralogie des roches volcaniques [66], s'est toujours beaucoup intéressé au rapport Q . Rappelons d'abord ses notations ; σ_r étant l'aimantation « naturelle » d'un échantillon de roche, et χ sa susceptibilité ⁽¹⁾, il considère $Q_n = \frac{\sigma_r}{\chi F}$, où F est l'intensité *actuelle* du champ qu'il prend conventionnellement de 0,45 Oe. Ainsi, Q_n est une sorte de nombre pour prospecteurs : c'est le rapport entre l'aimantation rémanente naturelle de la roche et son aimantation induite qui, sur le terrain, agissent par leur somme géométrique. Si on désigne par F_0 l'intensité du champ ancien responsable de σ_r (toujours considéré comme représentant l'intensité d'aimantation thermorémanente originelle, non altérée), le rapport Q , réel, caractéristique de l'échantillon, serait $Q = \frac{\sigma_r}{\chi F_0}$; ainsi

(1) Nous utilisons constamment des grandeurs rapportées au gramme, soit σ_r aimantation spécifique et χ coefficient d'aimantation. J. KOENIGSBERGER utilisait des grandeurs rapportées au cm^3 , J intensité d'aimantation et K susceptibilité. Le rapport Q , nombre sans dimensions, reste évidemment le même.

$Q_n = Q \frac{F_0}{F}$, proportionnel à F_0 , mesurerait l'intensité du champ ancien en valeur relative, dans la mesure évidemment où l'on pourrait considérer que Q est du même ordre de grandeur pour l'ensemble des roches volcaniques. Or, J. KOENIGSBERGER ayant étudié un grand nombre d'échantillons de ces roches [64, 65], trouve des variations irrégulières et importantes du rapport Q_n qui présenterait cependant, dans l'ensemble, une évolution systématique : pour les roches récentes ce rapport est très supérieur à l'unité, et pour des roches de plus en plus anciennes, jusqu'aux roches primaires et archéozoïques, il devient généralement inférieur à l'unité. Faut-il conclure que, statistiquement au moins, le champ terrestre a été beaucoup plus faible qu'actuellement dans le lointain passé géologique ? KOENIGSBERGER ne le fait pas. Ayant posé, assez singulièrement [65, p. 204 et 206], que d'après des idées d'EINSTEIN l'intensité du champ n'a pas pu varier beaucoup au cours des temps ⁽¹⁾, il cherche ailleurs, nous y reviendrons, les causes de la variation de Q_n et il ne retient de ses observations que leurs conséquences en géophysique appliquée, c'est-à-dire sur la production des anomalies magnétiques. Mais les théories les plus récentes sur l'origine du champ terrestre nous rendant toute liberté de pensée sur la variation de l'intensité, ne pourrions-nous pas reprendre l'interprétation des résultats de KOENIGSBERGER et conclure à la faiblesse extrême du champ terrestre très ancien ? Tout s'oppose à cela, et, en premier lieu, le fait que le rapport Q_n n'est en aucune façon une constante, même si l'on s'en tient à une approximation grossière et si l'on se limite à un groupe de roches.

L'un de nous, abordant jadis le problème de l'intensité [110], citait l'exemple d'essais ayant porté sur une même argile, cuite dans un même champ (13 Oe), à des températures différentes et dans des atmosphères différentes (oxygène, azote, gaz d'éclairage) ; des valeurs de σ_r et de χ qu'il donnait, on déduit les rapports Q du tableau 2.

Or, les valeurs de σ_r et de χ étaient étalées considérablement : de $2 \cdot 10^{-4}$ à $4\,750 \cdot 10^{-4}$ u. e. m. pour σ_r , et de $10,5 \cdot 10^{-6}$ à $3\,700 \cdot 10^{-6}$ u. e. m. pour χ . La dispersion des valeurs de Q est incontestablement plus faible ; mais à notre point de vue elle reste énorme, surtout si l'on tient compte de la parenté d'origine des produits.

On arriverait à un résultat analogue en rassemblant les valeurs de Q_n données par différents auteurs pour des roches volcaniques d'une même époque, par exemple du quaternaire récent, ce qui nous placerait dans les meilleures conditions vis-à-vis des altérations progressives qui restent faibles pour des roches aussi jeunes. Comme on peut objecter qu'il s'agit là de Q_n et non de Q , et que ses variations pourraient être dues à de grands changements de F_0 pendant la période choisie, considérons seulement des roches d'une même venue volcanique en prenant comme exemple

⁽¹⁾ On avait retrouvé récemment cette idée avec le renouveau éphémère de la théorie gyromagnétique du champ terrestre.

TABLEAU 2

RAPPORTS Q POUR UNE MÊME ARGILE
CUITE A DIFFÉRENTES TEMPÉRATURES ET DANS DIFFÉRENTES ATMOSPHÈRES

TEMPÉRATURE DE CUISSON		400°	580°	670°	870°
ATMOSPHÈRE	Oxygène	0,95	1,9	2,75	4,75
	Azote	1,2	2,15	3,85	13,1
	Gaz d'éclairage	6,1	9,85	6,15	2,0

l'andésite de VOLVIC [121] dont nous avons mesuré l'aimantation permanente et la susceptibilité sur une série d'échantillons pris dans l'épaisseur (15 m environ) de la coulée. C'est une formation homogène dont les différentes parties, examinées par A. LACROIX, ne présentaient pas de différences visibles pétrographiquement; cependant σ_r et χ ont montré des variations importantes donnant les valeurs inscrites dans le tableau 3 pour Q_n :

TABLEAU 3

RAPPORTS Q_n A DIFFÉRENTES HAUTEURS
DANS LA COULÉE D'ANDÉSITE DU VOLCAN DE LA NUGÈRE (VOLVIC)

Distance à partir du fond de la coulée (en mètres)	2	2,3	2,5	3	5	6	7	9	10	12
Q_n	2,1	2,8	3,9	5,9	8,2	4,9	8,6	6,9	13,2	8,7

Bien que nous soyons là dans une situation tout à fait exceptionnelle puisqu'il ne s'agit même plus d'une famille pétrographique mais de variétés imperceptibles d'une même roche, la dispersion des rapports Q_n reste forte; elle se trouve même supérieure à celle des χ (de 370 à $1.370 \cdot 10^{-6}$ u. e. m.) et presque égale à celle des σ_r (de 9 à $68 \cdot 10^{-4}$ u. e. m.). Un fait analogue établi sur une succession de coulées a été décrit plus récemment en Nouvelle-Zélande [48, 49]; systématiquement Q_n plus ou moins constant dans l'épaisseur d'une coulée, augmente très fortement vers ses limites supérieure et inférieure.

Cette variabilité du rapport Q_n peut provenir pour une part des altérations minéralogiques des roches [121], mais elle s'observe sur les valeurs de Q dans des essais sur des corps de synthèse bien définis, par exemple pour du sesquioxyde de fer rhomboédrique aggloméré ou de la magnétite en grains fins dispersés [99]. Des différences minimales en apparence dans le mode de préparation, ou les recuits, entraînent des changements si importants qu'on a pu, par exemple, observer sur trois échantillons de sesquioxyde de fer rhomboédrique des valeurs de Q aussi différentes que 13, 365 et 598 [99, p. 237].

Devant de tels résultats il ne reste évidemment aucun espoir de considérer les rapports Q_n observés sur des roches volcaniques comme une mesure des champs originels F_0 . Cependant leur évolution, apparemment systématique au cours des temps géologiques, mériterait une discussion que nous allons retrouver sous une autre forme.

2. Nouvelle méthode indirecte comportant une réaimantation thermorémanente.

Contre la dispersion fondamentale des valeurs de Q pour les différentes roches, J. KOENIGSBERGER avait essayé de réagir en comparant, en quelque sorte, chaque roche à elle-même de la manière suivante. Ayant déterminé le rapport Q_n d'un échantillon, il le chauffe jusqu'au delà de son point de CURIE et, l'aimantant par refroidissement dans un champ F' connu, il mesure sa thermorémanence σ'_r et sa

susceptibilité nouvelle χ' ; il en déduit $Q_t = \frac{\sigma'_r}{\chi' F'}$. Ce rapport Q_t représente le rapport Q vrai de la roche, mais *telle qu'elle est actuellement*, après chauffage vers 600° ou 700° C. Si la modification minéralogique due au recuit était négligeable,

le rapport $Q_{nt} = \frac{Q_n}{Q_t}$, que calcule KOENIGSBERGER pour chaque roche, serait égal à F_0/F et constituerait bien une mesure directe de F_0 . Mais, nous l'avons vu, la plupart des roches volcaniques sont considérablement modifiées dans leurs éléments magnétiques par un tel chauffage et la roche obtenue, sur laquelle est mesuré Q_t , n'a qu'un rapport assez lointain avec la roche initiale dont on désire connaître le rapport Q . Cependant on peut espérer que cette référence à une roche parente vaut mieux que la référence à l'ensemble de toutes les roches volcaniques et attacher plus d'importance au second diagramme de KOENIGSBERGER [64, fig. 13, p. 235] donnant Q_{nt} pour un grand nombre de roches volcaniques d'Europe centrale, tout au long des temps géologiques. Effectivement les points relatifs aux roches récentes tendent à se concentrer vers la valeur 1 correspondant bien à l'intensité du champ actuel; ensuite Q_{nt} devient relativement très faible pour les roches primaires et précambriennes. De nombreuses études ultérieures ont conduit à un résultat analogue [51, 73, 12, 131], le rapport Q_{nt} étant généralement de quelques dixièmes seulement pour les roches volcaniques anciennes.

Ainsi, qualitativement au moins, nous retrouvons le fait déjà rencontré avec Q_n ; mais, malheureusement, la situation n'est guère plus favorable. Indiquons d'abord la réaction de KOENIGSBERGER devant ce résultat. Conservant sa position déjà rappelée sur l'invariabilité de F_0 , il attribue la décroissance de Q_{nt} (et du même coup celle de Q_n) à la diminution progressive de la thermorémanence originelle σ_r , au cours des temps. Pour lui, le rapport Q_{nt} constitue non pas une mesure de F_0 , mais plutôt une mesure du temps dans l'échelle géologique [65]. Dans un travail ultérieur [66], il précise cette idée de la variation de Q_{nt} en fonction du temps,

par décroissance continue des rémanences, en choisissant des roches volcaniques à point de CURIE bas (son groupe 1) qu'il considère comme particulièrement sensibles à la désaimantation ; la figure 5 montre (1) la répartition des Q_{nt} depuis la fin du primaire où ils sont faibles, pendant le tertiaire où ils s'éparpillent, jusqu'au quaternaire où ils tendent encore vers la valeur 1 (aucun résultat pour l'ère secondaire). Mais il ne s'agit pas d'une variation bien définie qu'on peut traduire par une courbe ; malgré le tri effectué sur les roches, les points expérimentaux sont très dispersés et la diminution de Q_{nt} vers le passé n'a qu'un sens statistique ; faut-il préciser qu'il serait puéril d'en envisager l'utilisation individuelle à la datation de formations volcaniques d'âge inconnu.

Continuant à rejeter, parce qu'elle est sans preuve, l'hypothèse de la stabilité dans le temps de F_0 , pouvons-nous, mieux que pour celui de Q_n , interpréter le diagramme de Q_{nt} par une évolution de F_0 , qui aurait été très faible dans le lointain passé et même encore au tertiaire. Il faudrait pour cela admettre, d'une part la stabilité des aimantations très anciennes (que nie KOENIGSBERGER et sur laquelle comptent encore, trop facilement sans doute, les paléomagnéticiens engagés dans l'étude de la direction du champ), d'autre part la stabilité des minéraux magnétiques dans l'opération de recuit qui permet d'obtenir σ_r . Nous avons vu qu'elles sont insoutenables pour des roches très anciennes dont les aimantations et les minéraux magnétiques ont subi d'importants changements. Finalement, la plupart des auteurs reconnaissant ces difficultés n'osent pas conclure mais ils ont tout de même tendance à admettre que l'intensité du champ ancien a toujours été de l'ordre de celle du champ actuel. J. M. BRUCKSHAW et S. A. VINCENZ écrivaient encore en 1954 [12] : « In general it would seem that the intensities of natural magnetization are compatible with thermo-remanent magnetization acquired in a magnetic field of strength similar to that existing to day (2). » De la même façon, les auteurs japonais qui proposent un test de stabilité des aimantations anciennes par comparaison d'aimantations naturelles et provoquées [81, 82] admettent implicitement mais très nettement ce principe. Il nous paraît plus raisonnable de reconnaître qu'il n'y a aucun espoir de trouver dans les résultats de KOENIGSBERGER, tels qu'ils sont, ou dans leurs analogues, ne serait-ce qu'une indication sur l'évolution du champ terrestre au cours des âges géologiques.

B. Résultats obtenus en partant des roches sédimentaires.

Les aimantations des roches sédimentaires jouent maintenant un rôle très important dans les recherches paléomagnétiques. Nous ne rappellerons pas comment leur étude commencée sur les varves avec les travaux de G. ISING et ceux des

(1) A la page 307. Sur cette figure les chiffres en ordonnées à droite sont des dixièmes et non des unités.

(2) Au bas de la page 587 de leur mémoire lire Q_c/Q_n au lieu de Q_n/Q_c .

géophysiciens de la Carnegie Institution, s'est poursuivie sur les carottes de sondages océaniques, à la Carnegie encore, pour s'étendre enfin aux sédiments de toutes sortes [57, 72, 58, 125]. Nous n'insisterons pas non plus sur l'étrange destinée des aimantations de ces roches sédimentaires qui avaient permis, jusqu'en 1954, de soutenir que le champ terrestre avait gardé son sens actuel et approximativement sa direction actuelle au cours des âges géologiques [125, 38] ; puis, le barrage ayant brusquement cédé [23, 27], qui sont considérées maintenant, à égalité avec les roches volcaniques, comme témoins d'incessants changements de sens de l'ensemble du champ terrestre (inversion) et d'une évolution continue de sa direction moyenne (polar wandering) [39, 105, 56, 9].

Contrairement à ce qui se passe pour la direction du champ, les travaux relatifs à la recherche de son intensité sont très limités. Nous les étudierons en distinguant trois cas : les varves, les sédiments marins et les roches sédimentaires ordinaires.

1. Varves.

Les varves, formations lacustres ou côtières marines de régions froides dans lesquelles la sédimentation relativement abondante se fait en particules grosses l'été et fines l'hiver, sont intéressantes par leur structure feuilletée, annuelle, qui en résulte. Leur intérêt principal vient de la possibilité qu'elles offrent de compter les dates de dépôt année par année. Les aimantations rémanentes qu'elles présentent sont considérées comme résultant de l'orientation, tout au long de leur chute, sous l'effet du champ terrestre, de celles des particules qui sont douées d'un moment magnétique permanent.

Ce mécanisme d'aimantation peut être suivi au laboratoire. Dès l'origine, ISING avait expérimenté sur le dépôt de sédiments artificiels, suspensions d'argile pulvérisée avec limaille de fer et grains de magnétite [57]. Des études plus étendues, de dépôt dans les champs magnétiques imposés, ont été effectués aux U. S. A. sur des argiles glaciaires remises en suspension [58], et au Japon [78] sur des sables volcaniques ; actuellement de telles expériences sont poursuivies systématiquement à Birmingham [45, 63]. On sait à quel inquiétant résultat conduisent tous ces essais en ce qui concerne la fossilisation de la *direction* du champ terrestre : en eau calme et sur fond horizontal, la déclinaison est bien enregistrée, mais l'inclinaison l'est très mal. La pente possible du fond et les courants (liquides) circulant dans son voisinage sont des causes supplémentaire d'erreurs importantes [63].

JOHNSON, MURPHY et TORRESON avaient pensé pouvoir apprécier l'intensité du champ ancien par des expériences de dépôt provoqué [58, p. 360]. Expérimentant sur 200 années de sédiments varvés datant de 10 000 ans environ et remis en suspension après mesure de leur aimantation naturelle, ils établirent que la rémanence des varves artificielles est une fonction définie et reproductible de l'intensité du champ imposé, et ils tracèrent la courbe donnant l'intensité d'aiman-

tation rémanente en fonction de l'intensité du champ appliqué. D'après cette courbe [58, fig. 9], et en admettant que les varves n'aient subi aucune modification depuis leur dépôt originel, les intensités d'aimantation correspondraient à des champs anciens compris entre 1 et 2 Oe. Peut-on admettre ces valeurs pour l'intensité du champ au N. E. des U. S. A. il y a une centaine de siècles ? Indépendamment du fait que l'expérience est unique, les raisons suivantes semblent s'y opposer : La pente du fond et les courants correspondant au dépôt originel sont inconnus ; l'orientation des particules magnétiques peut avoir changé quand les varves sont passées de leur état originel à leur état sec actuel *in situ* ; ces particules ont pu subir d'importants changements minéralogiques ; enfin, une partie de l'aimantation naturelle peut être de l'aimantation rémanente visqueuse acquise progressivement. A ce sujet il est capital de préciser que les aimantations naturelles des varves sont très faibles malgré un contenu en minéraux magnétiques souvent important. Des essais seraient nécessaires pour déterminer la capacité d'acquisition, par les varves considérées, d'une telle A. R. V. dont la loi de proportionnalité à $\log t$ permettrait d'évaluer l'importance pour une durée d'action de 10 000 ans.

Ainsi, l'essai est intéressant mais son résultat ne peut être considéré que comme une simple indication. Peut-on espérer que des expériences systématiques et nombreuses mèneront à une connaissance de F_0 durant les quelques dizaines de milliers d'années pour lesquelles on dispose de varves assez bien datées et peu métamorphosées ? D'après les études récentes [45, 63] il paraît difficile d'attendre de tels matériaux des résultats vraiment quantitatifs.

2. *Sédiments marins.*

Admettant que les sédiments marins portent des aimantations acquises comme celles des varves par orientation des particules aimantées tombant dans le champ terrestre, Mc NISH et JOHNSON avaient étudié une carotte de sondage prélevée au fond de l'Océan Atlantique [72]. Ultérieurement, JOHNSON, MURPHY et TORRESON [58] mesurèrent l'aimantation rémanente de six carottes de plusieurs mètres de longueur prélevées au fond de l'Océan Pacifique en différents lieux depuis l'équateur jusqu'aux régions polaires antarctiques ; certaines de ces carottes, datées par méthode radioactive, permettraient d'atteindre un million d'années. Passons sur les résultats obtenus pour la direction du champ ; en ce qui concerne son intensité, les auteurs ne réalisent pas d'expérience de redéposition mais ils tentent l'essai suivant. Plusieurs des petits échantillons prélevés au long des carottes, sont soumis à un champ de 2 000 Oe et leur intensité d'aimantation est mesurée. Il s'agit là, pratiquement, de σ_{rs} , A. R. I. à saturation ; les auteurs la considèrent comme une sorte de mesure de la teneur en matériaux magnétiques dans chaque échantillon. Admettant alors, sans trop s'illusionner sur cette hypothèse, que l'aimantation acquise lors du dépôt est proportionnelle à cette teneur

d'une part, et à l'intensité du champ agissant d'autre part, ils peuvent déterminer les intensités passées F_0 en s'appuyant sur les sédiments les plus récents déposés dans le champ actuel d'intensité F connue. Ils donnent ainsi, sous réserves, la variation de l'intensité du champ pendant un million d'années [fig. 17, p. 371]. L'intensité actuelle étant prise comme unité, F_0 aurait été de l'ordre de 0,7 au départ ; elle serait passée, 500 000 ans plus tard, par une valeur minimum de 0,6 pour atteindre progressivement sa valeur actuelle. Ajoutant ce résultat à celui qu'ils avaient obtenu pour la direction, les auteurs croyaient pouvoir conclure que le champ terrestre était resté sensiblement constant depuis un million d'années, conclusion agréable en 1948 car elle s'accordait bien avec la théorie gyromagnétique alors à l'honneur.

Que penser de cette méthode ? Hormis le cas de particules magnétiques qui se seraient déposées toujours semblables au cours des temps, en un lieu donné, portant en particulier les mêmes aimantations permanentes originelles, individuelles ⁽¹⁾, l'aimantation rémanente isotherme de saturation n'a pas de relation directe avec la rémanence naturelle des particules ; cette rémanence dépend avant tout de la façon dont elle a été provoquée jadis dans les roches dont la destruction a fourni le sédiment. En effet, supposons qu'à deux niveaux différents les particules soient les mêmes à tous les autres points de vue mais que les unes portent des aimantations originelles très faibles et les autres très fortes. Dans le même champ agissant lors de leur dépôt les premières faiblement dirigées s'orienteront presque au hasard et la rémanence du sédiment sera faible ; les secondes soumises de la part du champ à des couples forts s'orienteront fermement suivant ce champ et la rémanence sera forte. Cependant, par hypothèse, les valeurs de l'A. R. I. à saturation (provoquée par le champ de 2 000 Oe qui détruira pratiquement les autres aimantations) seront absolument identiques ; nous serions ainsi amenés à conclure à des intensités très différentes du champ agissant au dépôt.

D'autres questions se posent relatives à l'évolution mécanique, minéralogique et magnétique des sédiments. L'une est claire, c'est celle de l'acquisition progressive d'aimantation de trainage que nous avons évoquée déjà à propos des varves et qui devient de plus en plus grave pour des sédiments de plus en plus anciens. Ces sédiments portent des rémanences très faibles, l'A. R. V. si faible soit-elle prend une importance relative très grande. Les auteurs s'en inquiètent et ils déterminent en quelque sorte la dureté des aimantations naturelles en déterminant le champ qu'il faut leur opposer pour les annuler ; ils trouvent ainsi des champs qu'ils considèrent comme forts : 2 à 40 Oe et qui sont en réalité relativement faibles. En effet, nous l'avons vu, si une A. R. I. est détruite par le champ de l'ordre de grandeur du champ qui l'a provoquée, l'A. R. V. provoquée par le même champ

(1) Il n'est pas nécessaire qu'à un niveau donné les particules soient identiques une à une, mais que leur spectre, en quelque sorte, soit le même à tous les niveaux.

est de plus en plus forte mais aussi de plus en plus dure quand croît la durée d'action [95]. Pour détruire une A. R. V. due à un champ de un Oe, agissant pendant des années ou des siècles il faut des champs alternatifs de dizaines ou de centaines d'Oe. Avec des champs continus, le phénomène se complique de l'A. R. provoquée par ces champs ; comme nous le verrons plus loin, le champ qui, appliqué en sens inverse de l'aimantation naturelle, ramène l'aimantation apparente à zéro est pratiquement égal au champ qui provoque une A. R. I. de valeur égale à celle de l'aimantation naturelle ; il ne qualifie aucunement la dureté de celle-ci.

3. *Sédiments quelconques, anciens.*

Tous les travaux de ces dernières années relatifs à la direction du champ dans le lointain passé géologique, ceux de l'École anglaise en particulier [6], admettent que les directions d'aimantation des roches sédimentaires sont celles du champ à l'époque du dépôt ou plus ou moins postérieurement. Ceci implique qu'il ne peut s'agir d'aimantations par orientation de particules, comme dans le cas des varves puisqu'il pourrait y avoir alors d'énormes différences entre les inclinaisons fossilisées et réelles, ce qui ôterait toute signification aux synthèses paléomagnétiques. Il faut imaginer un mécanisme d'aimantation postérieur au dépôt, sur lequel les idées ne sont pas claires. S'agit-il de l'hypothétique aimantation par cristallisation dans les remaniements minéralogiques ayant suivi la mise en place ? Dans le cas des roches métamorphosées ne s'agit-il pas d'aimantations de même nature acquises pendant la période de métamorphisme ou postérieurement, par exemple, comme nous l'avons suggéré déjà, lors du refroidissement ayant accompagné le retour des roches au voisinage de la surface ?

Quoi qu'il en soit, il est certain que le mode d'aimantation des roches sédimentaires anciennes n'est pas connu. Indépendamment de la difficulté venant de la très longue durée d'action des mécanismes ayant joué, il est tout à fait impossible actuellement de réaliser des expériences plus ou moins apparentées à la redirection des varves pour retrouver l'intensité du champ ancien. Pour la même raison, d'autres voies telle celle que nous allons maintenant examiner, où l'on tente d'utiliser la qualité de l'aimantation, sont *a priori* coupées.

C. *Méthodes utilisant le champ coercitif.*

On pourrait penser que la « résistance » d'une aimantation, représentée par son champ coercitif, dépend de l'intensité du champ qui l'a provoquée qu'il s'agisse de thermorémanence, d'aimantation par dépôt ou par cristallisation. Le champ coercitif étant une grandeur facilement accessible, et sans recuit, n'y aurait-il pas possibilité de déduire de sa mesure une mesure de l'intensité du champ créateur ?

On trouve cette idée dans une intéressante étude de O. ALTHAUSEN [4] portant sur des magnétites naturelles. L'auteur étudie d'abord la variation, en fonction du champ magnétisant, des rémanences A. R. I. et A. T. R. ; puis il détermine la variation du champ coercitif en fonction du champ magnétisant pour ces deux types d'aimantation [fig. 4, p. 390]. Sa conclusion est qu'en déterminant le champ coercitif de l'aimantation naturelle, supposée d'origine A. T. R., on pourrait en déduire la valeur du champ l'ayant provoquée. Mais encore faut-il tracer pour chaque objet la courbe donnant le champ coercitif en fonction du champ magnétisant et il faut alors des recuits pour provoquer successivement des A. T. R. dans des champs connus. L'auteur le souligne et il indique d'ailleurs que ses magnétites varient minéralogiquement au cours de ces recuits ; les courbes qu'il donne sont tracées pour des échantillons stabilisés, mais elles ne correspondent plus au corps initial qui portait l'aimantation naturelle à étudier. Ainsi la méthode échoue par le fait de l'évolution minéralogique par recuit, comme échoue pour la même raison la méthode, que nous appellerons directe, envisagée aussi par l'auteur, qui consisterait à chercher tout simplement quel est le champ qui provoque une A. T. R. égale à l'aimantation naturelle.

Mais les méthodes utilisant le champ coercitif se heurtent à des difficultés bien plus fondamentales encore. Précisons d'abord ce que nous entendons par champ coercitif. En ferromagnétisme c'est une notion claire : une substance est soumise à des cycles jusqu'à saturation ; ayant fait agir une dernière fois le champ maximum, on diminue le champ agissant puis on l'inverse jusqu'à obtenir, sous la contrainte du champ actuel, une aimantation nulle ⁽¹⁾ ; la valeur du champ réellement agissant réalisant cette condition est le champ coercitif de la matière ; c'est une grandeur caractéristique de cette matière. Une définition analogue pourrait être donnée pour un bloc de roche, et dans ce cas le champ réellement agissant pourrait être confondu avec le champ imposé. Mais en paléomagnétisme, nous l'avons rappelé, on ne s'intéresse pas aux aimantations induites mais seulement aux rémanences mesurées hors de tout champ magnétique. Considérons alors un objet portant un moment rémanent ; on peut appeler champ coercitif (nous préférons souvent dire champ de désaimantation) le champ qu'il faudra faire agir pour que, ce champ étant supprimé, le moment rémanent soit nul. Pour cela, deux procédés s'offrent à nous. Le premier, le plus intéressant, consiste à utiliser un champ alternatif. Comme nous l'avons sommairement rappelé, la valeur de H_{\sim} qui, pour un corps donné ramène la rémanence à zéro, dépend essentiellement du type de l'aimantation. S'il s'agit d'une A. R. I., H_{\sim} est sensiblement égal au champ qui l'a provoquée, indépendamment du corps étudié ; s'il s'agit d'A. T. R. faibles, H_{\sim} est fort, pratiquement indépendant du champ ayant provoqué cette A. T. R.,

(1) Ce pourrait être une induction nulle ; on définirait alors le champ coercitif d'induction.

et il dépend du corps en essais [94, 97]. Ainsi la détermination du champ « coercitif » alternatif n'a d'intérêt pour la mesure des champs magnétisants que dans le cas des A. R. I. ; par exemple, elle est utilisable d'une façon intéressante pour la séparation des aimantations dues à la foudre [97], au moins tant que celles-ci restent relativement faibles ; mais il ne s'agit là, en paléomagnétisme, que d'aimantations parasites. Le second procédé consiste à attaquer l'aimantation à étudier par un champ continu appliqué en sens opposé de cette aimantation, en faisant croître dans des essais successifs l'intensité de ce champ jusqu'à l'obtention d'un moment nul. Une telle étude a été faite depuis longtemps par l'un de nous sur des terres cuites [112] et elle a été poursuivie sur différents corps de synthèse et naturels [99]. Le fait essentiel dans un tel essai est que le champ continu, d'une part diminue l'aimantation initiale à laquelle il s'oppose, et d'autre part aimante le corps suivant la loi habituelle d'aimantation A. R. I. Si l'aimantation initiale est relativement dure, telle une A. T. R., la première action peut être négligeable ; tout se passe comme si le corps gardait immuablement son aimantation initiale tout en acquérant une A. R. I. opposée et pratiquement indépendante de l'aimantation dure initiale. Quand on atteint un moment nul, il ne s'agit pas du tout de désaimantation, mais de la superposition de deux aimantations autonomes, égales et opposées, tellement que si on continue à faire croître le champ imposé, l'aimantation devient négative et continue à croître comme une A. R. I. Ainsi le champ H_c qui a amené le moment à zéro est tout simplement l'abscisse, qu'il faut chercher sur la courbe d'A. R. I. : $\sigma_r = f(H)$, correspondant à l'ordonnée égale à l'aimantation initiale. Ce champ H_c ne qualifie pas la dureté magnétique de l'aimantation initiale, il dépend avant tout de la capacité du corps à acquérir des A. R. I. et il ne peut en aucune façon mesurer le champ ayant provoqué, par exemple, une A. T. R. à l'origine. Ces remarques s'appliquent aux courbes de « désaimantation » de sédiments de JOHNSON, MURPHY et TORRESON [58, fig. 7 et 8] qui ne sont que des courbes d'A. R. I. en quelque sorte à l'envers. La même remarque vaut pour la courbe de J. W. GRAHAM relative à une diabase précambrienne [37].

D. Méthode directe dans le cas de la thermorémanence.

Cette méthode, que nous avons évoquée incidemment à propos d'un travail de O. ALTHAUSEN, ne s'applique qu'aux aimantations thermorémanentes ; c'est la plus simple qu'on puisse imaginer : ayant mesuré le moment magnétique naturel d'un corps porteur d'A. T. R., on le désaimante en le portant à son point de CURIE le plus élevé et on cherche quelle est l'intensité du champ qui provoque une A. T. R. égale à l'aimantation initiale mesurée. Pratiquement, on peut admettre la proportionnalité au champ magnétisant ; on mesure M_0 , moment naturel, supposé tel

qu'il a été acquis jadis dans le champ ancien F_0 , et le moment M acquis au laboratoire dans un champ connu F ; on a $\frac{F_0}{F} = \frac{M_0}{M}$. Cette méthode, que nous avons proposée et utilisée dès 1937 [110, 111], se heurte évidemment aux objections rencontrées pour d'autres : évolution minéralogique dans le temps, aimantations parasites, évolution minéralogique par recuit. En réalité nous l'avons pratiquement réservée aux terres cuites, beaucoup moins sensibles à ces effets, mais surtout l'originalité de notre procédé vient des aménagements, des complications si l'on veut, que nous avons apportés à la méthode de principe pour essayer d'échapper aux objections précédentes. La technique que nous avons affinée peu à peu, comme nous allons l'exposer, est finalement d'une application très laborieuse, mais la cohérence des résultats obtenus nous paraît être le garant de sa sûreté.

Sous sa forme brute, l'idée n'était pas nouvelle. Elle avait été très nettement suggérée par FOLGHERAITER [35] qui écrivait en 1899 : « on pourrait ainsi arriver à quelque conclusion sur l'intensité du champ terrestre en recuisant des vases anciens et en comparant les intensités de magnétisation acquises, ancienne et actuelle ; mais des mesures sur les vases cuits et recuits à plusieurs reprises m'ont montré que cette méthode conduirait à des résultats trop incertains ». Plus récemment elle a été appliquée sommairement à des roches volcaniques. Par exemple, T. NAGATA [77] trouve pour une lave récente (- juillet 1940) des valeurs F_0 voisines de celle du champ actuel au lieu considéré 0,45 Oe ; d'après les quatre échantillons communs à ses tableaux II et IV, on a pour F_0 : 0,47 ; 0,58 ; 0,40 et 0,43 Oe. D'après J. M. BRUCKSHAW, J. HOSPERS aurait trouvé, pour deux laves islandaises récentes, $M/M_0 = 0,90$ [11] ; J. W. GRAHAM [37] chauffant des diabases précambriennes arrive à un rapport de l'ordre de 10 entre l'aimantation nouvelle et l'ancienne (d'ailleurs inverse). De son côté, T. HATHERTON [48, 49] étudiant des rhyolites pliocènes de Nouvelle-Zélande obtient sur 12 échantillons, des valeurs M/M_0 dispersées entre 1,2 et 1,05 ; mais il hésite à conclure que le champ, au lieu considéré, à l'époque de l'épanchement, avait une intensité légèrement inférieure à l'actuelle.

III. ESSAIS QUANTITATIFS

ELABORATION PROGRESSIVE D'UNE MÉTHODE DE MESURE.

Nous avons consacré de longs et minutieux efforts à la recherche de l'intensité du champ terrestre passé en utilisant la méthode que nous venons d'appeler directe. Pour des raisons que nous avons indiquées, notre étude a, jusqu'ici, porté principalement mais pas exclusivement cependant, sur les terres cuites et, à un autre point de vue, sur la période historique. Nos premiers essais, que nous allons décrire dans l'ordre presque chronologique, ont d'abord été des vérifications des

possibilités de la méthode ; puis nous avons recherché des résultats dont un petit nombre seulement ont été publiés ; des défauts nous apparaissant encore, nous avons progressivement compliqué notre technique pour les éliminer, et nous tentons maintenant d'accumuler des déterminations de F_0 pour des époques variées.

A. Premières indications sur les possibilités de la méthode directe ; premières recommandations.

Dans la courte note de 1937 exposant cette méthode [110], d'une part il était proposé de travailler sur des objets de masse relativement importante dont on mesurerait les moments magnétiques globaux (au moyen d'un appareil d'induction) ; d'autre part, une vérification de la stabilité minéralogique par réchauffement était recommandée, conduite de la façon suivante. Le moment thermorémanent M' acquis après un recuit de quelques heures à 670° suivi d'un refroidissement dans le champ F du laboratoire, étant mesuré (à la température ordinaire) on reprend un nouveau recuit à 670° dans le même champ ; M'' était le moment thermorémanent correspondant, l'essai n'est conservé que si M' et M'' sont égaux à l'indétermination des mesures près. Strictement, cette condition nécessaire de stabilité n'est pas suffisante, la transformation des minéraux pouvant être totale immédiatement ; mais, le premier recuit étant bref, la probabilité pour que la modification minéralogique soit terminée dans un temps aussi court, est faible ; l'expérience montre bien que cette évolution, lorsqu'elle existe, peut se poursuivre durant plusieurs recuits ; nous l'avons signalé à propos des roches.

Pour une raison banale (nous ne disposions pas d'un four de volume suffisant) les premiers essais furent effectués sur des cylindres (diamètre de l'ordre de 18 mm, longueur 70 mm) extraits de briques, les mesures étant faites au moyen du magnétomètre décrit dans une publication postérieure [112]. Nous savions que des mesures magnétométriques sur les corps hétérogènes ne peuvent pas être précises ; cependant nous faisons observer [111] qu'étant donné qu'il s'agissait de déterminer un rapport entre deux aimantations longitudinales, les erreurs se trouvaient atténuées. L'aimantation transversale, que notre méthode de mesure élimine quand elle est uniforme, pouvait être cause d'erreur par sa non uniformité ; nous atténuons son effet en opérant les deux recuits successifs avec renversement de sens du cylindre ; de fait, nous faisons trois recuits : direct, inverse, direct, les deux extrêmes permettant le contrôle de la stabilité minéralogique. Ces essais, qui représentaient déjà une masse importante de mesures, ont porté sur les objets suivants :

- 6 cylindres extraits de trois briques récentes,
- 6 cylindres extraits de deux briques datant de 1750,
- 8 cylindres extraits de briques ou tuiles gallo-romaines.

Les résultats détaillés, relatifs à chaque cylindre, ont été donnés et discutés dans la note déjà citée [111], et ils ont été résumés dans un long travail ultérieur [112, § 94]. En ce qui concerne les briques modernes, quatre des cylindres présentaient une excellente stabilité minéralogique par recuit (changements inférieurs à 3 % pour les thermorémanences et à 5 % pour les susceptibilités), et ils donnaient pour valeur de F_0 , au lieu de cuisson :

0,470 0,460 0,480 0,475 Oe

l'intensité en ce lieu (Gaillefontaine, Seine-Maritime) devant être d'après les cartes magnétiques de 0,463 Oe à cette époque. Les deux autres cylindres avaient varié beaucoup plus (jusqu'à 10 % pour la rémanence et 35 % pour la susceptibilité), mais conduisaient à des valeurs encore raisonnables de F_0 : 0,500 et 0,495 Oe. Les résultats correspondant aux briques plus anciennes étaient cohérents et nous incitaient, dès ce moment-là, à penser que l'intensité du champ terrestre, en France, était plus élevée à l'époque gallo-romaine qu'aujourd'hui.

Tout en nous défendant de voir dans ces essais une mesure précise de l'intensité du champ passé, nous retenons l'intérêt de la méthode et nous nous organisons pour améliorer nos essais.

Notre premier soin fut d'abandonner effectivement toute mesure au magnétomètre. Dans tous les essais ultérieurs, les mesures seront faites exclusivement au moyen de notre inductomètre [112, §§ 19 à 33] à champ uniforme dans un grand volume, ce qui supprime tout *effet d'hétérogénéité* dans la répartition du moment magnétique à l'intérieur de l'objet étudié. Une autre prescription a toujours été suivie, celle de n'utiliser que des matériaux relativement peu magnétiques de façon à éviter les *effets du champ démagnétisant*, conséquence de la forme de l'ensemble de l'objet et de son aimantation globale. En premier lieu, et surtout, ce champ démagnétisant entraîne tout au long des refroidissements, originel ou expérimental, une différence (en chaque point de l'objet) entre le champ réellement agissant qui provoque l'acquisition de la thermorémanence et le champ extérieur, F_0 ou F , que nous considérons. De fait, l'erreur qui peut en résulter sur notre détermination de F_0 ne provient que de la différence des formes, et de l'orientation du champ par rapport à ces formes, au cours du refroidissement « naturel » où l'objet est en place dans un ensemble ayant sa forme propre et au refroidissement d'étude, au laboratoire, où il est isolé avec sa forme à lui. Dans les deux cas, le champ démagnétisant varie au cours du refroidissement ; il est, en effet, proportionnel à l'aimantation moyenne instantanée qui inclut l'aimantation rémanente déjà acquise et à l'aimantation induite, dont les valeurs sont fonction de la température. L'ensemble des phénomènes est ainsi assez compliqué, mais on peut évaluer des ordres de grandeur. D'après les faits observés, ou d'après la théorie de NÉEL, on est en droit de considérer que l'aimantation I_t qui existait à une température t

quelconque, durant l'un des refroidissements, a pour ordre de grandeur l'intensité I de l'A. T. R. mesurée finalement à la température ordinaire. D'autre part, on sait que le champ démagnétisant à tout moment a pour limite supérieure $4\pi I$. Ainsi, le trouble apporté aux champs extérieurs F_0 dans le refroidissement originel ou F dans le refroidissement d'étude, ne dépasse pas $4\pi I$, I étant l'aimantation thermorémanente correspondante finalement observée. En définitive l'erreur à craindre sur la valeur F_0 que l'on cherche, nulle si les formes de la masse à laquelle appartenait l'objet durant sa cuisson et de l'objet isolé durant son recuit étaient les mêmes, a pour borne très supérieure $4\pi I$, en prenant pour I la plus forte des deux thermorémanences mesurées, naturelle ou provoquée. Ainsi si l'on voulait atteindre une précision du milli-Oersted sur F_0 il faudrait que la borne $4\pi I$ ne dépassât pas beaucoup cette valeur, ce qui donne un ordre de grandeur de 10^{-4} u. e. m. pour I , et de $3 \cdot 10^{-4}$ pour σ (aimantation rapportée au gramme). Nous ne pouvons pas dire que nous rejetons tout matériau dont l'intensité d'aimantation dépasse cette valeur, mais c'est l'ordre de grandeur de nos aimantations habituelles. Considéré à la température ordinaire, l'objet continue à être soumis à un champ démagnétisant de forme dû à son aimantation rémanente. Ce champ, qu'il entraîne avec lui quand nous le manipulons, provoque une aimantation induite, si l'on peut dire permanente, s'ajoutant géométriquement à l'A. T. R. soit naturelle soit provoquée. Cet effet n'a de conséquences dans notre détermination de F_0 , où les moments interviennent par leur rapport, que dans la mesure où les aimantations naturelle et provoquée ont des directions différentes par rapport à l'objet, correspondant à des champs démagnétisants différents. Il est facile de voir que si la condition d'aimantations très faibles est satisfaite, le rapport Q défini antérieurement étant d'autre part souvent supérieur à l'unité, l'erreur à prévoir sur F_0 est insignifiante.

En ce qui concerne l'aimantation induite par le champ terrestre dans lequel on déplace l'objet au cours des mesures (si l'inductomètre ne comporte pas un dispositif annulant ce champ), elle se trouve éliminée dans nos déterminations de moments qui ont lieu par retournement de l'objet : le moment permanent est renversé mais le moment induit, par le champ extérieur fixe, est constant. Reste la possibilité d'une aimantation visqueuse (A. R. V.) par ce champ ; nous l'examinerons plus loin.

B. Première vérification précise de la méthode ; nouvelles recommandations.

Dès que nous pûmes disposer d'un grand four amagnétique ⁽¹⁾ permettant de recuire en champ soigneusement mesuré des objets relativement volumineux,

(1) Nos fours sont électriques, mais dès l'origine nous avons veillé à ce que le champ alternatif dû au courant de chauffage soit constamment compensé à l'emplacement des objets, pour éviter tout effet de désaimantation et aussi d'aimantation anhystérique (112, § 37). D'autre part, une circulation gazeuse peut être entretenue dans la chambre de chauffe, par exemple une circulation lente d'azote purifié.

nous tentâmes un essai de vérification portant sur un lot important d'objets, des briques prélevées sur un four de campagne et utilisées entières. Cet essai a été décrit dans une courte note [114]. Nous en rappellerons plus loin les résultats en conclusion ; auparavant, nous insisterons sur d'importants problèmes que nous avons rencontrés à ce moment là et qui gardent un intérêt permanent. Nous les traiterons ici dans tous leurs développements de manière à ne pas avoir à y revenir ultérieurement.

Dès le début de ces essais de vérification, en 1939, nous avons une connaissance expérimentale précise des lois quantitatives de l'acquisition de l'A. T. R., des variations réversibles de cette aimantation en fonction de la température, des propriétés de l'aimantation visqueuse. Une partie seulement des faits établis par nous avait été exposée dans un long mémoire [112] écrit en 1937, et ultérieurement, nous avons consacré deux courtes notes, l'une à la variation thermique réversible des moments thermorémanents [119], l'autre aux lois de la thermorémanence [113]. Utilisant tous les faits acquis, nous avons précisé deux nouvelles recommandations qui sont restées depuis absolument impératives pour nous.

La première concerne l'élimination approchée de l'effet d'aimantation visqueuse. On sait que tout matériau resté en place après refroidissement dans le champ terrestre continue à acquérir l'A. R. V. progressivement. Des échantillons étant prélevés, cette A. R. V. est modifiée par le champ terrestre, pendant leur transport jusqu'au laboratoire, durant lequel d'ailleurs des champs relativement forts peuvent accidentellement agir, surtout dans le cas de transports par train électrique ou par automobile. Il en est de même pendant la mesure des moments magnétiques durant laquelle les objets se trouvent déplacés dans le champ terrestre. Aussi, dans toutes nos études sur la direction du champ fossile respectons-nous toujours la règle suivante, valable aussi *a priori* pour la recherche de l'intensité. A leur arrivée au laboratoire, les échantillons sont rangés de telle façon qu'ils se trouvent dans une position analogue, par rapport au champ terrestre, à celle qu'ils occupaient sur le terrain, et ils sont abandonnés ainsi pendant un temps de l'ordre d'une quinzaine de jours. Il s'ensuit que l'aimantation visqueuse est pratiquement reconstituée, l'aimantation totale étant ramenée à ce qu'elle était sur le terrain, somme géométrique de l'aimantation A. T. R. intéressante et de l'A. R. V. parasite. La mesure des moments magnétiques (trois composantes suivant trois directions rectangulaires repérées sur l'objet) est alors exécutée. Puis les objets sont abandonnés pendant un temps au moins égal dans une position inversée par rapport au champ terrestre, c'est-à-dire après renversement de 180° autour d'un axe Est-Ouest magnétique par rapport à la position primitive, et une nouvelle mesure est conduite, analogue à la première. Le champ terrestre agissant pendant le deuxième séjour en sens inverse de l'aimantation visqueuse en détruit la partie principale et crée une A. R. V. suivant sa nouvelle direction. Il est évident que cette aimantation est inférieure

à l'A. R. V. prise sur le terrain en un temps qui peut être très long ; mais à cause de sa loi en $\log t$, elle en représente une fraction importante et lorsqu'on prend pour chaque composante du moment magnétique, la moyenne des deux valeurs mesurées, on élimine ainsi la partie principale de l'A. R. V. accumulée. Cette correction est suffisante si l'A. R. V., de quinze jours en quelque sorte, est, comme il est de règle pour les terres cuites, relativement très faible, disons de l'ordre de pourcent de l'A. T. R. produite par un champ égal. S'il n'en est pas franchement ainsi, ce que nous apprend l'essai précédent (en observant les différences des deux moments mesurés), nous rejetons de notre étude les objets correspondants.

De fait, pendant la mesure des composantes d'un moment magnétique, des actions ont lieu qui pourraient paraître bien inquiétantes. Sous l'effet du champ terrestre dans lequel l'objet est déplacé dans tous les sens, une partie de l'A. R. V. est détruite et des A. R. V., acquises dans des temps très brefs, apparaissent. Nous considérons que tout cela revient, pratiquement, à détruire la partie très douce des A. R. V. accumulées et la complexité réelle du phénomène est sans conséquence appréciable si l'on s'astreint à conduire les deux mesures, correspondant à chaque objet, de la même façon, c'est-à-dire avec le même ordre dans la mesure des composantes et approximativement le même rythme. Nous veillons autant que possible à ce qu'il en soit ainsi. Il serait mieux évidemment de laisser reposer les objets en champ nul pendant un certain temps, puis de conduire toute la mesure dans les mêmes conditions. Nous attendons la construction d'une grande salle à champ compensé qui nous donnera cette possibilité.

Cet essai à deux mesures avec inversion, à la fois correctif et test de qualité, et vieux pour nous de vingt ans, s'est répandu ces dernières années parmi les géomagnéticiens s'intéressant à la direction d'aimantation des roches et il sert de test d'élimination des échantillons, qualifiés « instables » lorsque la différence observée entre les deux mesures du moment est assez forte. Nous avons remarqué que ce test de stabilité était parfois mal interprété, certains auteurs observant les changements de la direction et non de la valeur du moment. Il est bien évident que si l'aimantation permanente est dirigée à peu près suivant le champ terrestre actuel, les moments permanents et visqueux s'ajoutent algébriquement sans réagir sur la direction du moment total. C'est le changement dans la valeur du moment qui seul indique clairement la sensibilité du corps à l'aimantation visqueuse.

Nous avons déjà donné des exemples de mesures, objet par objet, des trois composantes des moments magnétiques après les séjours « direct » et « inverse » dans le champ du laboratoire : pour des échantillons d'andésite de Volvic, roche peu visqueuse, et pour des basaltes altérés, très visqueux [124] et aussi pour des ophites pyrénéennes [106]. Roches ou terres cuites, tous les corps que nous avons étudiés ont toujours révélé une A. R. V. décelable et, mieux, le rapport des effets moyens provoqués par la composante verticale et par la composante horizontale, bien

qu'il s'agisse de différences souvent très petites, fournit une mesure approchée de la tangente de l'inclinaison I' du champ terrestre dans le laboratoire. Cet accord est pour nous un test de validité de nos raisonnements sur l'aimantation visqueuse et une preuve de l'exactitude de nos mesures qui nous permet de parler de direction d'aimantation au demi-degré près et de leur intensité au pour-cent près.

Il peut être utile de connaître l'ordre de grandeur des effets visqueux courants. Pour un objet donné, qualifions la viscosité relative par $\Delta M/M$, M étant le moment permanent naturel de l'objet et ΔM l'apport visqueux dû au champ terrestre agissant pendant un temps de l'ordre de deux semaines : ΔM correspond ainsi à la moitié de la différence observée entre les deux mesures. Des nombreuses déterminations que nous avons effectuées, tant pour la recherche de la direction du champ terrestre (sur des roches et surtout sur des parois de fours) que pour celle de son intensité, extrayons les valeurs suivantes qui sont des moyennes pour chaque lot comportant un nombre n d'échantillons. Les quatre premières lignes du tableau 4 correspondent à des mesures ayant donné lieu à des publications [121, 124] ; les autres correspondent à des résultats non publiés jusqu'ici.

Dans chaque série, la dispersion des valeurs individuelles $\Delta M/M$ peut être forte, par exemple de 0,65 à 1,9 % pour le four de SPEICHER, entre 2,7 et 16,2 % pour les argiles métamorphiques ; en général, le trainage relatif est d'autant plus faible que les aimantations sont plus fortes.

On peut nous objecter que notre indice de trainage est mal défini, la durée de l'action du champ dont nous disons mesurer l'effet étant indéterminée à l'origine puisque nous admettons que la partie douce de l'aimantation visqueuse, acquise pendant les premières minutes, est disloquée par déplacement dans le champ terrestre. C'est exact et nous ne pouvons pas dire si l'acquisition d'aimantation que nous observons correspond au trainage entre, par exemple une minute et quinze jours ou 10 minutes et quinze jours, c'est-à-dire si elle correspond à une différence en $\log t$ de 4,33 ou de 3,33. On pourra être plus précis en effectuant des mesures en champ compensé ; mais étant donné que nous ne retenons que des objets à très faible trainage, cette indétermination n'est pas grave. Si ΔM est l'accroissement observé, il serait $2 \Delta M$ après 900 ans, $3 \Delta M$ après 20 millions d'années... dans la première hypothèse, et $2 \Delta M$ après 90 ans, $3 \Delta M$ après 200 000 ans, $4 \Delta M$ après 400 millions d'années dans la seconde hypothèse. La quantité mesurée donne donc bien une indication sur l'importance de l'effet parasite possible.

La seconde recommandation concerne l'élimination de l'effet de variation réversible des moments rémanents. Étant donné une roche ou une terre cuite portant une thermorémanence totale, à la température ordinaire, on sait qu'une élévation de température provoque une diminution irréversible du moment, acquise d'ailleurs du premier coup ; inversement un abaissement de température en champ magnétique provoque une acquisition supplémentaire d'aimantation, ces deux phéno-

TABLEAU 4

INDICE DE VISCOSITÉ MAGNÉTIQUE DE ROCHES ET DE TERRES CUITES

NATURE DES ÉCHANTILLONS	<i>n</i>	$\frac{\Delta M}{M}$ en %
Andésite de Volvic (Auvergne) : quaternaire supérieur.....	20	0,6
Basalte de Chanat (Auvergne) : quaternaire moyen	3	13
Basalte de Chateaugay (Auvergne) : miocène	3	8
Paroi de four romain (Speicher, près de Trèves)	13	1,2
Tuiles romaines (Augst, près de Bâle)	4	1,5
Paroi de four carolingien (Valberberg, près de Bonn)	13	0,2
Paroi de four romain (Asberg, près de Cologne)	4	0,5
Paroi de four romain (Neusz, près de Dusseldorf)	11	0,8
Paroi de four romain (Grimstone End, Suffolk)	10	0,5
Paroi de four romain (Canterbury, Kent)	11	0,6
Paroi de four romain (West Stow Heath, Suffolk)	9	2,0
Paroi de four romain (Grundle farm, Suffolk)	4	4,6
Argiles métamorphiques d'Auvergne.....	9	6

mènes obéissant aux lois de la thermorémanence. Mais indépendamment de cela, la valeur du moment magnétique thermorémanent subit une variation réversible en fonction de la température, qu'on peut mesurer directement. Pour cela l'objet porteur d'une A. T. R. ayant été préalablement chauffé à une température modérée mais supérieure à toutes celles auxquelles on se propose de le soumettre (on se débarrasse ainsi de la perte irréversible), on mesure son moment magnétique, hors de tout champ magnétique. On observe une variation du moment rémanent analogue à celle qui correspond à un aimant « vieilli », c'est-à-dire qu'on a, en première approximation : $M_t = M [1 - a(t-20)]$, M_t valeur du moment à t° C et M à 20° C, a est le coefficient de température de la rémanence. Le phénomène est attendu, c'est une conséquence de la variation thermique de l'aimantation spontanée, mais nous avons été surpris par son ampleur telle que des différences de température de quelques degrés entraînent des variations appréciables des moments. Nous avons déterminé les coefficients a pour un grand nombre d'objets, généralement des terres cuites, ne serait-ce que pour faire des corrections ramenant tous les moments à la même température. Par exemple, pour les 10 briques du Caule Ste-Beuve nous avons trouvé [419] des valeurs de a dispersées entre $2,8 \cdot 10^{-3}$ et $6,0 \cdot 10^{-3}$, avec une valeur moyenne $3,6 \cdot 10^{-3}$ soit $1/280$, ce qui est de l'ordre de grandeur du coefficient de dilatation des gaz, très supérieur aux coefficients de température des aimants permanents. Il peut être intéressant de remarquer que l'acquisition de thermorémanence par abaissement de température de 1° , dans le

champ terrestre (et en même temps la perte irréversible par élévation de 1°) est nettement plus faible que a pour ces corps, $1/1340$ en moyenne, autour de la température ordinaire. Ces résultats ne semblent pas avoir retenu l'attention des paléomagnéticiens, peut-être parce que, souvent, leurs mesures sont trop peu fidèles pour permettre de déceler cet effet thermique. D'ailleurs, dans beaucoup de recherches paléomagnétiques, la valeur des moments magnétiques n'est pas véritablement mesurée parce qu'on ne s'intéresse qu'à leur direction. Dans des recherches sur l'intensité, il n'est pas permis de négliger cet effet.

En ce qui nous concerne, nous prenions soin de déterminer la température des objets dans les mesures de moment magnétique. Mais, étant donné que la détermination des coefficients (qu'il faut faire pour chaque objet) est longue, fastidieuse, et quelque peu imprécise, nous l'évitons maintenant en travaillant à température constante : notre laboratoire du Parc St-Maur, où nous conservons les objets à examiner et où nous effectuons les mesures, est thermostaté, en principe à 20° C. L'intérêt est double : nous n'avons pas ainsi à effectuer de correction de variation réversible des moments, et les aimantations thermorémanentes que nous provoquons jusqu'à la température ordinaire correspondent à une température limite bien définie.

Revenons maintenant aux conclusions de notre vérification de la méthode directe de recherche de l'intensité. Notre essai avait porté sur dix briques récentes, prélevées par nous-mêmes sur un four de campagne, au Caule-Ste-Beuve, encore en Seine-Maritime. Le tableau des résultats de mesures que nous avons donné [114, p. 282] montre que le trainage magnétique est faible : son effet est inférieur aux erreurs que peut entraîner l'approximation des corrections de température. De la même façon l'évolution minéralogique par recuit, jugée, comme il a été dit, par la seule comparaison des moments thermorémanents acquis dans les mêmes conditions entre deux recuits successifs, est aussi très faible. Compte tenu de la valeur du champ existant dans le laboratoire à l'emplacement du four, nous étions conduits à admettre pour le champ originel F_0 la valeur $0,456$ Oe, alors que les mesures du réseau magnétique français conduisaient à $0,464$ Oe. Étant donné la légère indétermination du premier nombre venant de l'approximation des corrections de température, et l'erreur possible sur le second qui ne résulte pas d'une mesure directe, nous pouvions conclure à un excellent accord, c'est-à-dire à la possibilité de retrouver l'intensité du champ qui existait là où les briques avaient été cuites.

Remarquons maintenant qu'il est une cause d'erreur dont nous n'avons pas tenu compte et dont la correction aurait joué dans le sens qui rapproche encore les deux nombres. En effet, si les moments magnétiques thermorémanents provoqués au laboratoire correspondent bien à une thermorémanence acquise entre le point de CURIE et 20° , l'aimantation naturelle, elle, a été légèrement modifiée par les réchauffements incessants dus aux variations de la température extérieure que

subissent les objets après leur sortie du four, alors qu'ils sont dans des positions quelconques par rapport au champ terrestre. Un réchauffement de t_1 à t_2 provoque une diminution ΔM du moment thermorémanent ; par refroidissement de t_2 à t_1 dans un champ d'intensité égale à celle du champ originel, il apparaît une thermorémanence ΔM qui reconstitue le moment primitif si l'objet est resté dans sa position de cuisson. Mais ΔM peut être opposé à l'aimantation originelle ce qui réduit alors celle-ci de $2 \Delta M$, ou à angle droit ce qui ne change pratiquement pas la valeur de la résultante, réduite ainsi de ΔM . On conçoit facilement que quelle que soit la complexité des changements de température subis par l'échantillon observé, son moment initial est nécessairement réduit. Certes, cette réduction est faible si la température maximum atteinte reste modérée, mais elle n'est pas négligeable. Par exemple, pour les briques du Caule-Ste-Beuve pour lesquelles la variation relative du moment est de l'ordre de $3/4000$ par degré, un réchauffement ayant atteint 40°C entraîne une diminution de l'ordre de 1 %.

Dans tous les essais qui suivent nous lutterons contre *cet effet des variations de la température ordinaire* par une sorte de « nettoyage » des aimantations destinée à supprimer les thermorémanences acquises au voisinage de cette température ordinaire.

C. Premiers résultats pour l'époque historique ; nouvelle prescription.

Pour nos premiers essais de recherche véritable de l'intensité du champ à des époques antérieures à celle des mesures directes, nous choisîmes quelques lots de briques, provenant de monuments historiques français, que nous avons déjà utilisés dans des recherches sur l'inclinaison magnétique [112, § 84]. Ces briques étaient bien datées et recueillies dans des parties de chaque construction réputées non incendiées.

En ce qui concerne le nettoyage des aimantations, nous adoptâmes alors 60° pour seuil de température, c'est-à-dire que nous nous débarrassâmes de toute aimantation thermorémanente acquise au-dessous de 60° . Nos mesures furent conduites de la façon suivante sur chacun des objets de chaque lot, les différents lots correspondant à des époques différentes étant évidemment considérés indépendamment.

— Ayant déterminé le moment magnétique « naturel » M à 20° (moment qui ne servira pas directement à la détermination de l'intensité), nous chauffons la brique à 60° et la laissons refroidir dans le champ terrestre du laboratoire, dans une position connue. Après un séjour de un ou deux jours dans la même position assurant le retour à 20° , on mesure le moment de l'objet soit M_1 . D'après les lois de la thermorémanence, ce moment est la résultante de deux composantes :

le moment initial, acquis dans le champ F_0 mais limité à 60° , $M_{(670^\circ, F_0, 60^\circ)}$ c'est-à-dire le moment qu'aurait acquis l'objet dans le four où il a été cuit à l'origine,

si, au cours du refroidissement, on avait pu supprimer le champ terrestre à partir de 60° ;

le moment acquis dans le champ F du laboratoire entre 60° et 20° , $M'_{(60^\circ, F, 20^\circ)}$; ce moment est d'ailleurs augmenté de l'A. R. V. acquise dans le même champ F pendant les jours précédant la mesure.

— Puis on chauffe à nouveau la brique à 60° dans une position inversée par rapport à la première dans le champ terrestre. Pratiquement, ayant choisi trois directions rectangulaires xx' , yy' , zz' , perpendiculaires aux faces de l'objet, on dirige dans le premier essai x suivant H et z suivant Z par exemple, et dans le second x' suivant H et z' suivant Z , c'est-à-dire qu'on a effectué une rotation de 180° autour de yy' . Nous avons déjà rencontré un « renversement dans le champ terrestre » mais il s'agissait d'une opération à température constante, celle du laboratoire, pour étudier un effet de temps ; ici il s'agit d'acquisition d'A. T. R. dans un intervalle donné de température. Après refroidissement à 20° dans le champ terrestre, on mesure le nouveau moment M_2 , tout étant conduit comme pour M_1 . Le moment M_2 est maintenant la résultante :

du moment ancien restant, $M_{(670^\circ, F_0, 60^\circ)}$, qu'un nouveau chauffage à 60° n'a pas changé

du moment — $M'_{(60^\circ, F, 20^\circ)}$.

La demi-somme des deux vecteurs M_1 et M_2 donne $M_{(670^\circ, F_0, 60^\circ)}$, et leur demi-différence représente $M'_{(60^\circ, F, 20^\circ)}$, moment thermorémanent nouveau accompagné du trainage récent. Pratiquement, on fait évidemment la demi-somme algébrique des deux composantes de M_1 et de M_2 suivant chacun des 3 axes, ce qui donne les composantes du 1^{er} vecteur, les demi-différences donnant le second vecteur. La différence suivant yy' est nulle dans l'hypothèse que nous avons faite ; les différences suivant xx' et zz' sont respectivement proportionnelles à H et Z , composantes de F dans le laboratoire, et ici encore, leur rapport doit donner une valeur approchée de $\tan I$, I étant l'inclinaison magnétique dans le laboratoire.

Remarquons que grâce au recuit à 60° qui détruit une bonne part de l'A. R. V. [88], et grâce à l'inversion de position au cours des séjours dans le champ terrestre, le moment $M_{(670^\circ, F_0, 60^\circ)}$ est pratiquement débarrassé de l'effet de trainage. Dans ces conditions on peut, si l'on veut gagner du temps, se dispenser complètement de la mesure des moments « naturels » à 20° ou au moins se contenter d'une seule mesure sans inversion.

Remarquons encore que l'on pourrait obtenir directement $M_{(670^\circ, F_0, 60^\circ)}$ par un seul recuit à 60° suivi d'un refroidissement en champ nul. Nous préférons la double opération, d'une part parce qu'il est difficile de maintenir longtemps une intensité bien constante dans des bobines de compensation du champ terrestre, d'autre part parce qu'il est intéressant de connaître l'A. T. R. « basse » $M'_{(60^\circ, F, 20^\circ)}$.

Remarquons enfin que dans le cas de la recherche de la *direction* du champ

ancien, les composantes du moment réduit, nettoyé ainsi de toutes les perturbations occasionnées par les désaimantations et réaimantations dues aux variations de température de tous les jours, permettent une détermination plus précise de cette direction.

Les opérations qui précèdent donnent le moment ancien réduit $M_{(670^\circ, F, 60^\circ)}$; il faut déterminer le moment correspondant $M'_{(670^\circ, F, 60^\circ)}$ acquis par l'objet recuit à 670° et refroidi dans le champ F connu du laboratoire. Comme précédemment on pourrait obtenir directement ce moment en supprimant le champ F au refroidissement à partir de 60° . De fait, nous conduisons l'opération de manière à déterminer encore $M'_{(60^\circ, F, 20^\circ)}$. Pour cela, la brique étant recuite à 670° , en atmosphère neutre (courant d'azote purifié), nous la laissons refroidir dans le champ F complètement, c'est-à-dire jusqu'à 20° et nous mesurons le moment total soit M'_1 . Il est bien évident que si nous recuisions la brique à 60° dans la position qu'elle occupait par rapport au champ terrestre lors de son recuit à 670° , nous retrouverions M'_1 ; ce moment représente la somme géométrique (devenue ici arithmétique) de $M'_{(670^\circ, F, 60^\circ)}$ et de $M'_{(60^\circ, F, 20^\circ)}$. L'objet est alors recuit à 60° en position inversée; le moment M'_2 mesuré est la somme géométrique des deux mêmes vecteurs (devenue leur différence arithmétique). Comme précédemment, la demi-somme de M'_1 et M'_2 donne l'aimantation haute $M'_{(670^\circ, F, 60^\circ)}$, et leur demi-différence l'aimantation basse $M'_{(60^\circ, F, 20^\circ)}$. Cette dernière se trouve être la même que dans la première opération, conduite sur le moment initial, à condition que le recuit n'ait pas provoqué de modifications minéralogiques. On a donc là un test de stabilité au recuit, mais il faut observer qu'il porte sur des quantités relativement petites et obtenues par différence, donc entachées d'erreurs relatives grandes. Il faut observer encore que ce test ne vaut que pour les minéraux à température de relaxation basse.

Comme précédemment encore, remarquons que le rapport des composantes suivant zz' et xx' du moment « bas » $M'_{(60^\circ, F, 20^\circ)}$ doit donner $\text{tg } I'$; mais ici il en est de même pour les composantes du moment « haut » $M'_{(670^\circ, F, 60^\circ)}$; ces composantes étant fortes, puisqu'elles représentent la partie principale du moment total, l'inclinaison I' doit être trouvée avec plus de précision. Le contrôle des valeurs de I' , qu'on peut ainsi calculer, constitue un nouveau test de la précision des opérations et des mesures.

Enfin, on effectue le test habituel de contrôle minéralogique en recuisant une nouvelle fois à 670° et en mesurant le moment M'' acquis dans le champ F de 670° à 20° ; ce moment doit être égal à M' .

On peut alors, pour chaque objet, calculer

$$\frac{F_0}{F} = \frac{M_{(670^\circ, F, 60^\circ)}}{M'_{(670^\circ, F, 60^\circ)}}$$

et obtenir ainsi une valeur de F_0 pour chacun. Leur composition minéralogique étant variée, ce qui entraîne de grandes différences dans leurs propriétés magné-

tiques globales de l'un à l'autre, si les valeurs individuelles de F_0 sont peu dispersées, la probabilité est grande d'avoir retrouvé la valeur exacte de l'intensité du champ à l'époque de la cuisson des objets. En effet, les causes d'erreurs à envisager : diminution systématique des moments anciens (improbable d'après ce que l'on sait de l'A. T. R., mais qu'on peut toujours envisager), modifications minéralogiques au cours des temps, soit spontanées soit sous l'effet d'intempéries, acquisition d'aimantations A. R. I. dues à des effets de la foudre, modifications minéralogiques lors des recuits, doivent avoir des effets très différents d'un objet à l'autre, provoquant une forte dispersion des valeurs individuelles de F_0 .

C'est suivant ces idées que nous avons étudié trois séries de briques françaises des 15^e et 18^e siècles.

Le premier lot comprenait dix briques provenant du Palais Rihour à Lille et cuites vers 1465. Leurs dimensions sont $25 \times 12 \times 6$ cm environ. Suivant les conseils du Docteur BENOIT, nous les avons recueillies dans un mur du fond de la chapelle, vers l'intérieur, ce qui devait nous mettre à l'abri d'altérations importantes dues aux intempéries. Les résultats de ces essais ont été publiés [120]; dans le tableau que nous avons donné, on trouve pour chacun des dix objets les valeurs des moments suivants, en u. e. m. :

— M , moment initial ou « naturel » mesuré au départ

— M_{60} , moment initial nettoyé par recuit à 60° ; dans notre notation actuelle

c'est $M_{(670^\circ, F_0, 60^\circ)}$

— M' , moment acquis dans le champ F du laboratoire après recuit à 670° ,

c'est-à-dire $M'_{(670^\circ, F, 20^\circ)}$

— M'_{60} , moment précédent après recuit à 60° , soit $M'_{(670^\circ, F, 60^\circ)}$

— M'' , moment acquis dans le champ F avec un second recuit à 670° , c'est-à-dire encore $M'_{(670^\circ, F, 20^\circ)}$, mais correspondant au corps tel qu'il est après ce second recuit.

Nous observons que sur les dix objets, sept pouvaient être considérés comme très satisfaisants : d'une part les valeurs M' et M'' pour chacun s'écartaient de moins de 1 % de leur valeur moyenne ; d'autre part, les rapports M_{60}/M'_{60} donnant F_0/F étaient très peu dispersés, leurs valeurs extrêmes étant 1,20 et 1,23.

Donnons quelques indications supplémentaires sur cette première série d'essais en considérant les moments magnétiques moyens correspondant aux sept objets retenus.

TABLEAU 5

PALAIS RIHOUR (1465). MOMENTS MOYENS DES SEPT ÉCHANTILLONS RETENUS, EN U. E. M.

\bar{M}	$\bar{M}_{(670^\circ, F_0, 60^\circ)}$	$\bar{M}'_{(670^\circ, F, 60^\circ)}$	$\bar{M}'_{(670^\circ, F, 20^\circ)}$	$\bar{M}''_{(670^\circ, F, 20^\circ)}$
0,723	0,696	0,571	0,615	0,618

Les valeurs du tableau 5 montrent bien que l'évolution de la capacité d'aimantation thermorémanente par répétition du recuit à 670° est extrêmement faible, la différence entre les deux moments moyens 0,615 et 0,618 u. e. m. n'étant pas significative. On observe aussi que la diminution de moment par recuit à 60° est plus forte pour l'aimantation nouvelle (0,044) que pour l'aimantation naturelle (0,027). Il s'agit des pertes absolues ; l'effet serait plus marqué encore sur les valeurs relatives qu'il faudrait en réalité considérer. C'est la conséquence attendue des pertes subies par les moments originels et c'est précisément la cause d'erreur contre laquelle nous luttons par l'opération de nettoyage thermique.

En ce qui concerne l'aimantation thermorémanente basse, acquise au laboratoire entre 60° et 20°, on a, en séparant les effets des composantes Z et H du champ F :

$$\bar{M}'_{(60^\circ, Z, 20^\circ)} = 0,032 \qquad \bar{M}'_{(60^\circ, H, 20^\circ)} = 0,015$$

pour le recuit initial portant sur l'aimantation naturelle, et

$$\bar{M}'_{(60^\circ, Z, 20^\circ)} = 0,038 \qquad \bar{M}'_{(60^\circ, H, 20^\circ)} = 0,019$$

pour le recuit de l'aimantation provoquée.

Étant donné l'indétermination des valeurs de ces moments faibles, l'accord est satisfaisant. Avec les mêmes restrictions, le rapport des effets des composantes Z et H dans les deux cas est acceptable ; il diffère peu de tg 69°, correspondant à l'inclinaison du champ dans le four.

Finalement, l'ensemble des résultats relatifs aux briques du Palais Rihour est satisfaisant. Le champ F, dans le four tel qu'il était placé, étant 0,459 Oe, nous pouvions conclure qu'à Lille, au milieu du 15^e siècle, l'intensité F₀ du champ terrestre était très proche de 0,56 Oe, c'est-à-dire nettement supérieure à la valeur actuelle en ce lieu. Notons en passant que l'inclinaison magnétique à Lille, à l'époque de la cuisson des briques, était environ 63°15 d'après nos mesures [112], et qu'elle est actuellement 66° environ.

Il nous reste à justifier l'élimination de trois des objets. Alors que les sept retenus donnaient des valeurs individuelles très peu dispersées pour F₀, ces trois briques, les numéros 2, 6 et 13, auraient conduit à des valeurs complètement aberrantes par rapport à celles-là. Mais, nous avons un autre argument plus direct pour les rejeter, dans le test par répétition du recuit à 670° ; rappelons que pour la brique N° 2, on passe de 4,047 pour M' à 2,708 pour M'', et pour la brique N° 13 de 6,897 à 5,945 en u. e. m. (les moments initiaux étaient respectivement 0,420 et 0,334). Un autre essai confirme encore leur évolution par recuit ; l'aimantation A. R. I. provoquée par un champ de 100 Oe, à la température ordinaire, avait été mesurée pour 8 des objets, incluant les N°s 6 et 13, avant et après le recuit à 670°. Nous savons qu'une telle détermination, surtout faite en présence d'une autre aimantation, n'est pas fidèle et qu'on ne peut pas en attendre un critère

précis de stabilité, mais elle peut être une preuve de gros changements ; dans le cas qui nous intéresse, les A. R. I.₁₀₀ ont été sensiblement les mêmes avant et après le recuit sauf pour l'échantillon 13 où le moment A. R. I. est passé de 0,24 avant recuit à 1,75 après ; pour l'échantillon 6, presque normal à tous points de vue, la variation avait été beaucoup plus modérée, de 0,31 à 0,26 (1).

Ainsi il n'y a donc eu aucun arbitraire dans le choix des cas conservés. Mais on peut se demander pourquoi certains objets subissent de tels changements par recuit alors que les autres, de même provenance, ne sont pas modifiés. Nous devons reconnaître que nous n'avons pas essayé, jusqu'ici, de traiter ce problème chimique et minéralogique ; pour nous, il s'agirait de phénomènes de réduction provoqués, au cours du recuit, par la présence de matières organiques qui ont pu se développer dans certaines de ces briques. En effet, celles considérées ici sont relativement poreuses et, en réalité, n'ont pas toujours été à l'abri des intempéries qui ont pu aider au développement d'algues et de mousses. Les Flandres ont connu beaucoup de combats destructeurs et le Palais Rihour et sa chapelle ont encore été éventrés pendant la guerre mondiale de 1914-1918. Cette hypothèse d'une action réductrice, génératrice de minéraux du type de la magnétite à partir du sesquioxyle de fer, s'accorde bien avec le fait que le changement est plutôt dans le sens d'une exaltation des propriétés magnétiques. C'est de la même façon que nous interpréterons les résultats de l'essai suivant, assez malheureux en ce sens qu'un gros travail a été effectué en pure perte.

Ce second essai portait sur douze briques provenant de la Maison de Tristan à Tours [112]. Leur aspect aurait dû nous décourager ; de teintes très variées, elles étaient fortement patinées et couvertes de matière organique que nous avons enlevée au mieux par grattage et brossage ; de plus, elles contenaient toutes des paillettes jaunes, brillantes, que nous croyons être de la pyrite de fer, ce qui aurait dû aussi nous inquiéter beaucoup *a priori*. L'intérêt essentiel de ces objets pour nous, était qu'ils semblaient bien datés et qu'ils étaient, à quelques années près, contemporains des briques du Palais Rihour ; nous espérions confirmer ainsi les résultats obtenus précédemment, avec des objets d'une provenance très différente.

Les recuits à 60° ne donnèrent lieu à aucune remarque, mais les recuits à 670° provoquèrent tous des phénomènes alarmants : changements de teinte considérables, émanations de fumées abondantes à odeurs parfois très fortes allant jusqu'à celles de l'ail ou du nitrobenzène ; la condensation des vapeurs sur les couvercles en laiton des extrémités (situées hors du four) du cylindre de chauffe altérait ce

(1) A titre simplement indicatif signalons que le moment A. R. I. dû à 100 Oe est 0,52 u. e. m. en moyenne pour les sept échantillons (13 étant omis) ; il se trouve que c'est à peu près exactement la valeur moyenne, 0, 535 u. e. m., de l'aimantation A. T. R. provoquée dans ces échantillons au cours des recuits au laboratoire, c'est-à-dire par un champ de 0,459 Oe. Cette égalité est évidemment fortuite, le champ choisi 100 Oe étant arbitraire, mais elle montre bien la différence des efficacités des mécanismes A. R. I. et A. T. R.

métal donnant naissance à des solutions fortement teintées par des sels de cuivre. De toute évidence, le recuit à 670° provoquait des réactions chimiques importantes et le résultat final ne nous surprit pas beaucoup ; les rapports M'/M étaient fortement dispersés. Nous en restâmes là, sans prendre la peine, incontestablement inutile, de déterminer M'_{60} et M'' . Cet échec constitua pour nous une utile leçon. Désormais nous prîmes grand soin au choix des échantillons à recuire, surtout en ce qui concerne l'imprégnation par des matières organiques et la présence probable, d'après l'apparence, de minéraux formés postérieurement à la cuisson. A ce point de vue, nous avons depuis longtemps pensé à utiliser une sorte de *lavage chimique* des échantillons, conduit de façon à éliminer au départ les matières organiques et ces minéraux formés à froid. Le problème n'est pas simple, mais il faut observer que si ce traitement fait disparaître des minéraux originels, porteurs de thermorémanence ancienne, c'est sans importance dans la mesure où ils ne sont pas transformés en minéraux susceptibles de prendre des A. T. R. par recuit. Nous n'avons rien tenté dans cette voie jusqu'ici, malgré le désir que nous en avons.

Le troisième essai, le plus long, a porté sur seize briques provenant du Château de Versailles et cuites vers 1750. Elles sont assez régulières de forme et petites (21 × 10 × 4,7 cm). Le four servant aux recuits avait été déplacé, et le champ à son intérieur avait pour inclinaison 67°45 et pour intensité 0,404 Oe. Le tableau 6 résume les résultats des mesures. Les colonnes $M'_{(670^\circ, F, 20^\circ)}$ et $M''_{(670^\circ, F, 60^\circ)}$ sont disposées

TABLEAU 6

CHÂTEAU DE VERSAILLES (1750). LES MOMENTS SONT EXPRIMÉS EN U. E. M.

Nos	M	$M_{(670^\circ, F, 60^\circ)}$	$M'_{(670^\circ, F, 60^\circ)}$	$M'_{(670^\circ, F, 20^\circ)}$	$M''_{(670^\circ, F, 20^\circ)}$	F_0/F
1	0,498	0,506	0,445	0,475	0,482	1,137
3	0,396	0,396	0,355	0,383	0,382	1,116
4	0,618	0,611	0,531	0,553	0,566	1,150
5	0,753	0,760	0,650	0,684	0,693	1,170
6	4,016	4,008	3,278	3,327	3,338	1,222
7	0,497	0,502	0,427	0,456	0,458	1,176
8	2,681	2,675	2,146	2,212	2,199	1,246
9	0,433	0,446	0,361	0,398	0,403	1,235
11	1,029	1,037	0,864	0,937	0,941	1,200
12	2,706	2,732	2,278	2,373	2,365	1,200
13	0,368	0,371	0,293	0,315	0,316	1,266
14	0,362	0,362	0,308	0,332	0,333	1,175
15	0,593	0,580	0,509	0,547	0,547	1,140
16	0,553	0,544	0,410	0,434	0,437	1,327
17	0,512	0,515	0,467	0,505	0,510	1,103
19	0,617	0,619	0,528	0,598	0,600	1,172

pour permettre des comparaisons plus faciles avec les colonnes voisines ; la mesure de $M'_{(670^\circ, F, 20^\circ)}$ a précédé en réalité celle de $M'_{(670^\circ, F, 60^\circ)}$.

La comparaison des colonnes $M'_{(670^\circ, F, 20^\circ)}$ et $M''_{(670^\circ, F, 20^\circ)}$, montre que le critère de stabilité minéralogique par recuit est satisfait remarquablement pour tous les objets, l'écart des deux valeurs, par rapport à leur moyenne, n'atteint 1 % que pour un seul.

La dispersion des rapports $\frac{M_{(670^\circ, F_0, 60^\circ)}}{M'_{(670^\circ, F, 60^\circ)}}$ qui mesurent F_0/F , est certes notable, entre 1,10 et 1,33 environ ; elle n'est cependant pas décourageante. Il faut remarquer que les intensités d'aimantation des seize objets sont relativement très différentes, certaines étant assez faibles ce qui entraîne évidemment une imprécision un peu plus grande sur la mesure des moments correspondants. Par exemple, si l'on sépare les huit objets les moins aimantés et les huit autres, le rapport F_0/F moyen ne change pas d'une manière significative, mais l'écart quadratique moyen est nettement supérieur dans le premier groupe ; on a respectivement :

$$1,192 \pm 0,073 \text{ et } 1,188 \pm 0,034.$$

Finalement, le rapport moyen pour les seize objets étant 1,190, l'intensité F_0 du champ terrestre à Versailles, vers 1750, aurait été 0,481 Oe, alors qu'elle est actuellement 0,465 Oe environ. Ajoutons que l'inclinaison mesurée d'après les briques mêmes de cette série [112, § 84] était de 74° contre $64^\circ 40'$ actuellement.

Mais, si nous portons maintenant notre attention sur l'effet des recuits à 60° , un phénomène singulier apparaît : en moyenne générale, le moment naturel M n'est pas réduit du tout par le recuit à 60° ; strictement même, il serait augmenté mais pas de façon significative, la somme des moments M étant 16,632 contre 16,664 pour la somme des moments $M_{(670^\circ, F_0, 60^\circ)}$. Cela pourrait évidemment venir de ce que ces terres cuites ne prendraient pas de thermorémanence entre 60° et 20° ; mais il n'en est rien car la comparaison des moments $M'_{(670^\circ, F, 20^\circ)}$ acquis au laboratoire et $M'_{(670^\circ, F, 60^\circ)}$ après recuit à 60° , montre une diminution importante, de l'ordre de 5 %, les sommes des moments étant 14,529 et 13,850. Cette différence entre les effets du recuit à 60° sur les aimantations originelles et provoquées impose l'idée que les premières avaient déjà été « nettoyées » par un recuit atteignant au moins 60° . Mais rien ne nous permet de juger si ce recuit n'avait pas eu lieu à température plus élevée ; et, s'il en avait été ainsi, nous commettrions une erreur systématique, le recuit de l'aimantation M' provoquée n'étant pas alors fait à température suffisante. Il en résulterait que la valeur trouvée pour F_0/F , donc finalement pour F_0 , serait trop faible sans qu'il nous soit possible, évidemment, de nous en assurer, les aimantations initiales étant maintenant détruites. Ainsi, cette série nous laisse un souci grave : l'intensité trouvée est une limite inférieure sûre, mais sans plus.

Une question subsiste : comment ces briques ont-elles pu être réchauffées

à 60° ou au delà, dans la construction à laquelle elles appartaient, un petit pavillon entre les cours de la Conciergerie et de la Comédie ? Nous ne pouvons pas répondre n'ayant pas la possibilité de retrouver l'emplacement exact du prélèvement. On peut toujours imaginer que le pavillon a subi quelque forme d'incendie ayant atteint ces briques légèrement.

D. Méthode définitive avec recuit par paliers.

L'observation précédente nous a incités à relever notre seuil de nettoyage à 100°. Mais, de plus, nous avons été conduits à scinder l'intervalle 670°-100° en intervalles consécutifs pour lesquels nous comparons les thermorémanences partielles, ancienne et nouvelle. Pour un objet donné, chaque intervalle t_1-t_2 fournit une valeur de F_0 car l'on a encore $\frac{F_0}{F} = \frac{M_{(t_1, F_0, t_2)}}{M'_{(t_1, F, t_2)}}$, et nous avons un nouveau critère d'exactitude d'après l'accord de ces différentes valeurs. En effet, cet accord ne peut exister que si l'aimantation « naturelle » est une thermorémanence unique, c'est-à-dire acquise par refroidissement dans un champ constant en direction et valeur, ce que l'on présume évidemment pour les échantillons choisis, qu'il s'agisse de recherches de direction ou d'intensité. Ainsi, si l'A. T. R. initiale était troublée par une A. R. I. importante (due par exemple à la foudre) ou par une A. T. R. secondaire (due à un réchauffement postérieur par incendie), nous serions prévenus par le désaccord des valeurs de F_0 correspondant aux intervalles successifs de température (1). On retrouve là l'idée d'un procédé que nous utilisons depuis longtemps [115] pour étudier l'histoire thermique d'une terre cuite, par exemple pour déceler l'incendie d'une construction ou les réchauffements d'une poterie, la méthode permettant d'ailleurs de déterminer les températures de recuit. Bien que nous ne nous intéressions pas ici à cette sorte d'archéothermométrie, nous serons amenés à l'évoquer incidemment, les réchauffements par paliers rapprochés permettant à la fois cette étude et la recherche de F_0 .

Il est bien évident que les valeurs de F_0 obtenues pour différents intervalles de température ne peuvent être égales non plus si la terre cuite se modifie dans sa composition en minéraux magnétiques au fur et à mesure que s'élève la température de recuit. Cette modification minéralogique progressive peut d'ailleurs être décelée plus directement ; nous pratiquons pour cela un contrôle supplémentaire qui consiste, ayant déterminé l'aimantation $M'_{(t_1, F, 20^\circ)}$ acquise dans le champ actuel entre une température modérée donnée t_1 et 20°, à redéterminer cette aimantation après que l'on a effectué un recuit à une température t_2 supérieure à t_1 ; un change-

(1) Il faut observer qu'en même temps, la direction de l'aimantation restante $M_{(670^\circ, F_0, t_1)}$, après un recuit à t_1 changerait aussi.

ment minéralogique qui se serait produit entre t_1 et t_2 a toute chance de se révéler par un changement de cette aimantation renouvelée toutes choses égales.

Présentons un exemple correspondant au cas simple, dans lequel nous nous sommes souvent placés, d'une seule coupure à 300° de l'intervalle 670° - 100° . Nous citerons ensuite des études à coupures plus nombreuses.

1. Exemple d'un recuit en deux étapes.

Considérons la tuile romaine Augst N° 13, qui appartient à un lot dont il sera question plus loin. Sur cette tuile, pesant 865 g, les axes Ox , Oy , Oz , de sens arbitraire, étaient dirigés suivant la longueur, la largeur et l'épaisseur. Les composantes du moment rémanent naturel étaient, en u. e. m. :

$$X = + 3,835 \quad Y = + 1,465 \quad Z = - 1,750.$$

Définissons la direction de cette aimantation dans l'objet par « l'inclinaison »

I , donnée par $\text{tg } I = \frac{X}{\sqrt{Y^2 + Z^2}}$; nous savons que ces tuiles romaines étaient

cuites debout et I représente l'inclinaison fossile, dans la mesure où Ox était exactement vertical dans le four de cuisson. Pour nous, cet angle sera seulement un repère de la direction d'aimantation; pour une aimantation unique il doit rester constant par désaimantation progressive.

Le déroulement de nos opérations se déduit facilement de ce que nous avons exposé précédemment pour le double recuit à 60° . Un double recuit à 100° nous donne les valeurs des composantes X , Y , Z , du moment restant $M_{(670^\circ, F_0, 100^\circ)}$ et les composantes X' , Y' , Z' , du moment acquis $M'_{(100^\circ, F, 20^\circ)}$ dans le champ F du laboratoire entre 100° et 20° . Nous faisons de la même façon un double recuit à 300° , ce qui nous donne les composantes du moment ancien restant $M_{(670^\circ, F_0, 300^\circ)}$ et du moment acquis entre 300° et 20° $M'_{(300^\circ, F, 20^\circ)}$. Enfin, un nouveau recuit à 670° nous donne l'aimantation $M'_{(670^\circ, F, 20^\circ)}$. C'est alors que nous faisons l'opération de contrôle d'évolution minéralogique. Un double ⁽¹⁾ recuit à 300° nous permet de redéterminer le moment que prend le corps, tel qu'il est maintenant minéralogiquement, entre 300° et 20° et de comparer ce moment à la valeur précédente $M'_{(300^\circ, F, 20^\circ)}$. Nous achevons par le contrôle habituel d'un second recuit à 670° . Le tableau 7 donne en u. e. m. les composantes des moments et ces moments. L'inclinaison I a été calculée sur l'aimantation ancienne restante après les recuits à 100° et à 300° .

En ce qui concerne l'aimantation acquise, Y' devrait être constamment nulle; les différences viennent évidemment des écarts accidentels dans les mesures et de la mise en position dans le four; on voit qu'ils n'ont rien d'inquiétant.

(1) En réalité un seul suffit correspondant à la position inversée par rapport à la position de recuit à 670° , comme on l'a vu à propos de l'opération de nettoyage à 60° précédemment décrite.

TABLEAU 7

TUILE ROMAINE AUGST N° 13, RECUITE PAR ÉTAPES

<i>t</i>	MOMENT ANCIEN RESTANT					MOMENT ACQUIS ENTRE <i>t</i> ET 20°			
	X	Y	Z	M	I	X'	Y'	Z'	M'
100°	+ 3,550	+ 1,367	- 1,555	4,110	59° 45	0,146	+ 0,019	0,243	0,284
300°	+ 1,533	+ 0,577	- 0,702	1,782	59° 15	0,799	- 0,027	1,508	1,707
670°				0,0		1,332	- 0,056	2,512	2,843
300°						0,783	- 0,011	1,472	1,667
670°						1,349	0,0	2,536	2,877

La valeur I est constante et sensiblement égale à la valeur observée sur l'aimantation naturelle 59°15.

L'aimantation acquise entre 300° et 20°, après le premier recuit à 670°, est très voisine de celle prise antérieurement entre les mêmes températures ; d'un autre côté, le 2^e recuit à 670° provoque un changement à peine significatif. Dans ces conditions la stabilité minéralogique paraît certaine.

D'après le tableau 7, les rapports F_0/F sont :

$$\text{--- pour l'intervalle } 100^\circ\text{-}300^\circ, \frac{4,110 - 1,782}{1,707 - 0,284}, \text{ soit } 1,64$$

$$\text{--- pour l'intervalle } 300^\circ\text{-}670^\circ, \frac{1,782}{2,843 - 1,707}, \text{ soit } 1,57.$$

Étant donné la succession des opérations conduisant à ces rapports, on ne peut guère s'attendre à un meilleur accord. Nous pouvons admettre que l'échantillon considéré porte une aimantation thermorémanente unique et retenir le rapport F_0/F correspondant à l'intervalle total 670°-100°. L'intensité du champ F mesurée, à l'emplacement du four, étant 0,464 Oe, nous obtenons ainsi pour F_0 la valeur 0,74 Oe, avec une erreur possible de quelques pour-cents.

2. Recuit à plusieurs étapes.

Beaucoup d'essais conduits sur des terres cuites sont aussi satisfaisants que le précédent. Mais il arrive que le recuit de contrôle à 300°, suivant le recuit principal à 670°, révèle une évolution franche ; dans ces conditions nous ne pouvons pas savoir quand cette évolution a commencé, en particulier si elle existait déjà à 300°, et tout l'essai est perdu ; c'est ce qui nous a amenés à augmenter les étapes de température. Notre technique courante actuelle comporte des doubles chauffées successives de 100° en 100°. Arrivés à 400°, nous faisons un contrôle de stabilité en reprenant une aimantation entre 300° et 20° ; de même après recuit à 500°,

puis à 600°. Il arrive fréquemment qu'aucun changement appréciable n'a lieu jusqu'à 400°, mais qu'il s'en produise ensuite ; on peut alors utiliser l'objet, mais en ne considérant que les intervalles ne dépassant pas 400°.

3. Cas particulier : tracé de courbes de désaimantation et d'aimantation.

Pour résoudre des problèmes que nous avons évoqués, relatifs à l'analyse de superpositions possibles d'aimantations, il nous est arrivé de faire des recuits, toujours doubles, avec un plus grand nombre d'étapes encore, de 50° en 50°⁽¹⁾. On peut alors tracer la courbe donnant, en fonction de la température t de recuit l'aimantation primitive restante après chaque recuit, $M_{(670^\circ, F_0, 0)}$; de la même façon on peut tracer la courbe d'aimantation acquise dans le champ F , $M'_{(t, F, 20^\circ)}$.

Raisonnons d'abord dans le cas simple où l'aimantation naturelle est une A. T. R. pure et où aucun changement minéralogique n'a lieu par recuit. D'après les lois de la thermorémanence normale, toujours vérifiées dans les terres cuites ordinaires, ces deux courbes sont complémentaires si F est égal à F_0 ; c'est-à-dire que la somme de leurs ordonnées pour t quelconque est constante et égale à la valeur limite $M_{(670^\circ, F_0, 20^\circ)}$, elle-même égale à $M'_{(670^\circ, F, 20^\circ)}$ par hypothèse⁽²⁾. Donc, si l'on dessine les deux courbes en renversant l'une par rapport à une parallèle à l'axe des t passant par l'ordonnée moyenne, elles coïncident d'un bout à l'autre de l'échelle des températures⁽³⁾. Si F est différent de F_0 , soit $\frac{F_0}{F} = k$, il y aura coïn-

cidence à condition de multiplier par k les ordonnées de la courbe d'aimantation. La conséquence intéressante est que, si l'on peut trouver un rapport k faisant coïncider, aux erreurs de mesure près, les deux courbes observées sur un corps donné, on en déduit $F_0 = kF$, en intégrant en quelque sorte l'ensemble des essais.

Mais, si le corps s'est modifié progressivement par recuit, cet ajustage n'est plus possible d'un bout à l'autre de l'échelle de température ; cependant, la modification ne se produisant généralement pas à température modérée, on pourra souvent trouver un nombre k ajustant bien les courbes jusqu'à la température de recuit à partir de laquelle la transformation minéralogique devient appréciable.

L'ajustage est encore impossible si l'aimantation naturelle n'est pas une A. T. R. simple ; les allures des deux courbes peuvent alors devenir très diffé-

(1) Cela ne veut pas dire que nous déterminons des thermorémanences dans des intervalles successifs de 50° ; ayant déterminé l'A. T. R. acquise dans le champ F entre t et 20°, nous continuons en déterminant cette A. T. R. entre $t + 50^\circ$ et 20°, etc...

(2) Bien entendu, la température de palier pour ces courbes peut être inférieure à 670°, température pour laquelle la désaimantation est toujours totale.

(3) Pour un objet donné, la connaissance de l'une ou l'autre de ces courbes, exactement équivalentes, correspondant à un champ F_0 ou F connu, permet de prévoir le moment magnétique résultant du corps après n'importe quelle succession de chauffés et de refroidissements en présence ou non de champs magnétiques, pourvu que ces champs restent très modérés (proportionnalité des A. T. R. aux champs).

rentes (1), au point que l'aimantation naturelle peut, dans certains intervalles croître quand t s'élève (cas d'aimantations composantes plus ou moins opposées en sens). Pratiquement des irrégularités dans la superposition des deux courbes apparaissent souvent vers l'origine à cause des recuits modérés qu'ont pu subir les objets avant leur entrée au laboratoire, et vers la fin par suite de l'évolution due au recuit poussé. A cause de cela, il est préférable de dessiner les deux courbes en les « accrochant » vers leur milieu, c'est-à-dire en leur donnant un point commun arbitraire, par exemple pour l'abscisse 300°.

Pour illustrer ces faits citons un dernier exemple ; nous choisirons celui d'un vase à sacrifice, recueilli dans le Temple de Tanit à Carthage et présumé dater du 8^e au 7^e siècle avant J.-C. [22]. Plusieurs poteries récoltées sur la fouille de ce temple, dans la même couche archéologique, nous ayant donné des inclinaisons de l'aimantation très différentes (les vases étant supposés cuits avec leur axe placé verticalement), on peut penser de ces poteries, ou bien qu'elles avaient été cuites dans des positions quelconques variées, ou bien qu'elles avaient subi des réchauffements importants. L'étude par recuit progressif permet de trancher cette question. Nous pouvons dire ici, en passant, le résultat de notre longue étude (non publiée) : certains vases, les plus grossiers, sont à aimantation unique et ont donc été cuits dans des attitudes quelconques, et d'autres, comportant diverses couleurs dessinées,

TABLEAU 8

POTERIE N° 13 DU SANCTUAIRE DE TANIT A CARTHAGE

t	MOMENT ANCIEN RESTANT					MOMENT ACQUIS ENTRE t ET 20°			
	X	Y	Z	M	I	X'	Y'	Z'	M'
20°			0,470	0,889					
100°	0,692	0,226	0,491	0,878	32° 0	0,017	— 0,013	0,020	0,026
150°	0,656	0,200	0,466	0,829	34° 15	0,026	— 0,006	0,080	0,084
200°	0,541	0,162	0,396	0,690	35° 0	0,055	+ 0,006	0,128	0,139
250°	0,420	0,135	0,299	0,533	34° 15	0,105	+ 0,006	0,205	0,230
300°	0,342	0,118	0,247	0,438	34° 15	0,128	— 0,010	0,257	0,287
350°	0,276	0,099	0,216	0,364	36° 30	0,141	— 0,003	0,303	0,334
400°	0,208	0,076	0,173	0,281	38° 0	0,164	+ 0,004	0,345	0,382
450°	0,154	0,062	0,125	0,208	37° 0	0,184	— 0,010	0,383	0,425
500°	0,092	0,051	0,063	0,123	31° 0	0,194	+ 0,004	0,428	0,470
600°	0,006	0,026	0,023	0,035		0,243	+ 0,005	0,482	0,540
300°						0,134	0,0	0,270	0,301

(1) En même temps les allures des courbes de désaimantation de chacune des trois composantes X, Y, Z, du moment naturel peuvent différer considérablement ; il est souvent très parlant de les tracer ensemble en valeurs relatives.

ont des aimantations composées, ce que nous interprétons par des recuits techniques dont nous pouvons d'ailleurs donner les températures. Le vase N° 13 est du premier groupe.

Le tableau 8 donne, encore en u. e. m., des informations analogues à celles du tableau 7. Pour des raisons exposées plus loin, le recuit de ces poteries assez volumineuses n'a pu être poussé que jusqu'à 600°, ce qui est sans importance. L'axe Oz est l'axe « vertical » du vase, les axes Ox et Oy « horizontaux » sont arbitraires.

Le champ à l'emplacement du four spécialement utilisé pour les recuits avait une inclinaison de 64°15 et une intensité $F = 0,450$ Oe.

Le vase pèse 1 155 g.

Comme dans l'exemple antérieur, Y' devrait être constamment nulle ; ses faibles valeurs, dont on ne tient pas compte, donnent encore une évaluation des erreurs possibles de mesure et de mise en place. Les valeurs des dernières lignes du tableau pour les caractéristiques du moment restant, et des premières pour le moment acquis, sont entachées d'erreurs relatives élevées car elles correspondent à des composantes faibles mesurées en présence de composantes fortes de l'autre aimantation. La dernière ligne du tableau se rapporte au contrôle de stabilité qui est satisfaisant ; peut être cependant l'objet était-il devenu légèrement plus aimantable après le recuit à 600°.

Sur la figure 1, la courbe descendante en trait plein est celle de disparition de l'aimantation naturelle (due au champ F_0 inconnu) ; la courbe ascendante représente l'aimantation acquise entre t et 20° dans le champ $F = 0,450$ Oe ; enfin, la courbe descendante en pointillés représente la précédente, mais renversée, accrochée à la première au point d'abscisse 300°, et dilatée en ordonnées dans le rapport k , avec une valeur d'essai $k = 1,71$. Ce rapport faisant coïncider les courbes sur une grande longueur semble pouvoir être retenu pour définir la valeur de F_0 qui serait $0,450 \times 1,71$ soit 0,77 Oe. Aux extrémités, on observe des désaccords pouvant s'expliquer comme il a été dit : au delà de 500°, il s'agirait d'une très légère évolution minéralogique, et vers la température ordinaire d'un effet de réchauffement. Ce réchauffement, qui serait ici assez fort, nous paraît s'expliquer par le rite sacrificiel punique ; en effet, on trouve les vases remplis d'ossements calcinés et de charbon de bois qui ont pu élever la température du vase au delà de 100° si ce contenu a été déposé brûlant.

A propos de cet exemple, permettons-nous une remarque assez générale. Lorsqu'elle est bonne, la coïncidence des courbes d'aimantation et de désaimantation, présentées comme il vient d'être dit, permet une identification de l'origine de l'aimantation naturelle comme aimantation thermorémanente pure. Or, le procédé proposé jusqu'ici pour cette vérification consiste à tracer la courbe de disparition par recuit en champ nul de l'aimantation naturelle ; puis, le recuit ayant atteint 670°, à provoquer une A. T. R. totale et à tracer ensuite sa courbe de désai-

mantation [81, 82]. Ce procédé a même été en quelque sorte officialisé devant la Commission de paléomagnétisme de l'Association internationale de Géomagnétisme et Aéronomie (Rome, 1954). Son inconvénient apparaît immédiatement : le recuit à 670° a pu provoquer une modification minéralogique importante, non détectée,

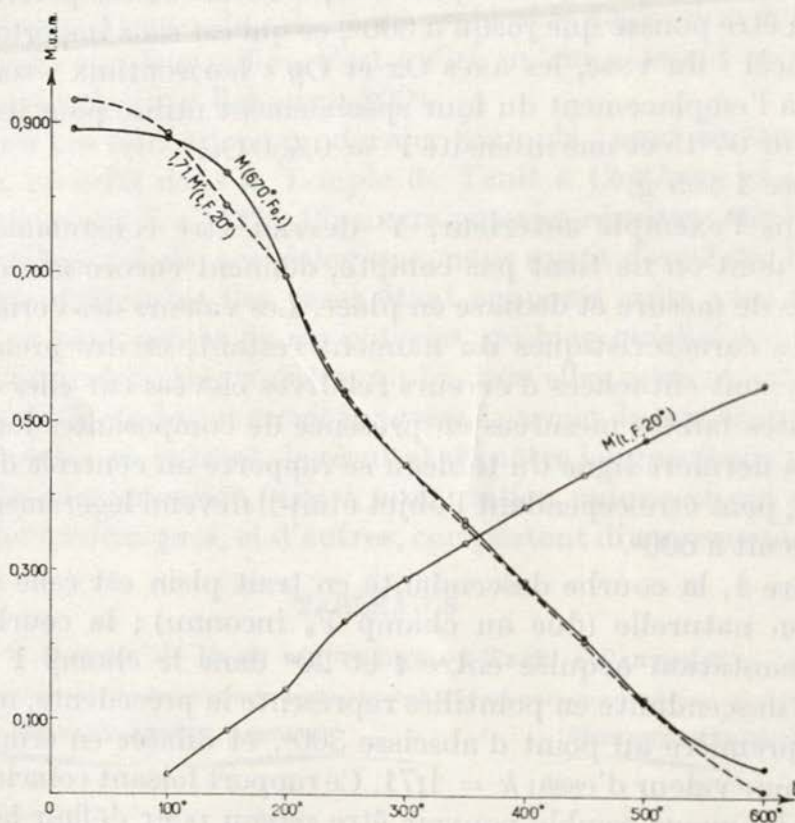


FIG. 1. — Courbes d'aimantation et de désaimantation : poterie N° 13 du Sanctuaire de Tanit.

et, même si l'aimantation naturelle était une A. T. R. pure, les deux courbes de désaimantation pourraient être nettement différentes. Suivant le procédé que nous avons décrit, nous opérons en quelque sorte « par le bas », en traçant progressivement les courbes d'évolution de l'aimantation naturelle et d'une A. T. R. provoquée, mais sans être allé d'abord à 670° pour la seconde. Pour des objets insensibles au recuit, les deux procédés sont équivalents, une courbe d'aimantation et la courbe de désaimantation en champ nul correspondante étant identiques au sens près. Mais pour des corps, comme les roches volcaniques, souvent sensibles au recuit, le deuxième procédé seul garde une signification dans tout un intervalle de température allant jusqu'au début de la transformation minéralogique.

IV. RÉSULTATS : INTENSITÉ DU CHAMP TERRESTRE DANS LE PASSÉ HISTORIQUE LOINTAIN :

Les quelques résultats déjà exposés, obtenus à partir de briques provenant de monuments historiques français, étaient élaborés au moyen d'une méthode en voie de perfectionnement. La plupart des résultats qui suivent ont été acquis en suivant l'un ou l'autre des trois programmes, de complication croissante, qui viennent d'être décrits. Ils se rapportent à des époques plus anciennes et, jusqu'ici, à quelques pays seulement encadrant la Méditerranée occidentale. Cessant de porter toute notre attention sur la discussion des méthodes, nous exposerons maintenant nos résultats en les classant par région et par époque.

A. Époque gallo-romaine : France.

Nous avons fait des déterminations d'intensité sur des briques provenant de deux constructions gallo-romaines, importantes mais malheureusement mal datées encore semble-t-il : ce sont les Thermes de Julien à Paris, situés Boulevard St-Michel dans un ensemble contenant le Musée de Cluny, et l'Amphithéâtre de Fréjus, en Provence, dans la région de St-Raphaël. Nous avons rendu compte de nos résultats [122], mais en partie seulement. Nous donnons ici, avec quelques détails numériques supplémentaires, le bilan complet des objets étudiés.

1. Thermes de Julien (ou Thermes de Cluny).

a. — Une détermination d'intensité dont nous n'avons pas fait état avait porté sur des briques provenant d'un premier prélèvement effectué en vue de la recherche de l'inclinaison du champ terrestre (112, § 86). Des neuf fragments recueillis, qui nous avaient fourni la valeur $64^{\circ}0$ pour l'inclinaison magnétique, six avaient été retenus pour l'étude de l'intensité. Mais celle-ci avait été conduite, à la manière ancienne, avec recuits à 60° et 670° seulement, ce qui limitait nos possibilités de contrôle, et la dispersion des valeurs F_0/F que nous avions trouvées nous avait paru anormale. Cette dispersion est forte, comme on peut en juger d'après le tableau 9 résumant nos mesures, mais nous nous demandons maintenant s'il n'a pas été exagéré de rejeter tout simplement ces résultats comme nous l'avions fait.

En effet, on ne trouve pas de preuves flagrantes d'erreur systématique. La comparaison des moments naturels et nettoyés, par recuit à 60° , ne semble pas indiquer un réchauffement important par incendie, que l'on pourrait craindre pour la construction, encore que l'emploi d'une méthode trop sommaire ne nous permette pas d'en bien juger. Il en est de même pour le contrôle de la stabilité

TABLEAU 9

THERMES DE CLUNY, 1^{re} SÉRIE
(Les moments sont exprimés en u. e. m.)

N ^{os}	M	M ₆₀	M'	M''	M' ₆₀	F ₀ /F
1	0,838	0,827	0,554	0,534	0,516	1,60
2	0,319	0,320	0,204	0,198	0,189	1,69
4	0,342	0,335	0,268	0,241	0,253	1,32
5	0,425	0,415	0,338	0,323	0,319	1,30
6	0,581	0,584	0,446	0,440	0,419	1,39
9	0,354	0,351	0,223	0,211	0,207	1,70

minéralogique par recuit ; la comparaison des valeurs M' et M'' ne révèle qu'une évolution faible encore que systématique. Un autre essai, plus direct, a été fait dans le même sens : des mesures de la susceptibilité χ , portant sur deux fragments détachés de chacun des échantillons initiaux 1 et 3, ont été reprises après recuit de ces fragments à 670°. On a trouvé pour $\chi \cdot 10^{-6}$ u. e. m. :

avant recuit...	138	156	101	67
après recuit...	131	148	103	74

Ainsi, la susceptibilité, qui est relativement très sensible aux changements minéralogiques, a peu varié ce qui serait une preuve supplémentaire approximative de stabilité.

Nous pensons que les raisons principales de la dispersion sont, d'une part la faiblesse, vraiment excessive ici, des moments magnétiques mesurés ce qui entraîne des erreurs relatives fortes, d'autre part l'exceptionnelle viscosité magnétique de ces terres cuites dont nous allons discuter à propos de l'essai suivant.

Finalement, si l'on veut bien retenir la moyenne 1,50 des valeurs F₀/F, le champ F dans le laboratoire, à l'emplacement où se trouvait le four durant ces essais, ayant pour intensité 0,459 Oe, on obtient pour F₀ la valeur 0,69 Oe.

b. — Une deuxième étude plus étendue, celle dont nous avons rendu compte en 1946, a été effectuée sur un nouveau lot de six briques recueillies ultérieurement en un autre endroit des Thermes de Cluny. Conduit suivant les conseils de M. LEROUX et M^{lle} MAILLARD, le prélèvement avait été fait volontairement en un lieu pas trop éloigné de points portant des traces archéologiques d'incendie, et nous étions intéressés par la mise en évidence de réchauffements possibles. Les étapes des recuits progressifs ont été 62°, 120°, 180°, 240°, 300°, 420°, 670°, pour les trois premiers échantillons numérotés 11, 12, 13 ; pour les trois autres, 14, 15 et 16, le recuit à 240° a été omis, exactement il a été rendu inutilisable, la seconde chauffe ayant été poussée trop haut.

Avant de donner quelques informations complémentaires à celles très succinctes de notre publication de 1946, signalons bien les défauts de cette série, défauts dont les effets tendent à se compenser sur le résultat final, la valeur de F_0 , mais qui provoquent encore des dispersions importantes et un peu désagréables dans le détail des comparaisons. D'une part, les objets étudiés étaient de forme assez irrégulière ce qui entraîne des erreurs dans la mise en place dans le four et dans les mesures à l'appareil d'induction ; dans nos études actuelles, nous retaillons préalablement les objets pour leur donner des formes plus régulières. D'autre part, à l'époque de ces mesures, la température du laboratoire était variable, même très variable car nous étions en pleine période de guerre et en hiver, presque sans chauffage ; aussi les différents moments magnétiques que comporte l'étude de chaque objet ont-ils été mesurés à des températures assez différentes et nous avons dû faire d'importantes et imprécises corrections de température. A ce point de vue, observons que les résultats qui suivent ont été recalculés avec des coefficients de température que nous avons essayé d'améliorer et il peut en résulter de très légères différences avec les résultats publiés. Enfin, ces briques des Thermes de Julien ont une faculté de trainage magnétique vraiment aberrante pour des terres cuites : le rapport $\Delta M/M$, défini antérieurement, dépassant 5 %. Nous savons que l'effet de ce trainage est éliminé dans nos essais ; encore faut-il pour cela que le temps qui sépare la sortie du four et la mesure soit toujours le même, condition difficile à remplir pratiquement. C'est sans réelle importance pour des trainages faibles, mais dans le cas qui nous occupe d'un trainage fort, et la condition indiquée ayant été particulièrement mal remplie, il en résulte des erreurs non systématiques mais dispersantes.

Les résultats de nos mesures sont résumés dans la figure 2 comportant deux courbes pour chacun des échantillons : celle de disparition progressive de l'aimantation initiale (courbe descendante) et celle, ascendante, d'aimantation thermorémanente dans le champ de 0,404 Oe qui existait à l'emplacement nouveau du four au cours des essais. L'examen de ces courbes donne immédiatement une indication relative au réchauffement par incendie. Si, pour chaque objet, on les compare comme il a été indiqué précédemment, c'est-à-dire après renversement et dilatation de la seconde, on observe que, si l'on peut obtenir un accord approché des formes dans l'ensemble, il n'en est rien dans la partie initiale. Entre 20° et 120°, alors que la courbe d'aimantation renversée est nettement descendante, la courbe de désaimantation peut être stationnaire ou même ascendante. C'est là la marque d'un réchauffement, que nous attribuons à l'incendie, et qui a pu être poussé un peu au-dessus de 120° ; nous en retiendrons qu'il sera bon d'élever notre température de « nettoyage » à l'échelon suivant de température 180°. Le point correspondant à 20° devrait être d'ordonnée zéro, et l'on voit facilement que s'il en était ainsi le segment 20°-62° aurait une pente anormale par rapport au reste

de la courbe. C'est encore un effet d'aimantation visqueuse. Comme nous l'avons fait observer, notre procédé de mesure avec deux recuits à une même température

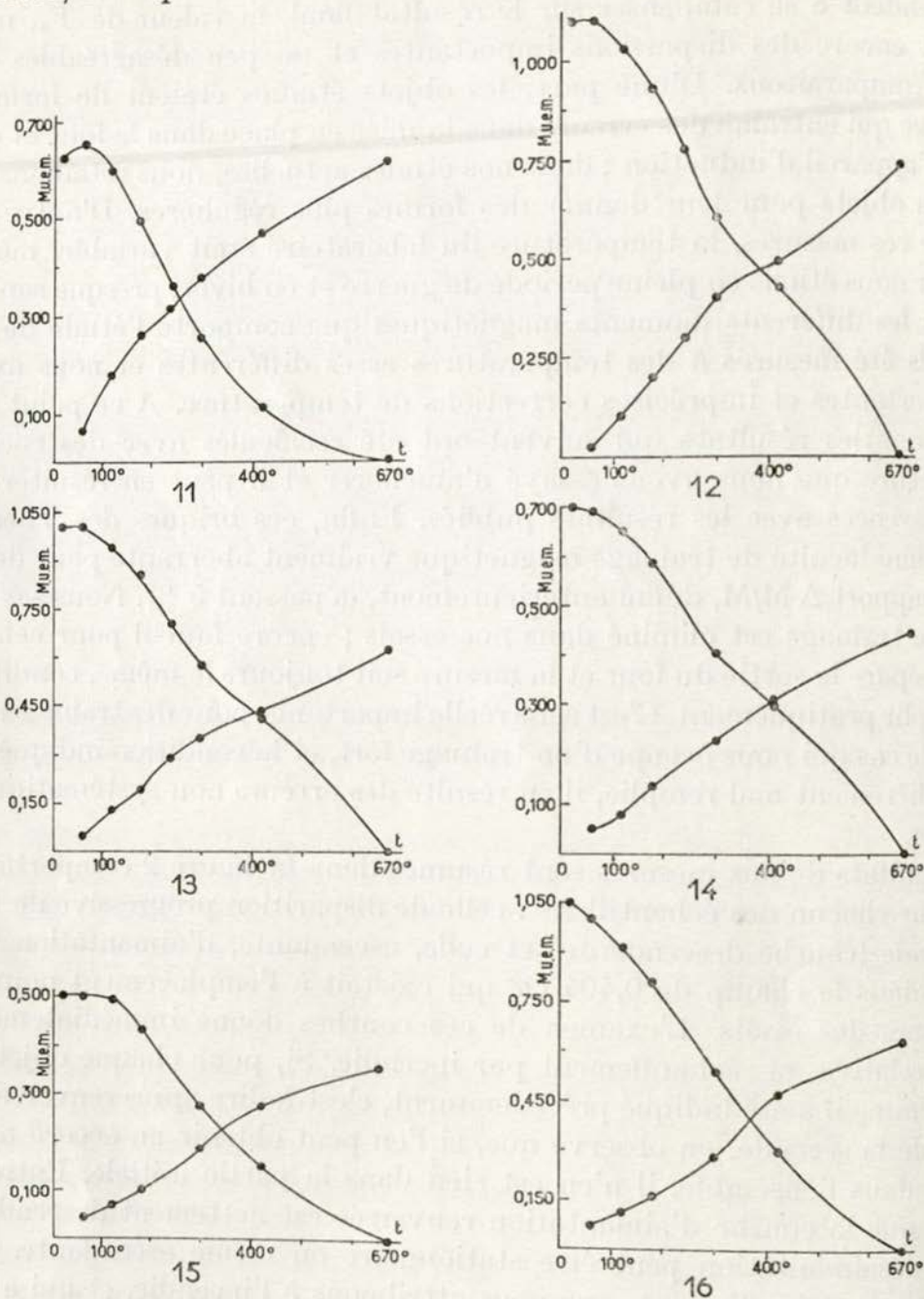


FIG. 2. — Courbes d'aimantation et de désaimantation : Thermes de Cluny, 2^e série.

donne l'aimantation thermorémanente acquise entre t et 20° mais augmentée de l'A. R. V. acquise dans le temps qui sépare la fin du refroidissement de la mesure du moment. Cette A. R. V., toujours la même pour un même corps, s'ajoutant à toutes

les aimantations nouvelles (dont on utilise les différences seulement dans la recherche de F_0), il faudrait porter sa valeur comme ordonnée correspondant à l'abscisse 20° de la courbe d'aimantation. Nous ne l'avons pas déterminée avec assez de soin pour en faire état ; elle est de quelques pour-cents de l'aimantation totale.

En ce qui concerne la stabilité par recuit, nous avons fait, outre le test habituel d'un second recuit à 670° , un test direct mais exécuté seulement après le premier recuit à 670° , en redéterminant l'aimantation M'_{180} acquise entre 180° et 20° , que l'on peut comparer à l'aimantation M'_{180} acquise dans le même intervalle après le recuit initial à 180° . Le tableau 10 donne les valeurs ainsi obtenues ; on y a ajouté les valeurs, en u. e. m., des moments correspondant à l'aimantation « naturelle » M_{20} .

TABLEAU 10

THERMES DE CLUNY, 2^e SÉRIE. TESTS DE STABILITÉ PAR RECUIT.

N ^{os}	M_{20}	M'_{180}	M'_{670}	M'_{180}	M'_{670}
11	0,623	0,260	0,605	0,233	0,610
12	1,102	0,202	0,732	0,183	0,723
13	1,004	0,184	0,615	0,170	0,602
14	0,702	0,134	0,440	0,134	0,422
15	0,504	0,102	0,354	0,103	0,361
16	1,049	0,161	0,628	0,184	0,626

Étant donné ce que nous avons dit des erreurs possibles, ces tests paraissent satisfaisants pour les six objets que nous pouvons considérer comme insensibles aux recuits. La comparaison, objet par objet, des courbes de désaimantation et d'aimantation est un peu plus sévère dans ses conclusions : trois des échantillons, 12, 15 et 16, seraient stables, alors que les trois autres montreraient des changements. La même comparaison peut être faite numériquement en calculant le rapport F_0/F correspondant à différents intervalles de température. Le tableau 11 donne ces rapports pour cinq de ces intervalles, choisis assez grands pour que les aimantations à comparer restent raisonnables.

Tout ce que nous avons dit antérieurement relativement au réchauffement par incendie laisse prévoir que les intervalles partant de 120° peuvent donner des valeurs de F_0/F un peu faibles et d'autant plus que l'intervalle choisi est plus court. Le comportement de l'échantillon 11, entre 300° et 670° , pourrait inciter à l'éliminer. La valeur moyenne 1,75 correspondant à l'intervalle 180° - 420° , qui échappe à la fois aux perturbations de l'aimantation originelle par incendie et à l'évolution minéralogique par recuit à température assez élevée, paraît la plus convenable ;

TABLEAU II

THERMES DE CLUNY, 2^e SÉRIE. RAPPORTS F_0/F DANS DIFFÉRENTS INTERVALLES

N ^{os}	120°-420°	120°-670°	180°-420°	180°-670°	300°-670°
11	1,79	1,46	1,86	1,44	1,14
12	1,64	1,64	1,79	1,76	1,79
13	1,78	1,92	1,84	1,97	2,08
14	1,56	1,79	1,70	1,91	1,87
15	1,68	1,73	1,64	1,71	1,68
16	1,68	1,76	1,64	1,74	1,60
Moyennes...	1,69	1,72	1,75	1,75	1,69

mais on peut tout de même lui reprocher de n'être pas très sûre étant donné la dispersion des valeurs dont elle provient. Ce rapport 1,75 conduit à une valeur de F_0 de $0,404 \times 1,75$ soit 0,71 Oe environ.

Ainsi, les deux séries de briques des Thermes de Cluny, étudiées indépendamment et assez différemment, seraient en excellent accord : 0,69 et 0,71 Oe. Nous n'en concluons pas que nos mesures sont exactes à près de 1 % ; nous ne le pensons pas, surtout avec de tels matériaux. Mais nous ne considérons pas, inversement, que ce résultat est tout à fait fortuit, et nous retiendrons qu'à l'époque où les briques des Thermes ont été cuites (peut être vers 300 après J.-C.), l'intensité du champ terrestre dans la région parisienne était voisine de 0,70 Oe.

En ce qui concerne l'inclinaison à associer à cette valeur, disons seulement que pour les six échantillons de la 1^{re} série on obtient 63°15 sur l'aimantation naturelle et 63°30 après nettoyage à 60°, tandis que pour la 2^{me} série l'inclinaison passe de 56°45 sur l'aimantation naturelle (troublée par l'incendie) à 61° après nettoyage au delà de 120°. Ainsi nous pourrions adopter pour l'inclinaison à Paris, à l'époque de la construction des Thermes, la valeur approchée de 62°15.

2. Amphithéâtre de Fréjus.

Conseillés à Paris par J. FORMIGÉ et sur place par le Dr DONNADIEU, et aidés par M. GHIS, nous avons recueilli sur l'immense construction onze fragments de briques numérotés de 6 à 16. Les résultats d'une étude d'intensité ayant porté sur les huit premiers ont été publiés [122]. Ultérieurement, nous avons poursuivi le travail sur les trois derniers fragments. Dans ce qui va suivre, nous ferons état de l'ensemble, c'est-à-dire de onze objets qui forment une série *a priori* exceptionnelle pour une recherche d'intensité. En effet, aucun des défauts intrinsèques, que nous avons signalés pour la série de CLUNY, ne se retrouve ici. D'une part, nous avons choisi des échantillons de forme régulière et dans un état de fraîcheur remar-

quable, les prélèvements ayant été faits dans des parties bien protégées, sous des voûtes en général. D'autre part, la question d'un réchauffement accidentel par incendie ne se pose pas dans une construction de cette nature et de ces dimensions, le prélèvement ayant eu lieu systématiquement en des points très dispersés et éloignés. Enfin, le trainage magnétique est ici normal pour des terres cuites, c'est-à-dire très faible, sa valeur relative $\Delta M/M$ étant 0,6 % seulement en moyenne. Un défaut subsiste cependant, c'est celui provenant de la variation réversible des moments, les températures des mesures s'étant étalées entre 15° et 25° environ dans tout le déroulement de ce long travail.

TABLEAU 12

AMPHITHÉÂTRE DE FRÉJUS : TESTS DE STABILITÉ

N°	M ₂₀	M ₃₀₀	M' ₆₇₀	M'' ₆₇₀	F ₀ /F		
					100°-300°	300°-670°	100°-670°
6	1,495	0,984	1,029	1,046	1,52	1,58	1,56
7	1,489	1,251	0,970	0,948	1,80	1,75	1,76
8	4,673	3,602	3,260	3,274	1,52	1,42	1,45
9	0,764	0,450	0,498	0,510	1,58	1,69	1,64
10	0,924	0,715	0,605	0,598	1,72	1,82	1,80
11	1,082	0,556	0,967	0,916	1,39	1,24	1,31
12	0,985	0,774	0,620	0,563	1,69	1,73	1,72
13	1,399	0,661	0,963	0,957	1,74	1,43	1,57
14	1,089	0,769	0,739	0,716	1,69	1,58	1,61
15	4,229	2,046	2,786	2,793	1,56	1,58	1,57
16	0,375	0,224	0,233	0,236	1,60	1,60	1,60

Pour toute la série uniformément, les recuits ont eu lieu à 100°, 300°, et 670° ; on peut considérer qu'il y a nettoyage à 100° et possibilité d'utiliser deux intervalles de température 100°-300° et 300°-670° ; c'est le premier cas type que nous avons décrit. On a ainsi deux tests de stabilité pour chaque objet : la comparaison habituelle des moments nouveaux M' et M'', acquis entre 670° et 20°, après les deux recuits successifs à 670°, et la comparaison des rapports F₀/F correspondants aux deux intervalles 100°-300° et 300°-670° ; on peut ajouter le rapport correspondant à l'intervalle total 100°-670°, qui n'est la moyenne des deux autres que lorsque la température 300° correspond à la moitié de l'aimantation dans l'intervalle 100°-670°. L'essentiel des résultats est rassemblé dans le tableau 12 où les moments sont toujours exprimés en u. e. m., M₂₀ est le moment initial et M₃₀₀ le moment restant après recuit à 300°.

Le premier critère de stabilité, égalité approchée de M' et M'', est bien satis-

fait, sauf cependant pour les échantillons 11 et 12 où la différence dépasse 5 % du moment moyen. Cela nous avait conduits à les éliminer dans notre publication antérieure [122] ce qui ramenait notre série à six objets ; mais nous faisons observer que le résultat n'aurait pas été beaucoup modifié en les gardant. Le second critère, l'égalité pour chaque objet des rapports F_0/F dans les deux intervalles 100°-300° et 300°-670°, est satisfaisant si l'on veut bien ne pas oublier que ces nombres sont obtenus par le quotient de deux différences. On observe certes des écarts venant de là, mais sans qu'il y ait rien de systématique, les moyennes des rapports F_0/F étant pour les trois colonnes 1,62, 1,58 et 1,60. Enfin, le dernier critère, égalité des rapports F_0/F d'objet à objet, est sans doute acceptable malgré la dispersion assez forte des valeurs, de 1,31 à 1,80, pour l'intervalle total 100°-670°, si l'on garde tous les objets.

Finalement, gardant les échantillons 11 et 12, et les échantillons nouveaux, de 14 à 16, étant ajoutés, la série conduit à un rapport F_0/F de 1,60 et à la valeur $F_0 = 0,404 \times 1,60$ soit 0,65 Oe, valeur par défaut, mais qui serait par excès si on supprimait les objets 11 et 12.

Il peut être intéressant d'avoir un ordre de grandeur des caractéristiques magnétiques des terres cuites étudiées. La masse moyenne des échantillons est de l'ordre de 900 g ; l'aimantation spécifique naturelle moyenne est $\sigma = 20.10^{-6}$ u. e. m. environ. Des mesures de susceptibilités faites sur trois fragments détachés des briques initiales 6, 10 et 15, ont donné respectivement pour valeurs de χ : 150, 380 et 330.10^{-6} u. e. m.

Au cours de cette étude sur les briques de l'Amphithéâtre de Fréjus, nous avons fait quelques observations relatives à l'atmosphère la plus convenable pour éviter au mieux les transformations des constituants magnétiques des terres cuites. A la suite de beaucoup d'essais, nous avons été conduits à opter pour une atmosphère d'azote, mais dans certains cas nous avons l'impression qu'une atmosphère d'air ordinaire aurait aussi bien convenu. Les recuits de quelques échantillons (les 6, 8, 9, 13) ont eu lieu dans l'air, les autres ayant eu lieu comme d'habitude dans un courant d'azote spécial. Il ne semble pas qu'il en soit résulté des différences significatives. De plus, les échantillons 8 et 13 ayant subi tous leurs recuits dans l'air, ont été réchauffés une troisième fois à 670° dans une atmosphère d'azote : les moments ainsi obtenus ne révèlent aucun changement appréciable. Ainsi, au moins dans ce cas, des atmosphères neutre ou faiblement oxydante seraient équivalentes.

En ce qui concerne l'inclinaison magnétique, l'identité pour chaque objet des valeurs I_{100} et I_{300} calculées sur les aimantations nettoyées à 100° et à 300° est remarquable et leurs écarts avec I_{20} , inclinaison de l'aimantation initiale, restent faibles et de l'ordre de grandeur qu'on peut attendre des erreurs de mesure (tableau 13). Cet accord est une preuve supplémentaire de la pureté des aimantations naturelles ; toute altération par recuit ou effet visqueux important provo-

querait nécessairement des écarts plus considérables. La dispersion des inclinaisons d'un objet à l'autre par contre est forte, encore que d'un ordre de grandeur habituel ; elle est due aux positions dans le four de cuisson initiale, et, si elle limite la précision de la mesure de l'inclinaison magnétique, elle ne retentit en rien sur la recherche de l'intensité. Les moyennes des trois colonnes sont presque identiques :

TABLEAU 13
AMPHITHÉÂTRE DE FRÉJUS. INCLINAISON MAGNÉTIQUE.

N ^{os}	I ₂₀	I ₁₀₀	I ₃₀₀
6	66° 0	65° 0	65° 0
7	54° 15	52° 0	53° 15
8	74° 45	74° 45	74° 15
9	65° 30	66° 0	65° 15
10	66° 45	66° 0	65° 30
11	52° 30	50° 30	50° 45
12	51° 15	51° 15	52° 0
13	62° 15	63° 15	61° 0
14	62° 30	62° 45	62° 30
15	57° 0	58° 30	58° 15
16	53° 0	55° 15	56° 15

60°30 ; c'est la valeur que nous associerons à l'intensité 0,65 Oe, en Provence, à l'époque de la construction de l'Amphithéâtre de Fréjus. Nous restons indécis sur la datation de cette construction. D'après une étude de J. FORMIGÉ sur les monuments gallo-romains de Provence [36] ces arènes seraient contemporaines de celles d'Arles qui dateraient elles-mêmes des premiers temps de la colonie fondée en 46 avant J.-C.

B. Époque romaine : Suisse.

Nous avons pu commencer, en 1951, des recherches archéomagnétiques en Suisse grâce au Prof. R. LAUR-BELART, directeur de l'Institut « für Ur-und Frühgeschichte der Schweiz », qui avait bien voulu nous accueillir sur son chantier de fouilles d'Augst, près de Bâle. Ouvert sur les restes de la ville romaine d'Augusta Rauracorum, ville construite sur l'ordre d'Auguste pour défendre la frontière du Rhin, ce chantier avait dégagé, dans un ordre impressionnant, toute la structure de la ville avec ses rues et ses maisons [67]. Dans certaines « chambres » de ces maisons se trouvaient plusieurs foyers construits à même le sol et dont la surface, de l'ordre du m², était formée de grandes tuiles plates, plus ou moins brûlées par l'usage. À côté de chaque foyer une énorme pierre, percée d'un trou vertical, semblait avoir été destinée à recevoir un support pour suspendre un objet au-dessus du feu. L'idée de R. LAUR-BELART était que les tuiles, fortement recuites, devaient porter

l'aimantation de l'époque d'abandon du foyer et constituer ainsi des terres cuites en place que nous recherchions. Nous avons fait des prélèvements d'échantillons orientés sur plusieurs de ces soles, et nous aurons l'occasion de dire, incidemment, ce qui en est résulté. Au cours de ce travail, assistant à la destruction des restes de murs de l'une des maisons, murs en pierre alternant avec des lits formés de tuiles placées deux à deux en sens inverse, nous avons pu recueillir un lot important de ces tuiles et prélever sur chacune un gros fragment conservant nettement les trois faces de la tuile. Cette série, qui nous a permis une détermination de l'inclinaison magnétique, nous a fourni aussi les éléments d'un travail important sur l'intensité.

Enfin, grâce à la bienveillance de M^{me} E. ETTLINGER, Conservatrice du Musée de Baden, et de M^{me} V. de GONZENBACH, Conservatrice du Musée de Brugg, nous avons pu étudier des tuiles provenant des cités romaines d'Aquae Helveticae et de Vindonissa et portant l'estampille des XXI^e et XI^e légions romaines. Ces légions n'ayant séjourné là qu'un petit nombre d'années (de 45 à 70 après J.-C., et de 70 à 100 respectivement) de telles estampilles correspondent à une véritable datation directe.

1. Tuiles romaines d'Augst.

Les murs qui nous ont fourni ces tuiles appartenaient à la « chambre » 45 (dans la nomenclature des fouilles) ; des échantillons numérotés de 1 à 10 ont été prélevés sur le mur qui séparait les chambres 45 et 46, et les suivants, de 11 à 21, sur celui séparant les chambres 45 et 23. La construction se situerait entre 150 et 200 après J.-C. d'après R. LAUR-BELART.

Quelques échantillons étant restés sur place par erreur, nous n'en avons reçu que 17 sur lesquels trois étaient trop faiblement aimantés ; notre détermination d'inclinaison, sur laquelle nous n'insisterons pas ici, a porté finalement sur 14 objets et nous a fourni la valeur 63°30. Ces tuiles avaient été cuites debout, dans des empilements soignés car la dispersion des inclinaisons est relativement faible ; ce fait constitue en même temps une preuve que la construction n'a pas été incendiée, ce qui est d'accord avec les observations archéologiques directes.

La recherche de l'intensité a porté sur 6 de ces tuiles numérotées 3, 5, 13, 15, 18 et 21, remarquables, comme toute la série d'ailleurs, par leur fraîcheur : elles sont fermes, sonores et ne présentent pas d'altérations en surface ou d'imprégnations. L'étude du trainage magnétique sur quatre d'entre elles (3, 5, 13 et 21) a donné une variation $\Delta M/M$ de 1,5 % pour une semaine seulement, M étant le moment initial. C'est un peu fort pour des terres cuites mais sans conséquences à craindre.

Ce travail a été effectué à l'Observatoire du Parc Saint-Maur ; les mesures sont faites maintenant à température constante et les recuits ont lieu dans un champ moins troublé qu'à Paris. Ce champ, à l'emplacement du four au cours de ces essais avait pour intensité $F = 0,464$ Oe.

Pour quatre des objets, l'étude a été conduite encore avec les étapes 100° 300° et 670°, une opération de contrôle à 300° étant faite entre les deux recuits à 670°. Nous avons fait remarquer que ce test ainsi placé permet de juger l'effet du recuit à 670° mais sans laisser de possibilité lorsqu'il est défavorable. Pour les deux derniers objets étudiés, les 18 et 21, nous avons fait une étape supplémentaire, à 585°, après laquelle a été effectué le test par recuit à 300°. Les tableaux 14 et 15 donnent, avec les notations habituelles, l'essentiel des résultats dans les deux cas.

TABLEAU 14

TUILES D'AUGST : MOMENTS RESTANTS ET ACQUIS EN U. E. M.

N°	M ₁₀₀	M ₃₀₀	M' ₁₀₀	M' ₃₀₀	M' ₆₇₀	M'' ₃₀₀	M'' ₆₇₀
—	—	—	—	—	—	—	—
3	1,210	1,074	0,030	0,122	0,820	0,177	0,777
5	7,208	4,994	0,429	1,948	5,140	1,939	5,165
13	4,110	1,782	0,284	1,707	2,843	1,667	2,873
15	1,469	0,822	0,116	0,569	1,111	0,568	1,102

TABLEAU 15

TUILES D'AUGST : MOMENTS RESTANTS ET ACQUIS EN U. E. M.

N°	M ₁₀₀	M ₃₀₀	M ₅₈₅	M' ₁₀₀	M' ₃₀₀	M' ₅₈₅	M'' ₃₀₀	M'' ₆₇₀	M'' ₆₇₀
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
18	2,879	1,834	0,013	0,133	0,738	1,749	0,731	1,696	1 660
21	1,912	1,315	0,082	0,083	0,494	1,337	0,507	1,338	1,327

Dans le premier groupe, l'échantillon n° 3 a subi une évolution marquée que montre la comparaison de M''₃₀₀ et M'₃₀₀ ; le recuit à 670° l'a rendu beaucoup plus magnétique au moins dans l'intervalle 300°-100°. Le second recuit à 670° l'a encore un peu modifié, en sens opposé d'ailleurs, ce qui est fréquemment observé. On pourrait, en discutant, conserver cet échantillon ; il est plus simple de l'abandonner, mais le fait de le conserver ne changerait pas la valeur finale F₀ de façon appréciable.

Les trois autres objets manifestent une stabilité remarquable, la comparaison, objet par objet, des valeurs M''₃₀₀ et M'₃₀₀ et des valeurs M''₇₀ et M'₆₇₀ montrant une constance excellente et même exceptionnelle.

Dans le second groupe, la stabilité serait bonne jusqu'à 585°, comme le montre l'accord des valeurs M'₃₀₀ et M''₃₀₀ ; au delà il y aurait une légère évolution avec diminution de la capacité d'aimantation ; en effet, pour la tuile 18, M'₆₇₀ est inférieur à M'₅₈₅ alors qu'il devrait lui être au moins égal, et pour la tuile 21, M'₆₇₀ est sensiblement égal à M'₅₈₅ alors qu'il devrait lui être un peu supérieur puisque

la désaimantation n'est pas complète à 585°. Dans ces conditions, il vaudra mieux calculer F_0/F pour ces deux objets dans des intervalles ne dépassant pas 585°.

Le tableau 16 contient les valeurs des rapports F_0/F , pour les cinq objets retenus, calculés dans les intervalles de température indiqués : 100°-300°, 300°-670° (ou 585°), et 100°-670° (ou 585°). Il contient en même temps les inclinaisons calculées sur l'aimantation brute (I_{20}) et sur les aimantations nettoyées à 100° et 300°.

TABLEAU 16

TUILES D'AUGST : RAPPORTS F_0/F ET INCLINAISON

N ^{os}	F_0/F			INCLINAISON AIMANT. ANCIENNE		
	100°-300°	300°-670°	100°-670°	I_{20}	I_{100}	I_{300}
5	1,46	1,56	1,53	64° 45	65° 30	67° 0
13	1,64	1,57	1,60	59° 15	59° 45	59° 15
15	1,43	1,52	1,48	57° 15	54° 45	54° 45
18	1,73	1,81	1,78	70° 45	70° 30	70° 45
21	1,45	1,46	1,46	68° 30	68° 30	67° 45

Les deux critères indirects de stabilité minéralogique pour chaque objet, d'une part l'égalité des valeurs F_0/F dans les différents intervalles de température, d'autre part l'égalité des inclinaisons I_{100} et I_{300} , sont satisfaits d'une manière acceptable. De plus, la dispersion des rapports F_0/F d'un objet à l'autre reste modérée. Étant données les causes de dispersion, nous pensons qu'il est difficile de trouver une série d'objets plus cohérente et par suite plus sûre. Finalement, les valeurs moyennes des quotients F_0/F pour chaque colonne étant respectivement 1,54, 1,58 et 1,57, nous pourrions retenir le dernier nombre, obtenu sur l'intervalle maximum de température ; l'intensité F étant, durant ces essais, 0,464 Oe, l'intensité approchée du champ dans la région de Bâle, vers 175 après J.-C., est 0,73 Oe. A ce nombre nous associerons l'inclinaison 63°30 obtenue à partir de tous les échantillons du lot.

2. Tuiles légionnaires d'Aquae Helvetiae et Vindonissa.

Nous disposons de onze tuiles portant la marque de la XXI^e légion et de neuf portant celle de la XI^e légion recueillies sur le site d'Aquae Helvetiae, et de dix-sept tuiles appartenant presque toutes à la XXI^e légion recueillies sur le site de Vindonissa. Notre but était la détermination de l'inclinaison magnétique vers les dates moyennes d'occupation, 60 et 85 après J.-C., correspondant à chaque légion. Or, nous eûmes la surprise de constater des comportements très différents des trois lots de tuiles :

— celles de la 11^e légion, envoyées de Baden, et celles de la 21^e légion envoyées

de Brugg, se comportaient normalement, donnant des valeurs raisonnables de l'inclinaison en les supposant cuites debout.

— celles de la 21^e légion, envoyées de Baden, étaient pour la plupart peu aimantées et, sur les 7 mesurables, si 4 donnaient bien des valeurs raisonnables, comprises entre 60° et 67°, dans l'hypothèse d'une cuisson debout, les trois autres donnaient des valeurs sans signification; fait curieux et peut-être fortuit, toutes les trois conduisaient à des valeurs voisines de 60° si on les supposait cuites à plat. Fallait-il supposer que ces tuiles avaient été cuites ou recuites ainsi? Fallait-il penser qu'il s'agissait d'objets fortement réchauffés dans l'incendie de la construction dont elles provenaient, sort qu'ont connu évidemment beaucoup de tuiles romaines? Nous avons essayé d'en décider en utilisant notre méthode de recuits progressifs qui peut fournir en même temps une mesure d'intensité.

Nous avons choisi trois tuiles: l'une, si l'on veut normale, portant le n° 10, et les deux autres anormales portant les n°s 6 et 9. Ces deux dernières ont révélé une aimantation composite, difficile à interpréter d'ailleurs, mais ne permettant pas une détermination d'intensité de champ. La première seule nous intéressera ici.

Les recuits ont été conduits en même temps que ceux des vases puniques dans un champ de 0,450 Oe. Les étapes du recuit étaient de 50° en 50° à partir de 100°. Un recuit de contrôle de stabilité, à 350°, a été effectué après celui de 550° qui était le dernier, le « plafond » du four étant à peine 600°. Le tableau 17 donne les résultats des mesures: d'une part les valeurs, toujours en u. e. m., des composantes X, Y, Z du moment M initial ou restant après recuit à chaque température t , et l'inclinaison I_1 de cette aimantation nettoyée, d'autre part le moment nouveau

TABLEAU 17

TUILE BADEN N° 10 (21^e LÉGION)

t	MOMENT RESTANT					MOMENT ACQUIS			
	Z	Y	X	M	I_1	Z'	Y'	X'	M'
20°	1,153	0,257	2,571	2,830	65° 15	—	—	—	—
100°	1,068	0,248	2,507	2,736	66° 30	0,081	0,009	0,073	0,109
150°	1,009	0,230	2,306	2,528	65° 45	0,213	0,040	0,158	0,265
250°	0,827	0,172	1,854	2,037	65° 30	0,462	— 0,003	0,293	0,547
300°	0,670	0,180	1,658	1,797	67° 15	0,606	— 0,003	0,393	0,722
350°	0,512	0,134	1,328	1,430	68° 15	0,812	— 0,031	0,573	0,994
404°	0,420	0,103	1,061	1,146	67° 45	0,950	— 0,026	0,632	1,141
450°	0,196	0,026	0,588	0,620	71° 30	1,224	— 0,026	0,868	1,500
500°	0,020	0,003	0,056	0,059	—	1,491	— 0,003	0,950	1,768
550°	0,001	0,000	0,036	0,036	—	1,486	0,000	0,948	1,763
350°	—	—	—	—	—	0,784	0,000	0,501	0,930

acquis, $M'_{(t, F, 20^\circ)}$ entre t et 20° . Les axes Ox , Oy , Oz sont dirigés respectivement suivant la longueur, la largeur et l'épaisseur de la tuile.

On peut observer d'abord que l'aimantation initiale est unique ; en effet, si on calcule les cosinus directeurs du moment restant après chaque recuit à t , on observe qu'ils ne varient pas de façon significative ; il en est de même de I_t , inclinaison du moment restant lorsque la tuile est debout. Le test de contrôle

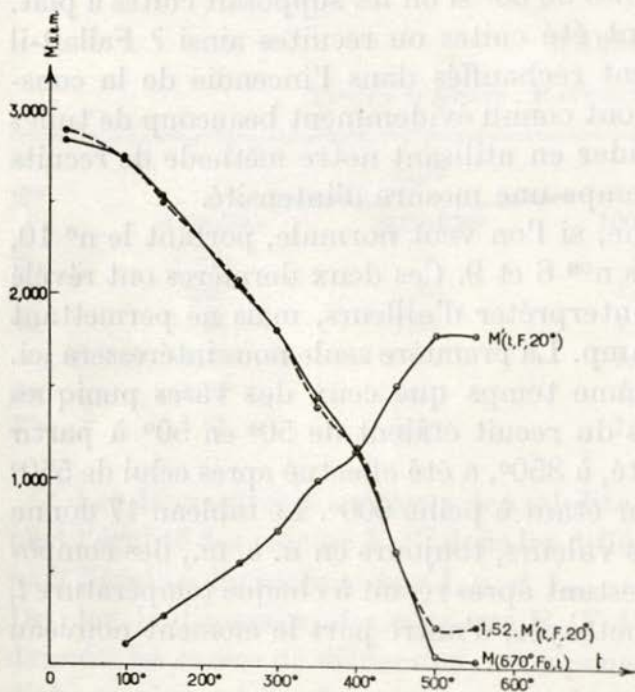


FIG. 3. — Courbes d'aimantation et de désaimantation : tuile Baden N° 10.

retrouver la déclinaison et l'inclinaison à l'époque d'abandon des fours. Mais nous gardions une inquiétude : encore fallait-il en effet que les foyers aient été assez puissants pour avoir réchauffé, du haut vers le bas, toute l'épaisseur de la sole, condition nécessaire pour que les tuiles aient une aimantation unique acquise dans leur position actuelle, sans reste de l'aimantation primitive qu'elles avaient acquise dans le four de cuisson. De fait notre crainte était justifiée et nous obtinmes des valeurs assez dispersées pour les déclinaisons et les inclinaisons de l'aimantation des différents échantillons d'une même sole. On pouvait songer à analyser les aimantations au moyen de recuits progressifs pour séparer le reste de l'aimantation originelle de l'aimantation provoquée par l'activité des foyers. Une difficulté se présente, c'est l'extrême hétérogénéité du recuit ; en effet dans chaque tuile les différentes couches ont été portées à des températures maximums différentes et décroissantes depuis la pellicule supérieure certainement chauffée au

par recuit à 350° montre une évolution déjà nette à 550° ; cette évolution apparaît bien sur les courbes de la figure 3 tracées comme dans l'exemple de la poterie punique et représentant, en fonction de t , la variation de M et celle, inversée, de kM' , k étant le rapport d'ajustage, ici 1,52.

La tuile Baden 10 conduit finalement à une valeur de l'intensité F_0 du champ ancien de $0,450 \times 1,52$ soit 0,68 Oe.

3. Soles de foyer à Augst.

Nos prélèvements d'échantillons orientés avaient été faits de la façon habituelle sur cinq foyers des chambres n°s 43, 45, 46. En tout nous avons recueilli 27 échantillons d'après lesquels nous espérons

dela du point de Curie effectif de la terre cuite, jusqu'à la partie inférieure en contact avec le sol.

Cependant, nous avons noté que certaines tuiles paraissaient avoir été plus fortement chauffées que d'autres ; les mesures donnent pour celles-là des valeurs de D et I proches de celles qu'on peut attendre pour l'époque romaine en Suisse. Nous avons voulu vérifier que l'aimantation était bien unique dans ce cas, et pour

TABLEAU 18

TUILE N° 25 PROVENANT D'UNE SOLE DE FOUR A AUGST

t	MOMENT RESTANT					MOMENT ACQUIS
	X	Y	Z	M	I_t	M'
20°	0,482	0,280	0,916	1,072	58° 45	—
100°	0,451	0,277	0,868	1,017	58° 30	0,065
200°	0,401	0,237	0,770	0,900	59° 0	0,138
250°	0,374	0,213	0,718	0,837	59° 0	0,170
300°	0,357	0,182	0,655	0,768	58° 30	0,239
350°	0,318	0,165	0,594	0,694	58° 45	0,276
400°	0,294	0,153	0,552	0,644	59° 0	0,347
450°	0,236	0,146	0,461	0,538	59° 0	0,453
550°	0,075	0,020	0,136	0,157	60° 30	0,903
670°	—	—	—	—	—	0,913
350°	—	—	—	—	—	0,247

cela nous avons recuit (four électrique, $F = 0,464$ Oe) un fragment portant le n° 25 dans notre nomenclature et provenant du four n° 31 qui aurait été actif vers 70-80 après J.-C. Les résultats sont résumés dans le tableau 18.

En ce qui concerne la direction du moment restant, les conclusions sont les mêmes que pour la tuile Baden 10 avec une constance encore plus grande de I_t . L'analyse des variations de M et M' révèle une évolution minéralogique précoce qui conduit à ne pas dépasser 350° pour la recherche de F_0 . On obtient la valeur 0,69 Oe environ.

Les deux dernières déterminations, sur la tuile légionnaire et le fragment de sole, nous intéressent davantage comme des sortes de jeux archéologiques que comme de véritables mesures d'intensité du champ passé, mesures dans lesquelles nous exigeons un dernier contrôle par accord des valeurs obtenues sur différents objets de même provenance. Cependant, elles confirment encore les résultats antérieurs : pour l'époque romaine, dans nos régions, nous trouvons toujours un même ordre de grandeur pour F_0 dans les conditions expérimentales les plus variées.

C. Époque punique : Carthage.

1. Parois de fours puniques du 2^e siècle avant J.-C.

En 1950, P. CINTAS engagé dans une brillante campagne de fouilles puniques [22] eut l'idée de nous proposer, outre l'étude magnétique de poteries, celle aussi de parois de fours de potiers à Carthage. Nous pûmes ainsi recueillir des échantillons orientés sur trois fours : deux fours puniques datant de la chute de Carthage (146 avant J.-C.) et un four romain de date plus incertaine (vers 300 après J.-C.). Sur des lots importants d'échantillons, nous avons pu faire une détermination, que nous considérons comme très précise, de la déclinaison et de l'inclinaison magnétiques aux deux époques [123] ; nous nous sommes attaqués ultérieurement à l'intensité du champ.

Nous avons limité notre travail aux deux fours puniques, les plus anciens et de surcroît les mieux datés. L'étude a porté sur six échantillons retaillés, en forme de parallélépipèdes, d'une part dans deux des blocs orientés les plus volumineux, ceux portant les n^{os} 15 et 16, d'autre part dans quatre gros fragments, non orientés, que nous avons recueillis à cette fin. La matière des parois de ces fours est une terre cuite assez homogène, très fraîche d'aspect et non souillée de matière organique, mais relativement poreuse et friable. Grâce à notre mode de prélèvement, avec enrobage de plâtre, cette fragilité ne nous avait pas gênés dans les mesures relatives à la direction. Mais pour des échantillons à recuire, nous avons dû chercher un enrobage résistant, qui ne réagisse pas à chaud sur la terre cuite et qui ne s'aimante pas. Nous avons choisi pour cela un matériau que nous a aimablement fourni la Société d'Études et de Conseils pour Appareillage réfractaire, le SECAR 250. Les recuits ont eu lieu dans un four électrique au Parc St-Maur ($F = 0,464$ Oe) ; les étapes de température étaient en principe de 100° en 100° avec contrôle 300°-20° à chaque étape à partir de 400° ; mais ce programme n'a été accompli que partiellement car, malgré leur carapace, les échantillons n'ont pas résisté mécaniquement jusqu'au recuit à 670°. L'essentiel des résultats des mesures est donné dans le tableau 19.

La pureté de l'aimantation originelle est incontestablement démontrée par la stabilité remarquable de la direction de l'aimantation restante après chaque recuit dont on pourra juger en comparant, pour chaque objet, les valeurs de I ; comme les échantillons ont été retaillés, I n'est pas à proprement parler une inclinaison magnétique, c'est l'inclinaison du moment restant sur une face de l'objet.

La comparaison, objet par objet, des valeurs successives de l'aimantation M' acquise entre 300° et 20° montre une évolution minéralogique nette pour chacun et systématique. Ces terres cuites évoluent en devenant plus magnétiques de sorte que les valeurs de F_0/F , obtenues dans les intervalles croissants de température,

TABLEAU 19

PAROIS DE FOURS PUNIQUES (CARTHAGE)

t	15			16			C		
	M	I	M'	M	I	M'	M	I	M'
100°	0,804	59° 15	0,026	1,108	57° 45	0,059	0,824	58° 15	0,022
200°	0,741	59° 0	0,078	1,008	57° 30	0,122	0,748	58° 30	0,070
300°	0,610	59° 0	0,166	0,701	58° 0	0,316	0,623	58° 0	0,155
400°	0,408	59° 30	0,301	0,374	58° 0	0,546	0,436	58° 30	0,286
300°			0,179			0,364			0,171
500°	0,065		0,538	0,081		0,781	0,190		0,485
300°			0,190			0,383			0,187
600°							0,016		0,612
300°									0,192

t	A			B			D		
	M	I	M'	M	I	M'	M	I	M'
100°	1,256	59° 15	0,057	0,675	57° 15	0,028	1,434	58° 45	0,046
200°				0,602	57° 0	0,076	1,322	59° 30	0,111
300°	0,945	60° 15	0,269	0,483	57° 30	0,148	1,150	59° 45	0,216
400°	0,602	59° 15	0,515	0,321	56° 45	0,267	0,814	59° 45	0,416
300°			0,329			0,151			
500°				0,116		0,435	0,236		0,813
300°						0,162			0,288
670°							0,0		0,985
300°									0,341

doivent aller en diminuant. Le tableau 20 montre qu'il en est bien ainsi. D'après les valeurs moyennes, l'évolution n'est pas encore très marquée à 400°, et il semble raisonnable de retenir la valeur 1,54 correspondant à 300°. La dispersion des valeurs de F_0/F , d'un objet à l'autre, est acceptable et de l'ordre de celle que nous avons trouvée antérieurement.

TABLEAU 20

VALEURS DE F_0/F POUR DES ÉCHANTILLONS DE PAROIS DE FOURS PUNIQUES

INTERVALLES DE TEMPÉRATURE	15	16	C	A	B	D	MOYENNES
100°-300°	1,39	1,58	1,51	1,47	1,60	1,67	1,54
100°-400°	1,44	1,51	1,47	1,42	1,48	1,68	1,50
100°-500°	1,44	1,42	1,37		1,37	1,56	1,43

Ainsi, l'intensité du champ terrestre vers le milieu du 2^e siècle avant J.-C., en Tunisie du Nord, aurait été de $0,464 \times 1,54$ soit $0,71$ Oe ; l'inclinaison magnétique était alors voisine de 58° et la déclinaison de $0^\circ 30'$ W d'après nos mesures antérieures.

2. Poteries puniques.

Le sanctuaire de Tanit, à Carthage, renferme des dizaines de milliers de vases à sacrifice disposés par couches superposées ; d'après P. CINTAS, les plus profonds seraient du 8^e siècle avant J.-C. et les plus superficiels de l'époque de la ruine de Carthage [22]. Admettant que ces poteries puissent fournir l'inclinaison magnétique, en les supposant cuites placées verticalement, on pouvait espérer retrouver la marche de cet élément entre les deux époques, soit sur plus de six siècles. Nous avons pris l'un de ces vases comme exemple, dans notre étude des méthodes pour la recherche de l'intensité, et nous avons donné quelques indications sur l'ensemble de nos résultats relatifs à ces poteries. Cette étude intéresse plutôt l'archéologie et l'art céramique ; nous en extraierons seulement ce qu'on peut en déduire sur l'intensité du champ terrestre.

Ces poteries étaient trop volumineuses pour nos fours électriques, les recuits ont eu lieu dans un four à gaz installé dans l'atelier de l'Observatoire du Parc St-Maur. Ce four, constitué par des cylindres de terre cuite empilés, nous avait été confié par l'Institut de Céramique de Sèvres dont les Directeurs, M. DE GROOTE puis M. MENNERET, nous ont inlassablement apporté l'aide aimable de leur compétence et de leurs moyens techniques. Les étapes des recuits ont été nombreuses, de 50° en 50° , l'atmosphère du four, plus ou moins bien définie, était de l'air en principe. Nous avons étudié ainsi quatre vases dont nous examinerons successivement le comportement.

a. — Vase n^o 13 dans notre nomenclature. Nous l'avons recueilli sur la fouille dans la couche inférieure. Il est de forme rustique, blanc-gris, sans colorations céramiques ajoutées ; P. CINTAS le considère comme étant du 8^e au 7^e siècle avant J.-C. C'est celui que nous avons pris comme exemple ; nous avons vu qu'il portait une aimantation unique, au moins après nettoyage thermique un peu au-dessus de 100° . Cette aimantation acquise lors de sa cuisson correspond à un champ d'intensité $0,77$ Oe. Jusqu'ici nous n'avons aucune indication sur l'inclinaison du champ à l'époque correspondante.

b. — Vase n^o 15. Nous l'avons recueilli dans la même couche. Il est très différent du précédent ; de forme plus soignée, de pâte plus fine, il porte des colorations : une bande marron et deux filets verts. Si on le supposait cuit debout, ouverture en haut, l'inclinaison du champ qu'on en déduirait serait -78° ; dans les mêmes conditions le vase n^o 13 donnerait -32° ; c'est la difficulté que nous avons signalée. La désaimantation par recuits progressifs que nous avons effec-

tée révèle deux discontinuités correspondant aux températures 250° et 405° ; nous pensons que le vase a été recuit à 405° puis une nouvelle fois à 250° pour y fixer les colorations. Quoi qu'il en soit l'aimantation se compose de trois vecteurs d'orientations différentes : l'un acquis entre 670° et 405°, l'autre entre 405° et 250° et le 3^e entre 250° et 100°. Pris indépendamment, ces trois vecteurs ont des inclinaisons comparables : de même signe, d'ailleurs négatif, et de valeurs 75°, 75° et 60° (il faut bien observer que chaque vecteur n'étant qu'une fraction de l'aimantation totale se trouve évidemment moins bien défini que lorsqu'il s'agit d'une aimantation unique). Si l'on admet, ce que laissent prévoir tous les résultats paléomagnétiques, que l'inclinaison était directe, le vase aurait été cuit, puis recuit, ouverture en bas, ce qui est fréquent. On peut rechercher l'intensité approchée du champ ayant provoqué chacun des vecteurs aimantation ; nous avons trouvé ainsi les valeurs 0,85, 0,60 et 0,78 Oe ; étant données les erreurs à craindre sur une telle détermination, portant elle aussi sur des fragments d'aimantation, on peut dire que ces intensités sont du même ordre de grandeur et aussi de l'ordre de grandeur de l'intensité qu'on observe à cette époque dans de meilleures conditions. Ici encore, nous sommes plutôt en présence d'une devinette archéologique à résoudre, au contraire, en se servant de ce qu'on croit savoir sur la direction et l'intensité du champ passé ; mais nous avons encore la satisfaction de trouver un ensemble de faits cohérents avec l'idée d'intensité forte du champ dans le lointain passé historique.

c. — Vase n° 50. Il serait plutôt d'après P. CINTAS du 7^e au 6^e siècles. C'est un vase ventru, assez altéré et semblant avoir possédé une bande colorée. Celui-là nous intrigue et nous ne pouvons mieux faire que de donner les résultats de son étude. Le tableau 21 donne, toujours en u. e. m., les valeurs : des trois composantes du moment restant après recuit à t (Z, suivant l'axe du vase ; X et Y suivant deux directions « horizontales » choisies arbitrairement), de ce moment M, et du moment nouveau M' acquis entre t et 20° dans le champ $F = 0,450$ Oe.

Le recuit de contrôle à 350° montre une évolution ; à ce moment le vase était devenu plus magnétique, au moins pour l'A. T. R. prise entre 350° et 20° ; la prolongation de la chauffe le rend à la fin moins magnétique pour l'A. T. R. totale puisque $M'_{(600^\circ, F, 20^\circ)}$ est inférieur à $M'_{(580^\circ, F, 20^\circ)}$. Là n'est pas la difficulté, car il suffirait de ne s'intéresser qu'aux températures modérées. Mais si l'on détermine le rapport F_0/F pour ces températures, on trouve un nombre élevé, supérieur à 2, conduisant à une valeur de F_0 de 1 Oe environ, valeur en désaccord avec l'ensemble des résultats acquis. Si, par comparaison avec ces résultats, on juge cette valeur anormalement forte, il semble difficile d'imaginer que cela résulte d'une modification minéralogique subie au cours des temps ; on ne peut pas songer non plus à l'expliquer par une composition d'A. T. R., dues à des recuits importants comme dans le cas du vase 15 précédent, une telle composition ne pouvant amener qu'une

TABLEAU 21

POTERIE PUNIQUE N° 50

t	MOMENT RESTANT				MOMENT
	X	Y	Z	M	ACQUIS M'
—	—	—	—	—	—
20°			0,267	1,143	
100°	1,003	0,517	0,200	1,146	0,048
150°	0,973	0,502	0,175	1,109	0,067
200°	0,917	0,489	0,183	1,055	0,105
250°	0,848	0,458	0,182	0,981	0,131
300°	0,773	0,428	0,149	0,896	0,161
350°	0,687	0,381	0,151	0,800	0,210
480°	0,112	0,035	0,092	0,149	0,494
580°	0,003	0,000	0,018	0,018	0,696
350°					0,267
600°	0,015	0,012	0,030	0,036	0,637

diminution du moment initial, donc une réduction de F_0 déterminé. Il semble d'un autre côté, que le moment (même après nettoyage à 100°, ou à 150°, pour éviter les effets du recuit lors du sacrifice) n'est pas une A. T. R. pure d'après la comparaison des courbes de variation de M et M'. Nous avons bien une hypothèse, mais que nous osons à peine avancer, c'est que ce vase se serait trouvé à un certain moment dans un endroit foudroyé et qu'il aurait reçu une A. R. I. relativement importante. A la vérité, nous aurions préféré ne pas le rencontrer !

d. — Vase portant le n° 247 dans la nomenclature de P. CINTAS qui le considère comme plus récent que les précédents (5^e-4^e siècles). Par désaimantation progressive son comportement (toujours après nettoyage à 100° ou 150°) est très régulier comme on peut le voir d'après le tableau 22. Son aimantation est unique, les trois cosinus directeurs de la direction de son moment demeurant constants tout au long des recuits, et les courbes de M et M' en $f(t)$ étant à peu près identiques. La stabilité des rapports F_0/F est bonne ; on peut retenir 1,68 pour valeur de ce rapport ce qui donne $0,450 \times 1,68$, soit 0,76 Oe environ pour F_0 . Là encore nous n'avons aucune indication sur la valeur de l'inclinaison magnétique à l'époque correspondante.

Pouvons-nous tirer quelque conclusion de cette étude d'intensité sur les poteries puniques ? Bien entendu, il n'est pas question de faire état de leurs différences d'âge et de comparer les valeurs de F_0 pour chacun. Même pris dans leur ensemble, ils constituent un lot réduit à deux cas clairs, trois si l'on conserve le n° 15. Nous n'en retiendrons qu'une indication : nous avons trouvé pour F_0 une

TABLEAU 22
POTERIE PUNIQUE N° 247

i	MOMENT RESTANT					MOMENT ACQUIS
	X	Y	Z	M	arc cos $\frac{X}{M}$	M'
—	—	—	—	—	—	—
20°			— 0,094	2,178		
100°	2,042	0,677	— 0,165	2,158	18° 45	0,105
150°	1,961	0,647	— 0,188	2,073	19° 0	0,150
200°	1,780	0,538	— 0,175	1,868	17° 45	0,310
250°	1,504	0,468	— 0,172	1,584	18° 15	0,441
300°	1,219	0,391	— 0,104	1,284	18° 15	0,639
350°	0,982	0,298	— 0,073	1,029	17° 30	0,766
450°	0,429	0,128	0,000	0,448	16° 45	1,107
500°	0,126	0,065	0,011	0,142		1,323
350°						0,738
600°	0,002	0,021	0,015	0,026		1,377

valeur de l'ordre de 0,71 Oe vers le milieu du 2^e siècle avant J.-C. ; il nous semble qu'antérieurement, disons quelques siècles avant, cette valeur était encore supérieure (peut-être vers 0,76 Oe). Nous aurions dû semble-t-il essayer de préciser ce point en étudiant d'autres poteries ; de fait, nous gardons l'espoir de pouvoir, tôt ou tard, prospector des fours puniques anciens d'Afrique du Nord, et cette étude enlèverait tout intérêt à celle des poteries, au moins en ce qui concerne l'archéomagnétisme. En effet, non seulement les parois de fours nous fournissent aussi la direction du champ, comme nous l'avons souligné déjà, mais de plus on est à peu près sans inquiétude sur leurs tribulations thermiques ultérieures et surtout on connaît d'une manière absolue le lieu de cuisson alors que les poteries peuvent avoir été transportées. A plusieurs reprises, P. CINTAS a attiré notre attention sur la possibilité de trouver sur des sites puniques des vases anciens apportés d'Orient par des immigrants ou vendus loin de leur lieu de fabrication. Enfin les poteries sont plus difficiles à dater que les fours dont la durée d'utilisation est généralement très courte, l'artisan céramiste préférant bâtir un nouveau four plutôt que de reconstruire celui qui se disloque.

D. Conclusions en ce qui concerne le passé historique.

Beaucoup de nos essais ont surtout servi à déblayer le chemin qui doit mener à la connaissance de la variation de l'intensité du champ terrestre ; mais on peut tenter déjà de résumer et d'interpréter nos résultats tout partiels qu'ils soient.

Bien entendu, comme toujours en archéomagnétisme, nous nous trouvons en présence d'un problème de variation à la fois dans le temps et dans l'espace. Nous avons essayé de préciser plutôt la première fonction en serrant nos investigations sur une portion très limitée du Globe, bien qu'il y ait encore loin de Lille à Tunis où les intensités du champ actuel diffèrent déjà notablement : 0,47 et 0,43 Oe. Le tableau 23 résume nos résultats complétés, pour les époques récentes, par des valeurs obtenues à partir des mesures directes [76, 75].

TABLEAU 23

LIEU	ÉPOQUE	I	F ₀ en Oe	NATURE DES MESURES
Paris	1955	64° 36	0,464	Directes d'observatoire.
Paris	1930	64° 35	0,459	» »
Paris	1885	65° 19	0,463	» »
Paris	1848	66° 45	0,471	Directes sommaires.
Versailles...	1750	74° 0	> 0,48	Archéomagnétiques.
Lille	1460	63° 0	0,56	»
Paris	300	62° 15	0,70	»
Bâle	175	63° 30	0,73	»
Fréjus	0	60° 30	0,65	»
Carthage	— 146	58° 0	0,71	»
Carthage ...	— 600		0,76	»

Si nous pouvions supposer que la structure du champ terrestre moyen, à une époque donnée, était celle d'un doublet centré, et si la variation séculaire se réduisait à un déplacement de cette structure avec changement de la valeur M du moment du doublet, tout serait simple : l'intensité F₀, proportionnelle à M, serait une fonction de l'inclinaison magnétique : $F_0 = \frac{2M}{R^3 \sqrt{1 + 3 \cos^2 I}}$. Partant

de là on pourrait corriger les valeurs de F₀ pour les ramener à une même inclinaison et, au cours du temps, la variation de F₀ à I constant mesurerait la variation du moment du doublet, c'est-à-dire du moment général du Globe. C'est cette idée, un peu en sourdine, qui nous a conduits, quand nous le pouvions, à associer à chaque valeur de l'intensité que nous trouvions celle de l'inclinaison à l'époque et au lieu correspondants. Corrigeant ainsi les valeurs F₀ du tableau 23 pour les ramener à l'inclinaison arbitraire 65°, on obtient :

ÉPOQUES...	1955	1930	1885	1848	1750	1460	300	175	0	— 146
F ₀ en Oe...	0,466	0,461	0,462	0,460	> 0,43	0,57	0,73	0,74	0,69	0,78

Le résultat est impressionnant : le moment total du Globe aurait décré continuel-

lement depuis l'époque punique, presque linéairement ⁽¹⁾ et fortement ; au début de l'ère chrétienne ce moment aurait été environ les 5/3 de ce qu'il est actuellement.

Malheureusement, le champ terrestre de surface diffère nettement du champ élémentaire de GAUSS et, à une époque donnée, il n'y a pas de relation simple entre l'inclinaison magnétique et l'intensité. Par exemple, l'intensité n'est pas constante sur une isocline donnée ; ainsi, d'après les cartes magnétiques mondiales de la Carnegie Institution pour l'époque 1945,0 [129] les valeurs, en Oe, sur l'isocline 65°, en des points écartés en longitude de 20° en 20° vers l'Est et vers l'Ouest respectivement, sont les suivantes :

0°	20°	40°	60°	80°	100°	120°	140°	160°	180°
0,460	0,468	0,484	0,515	0,550	0,571	0,570	0,538	0,503	0,492
180°	160°	140°	120°	100°	80°	60°	40°	20°	0°
0,492	0,489	0,510	0,535	0,543	0,525	0,498	0,474	0,463	0,460

De plus, de siècle en siècle, la structure du champ se déforme et il est possible que sa répartition au cours des temps historiques se soit écartée de celle d'un champ de dipôle plus encore qu'elle ne le fait actuellement. Dans ces conditions, la connaissance des changements de F_0 dans une région ne renseignerait plus du tout sur celle du moment général du Globe. D'ailleurs, celui-ci, le moment de GAUSS, s'il est bien défini et s'il détermine bien le champ très loin du Globe, n'a d'intérêt pour calculer le champ de surface que dans la mesure où ce champ est justement voisin de celui d'un dipôle ; par exemple, deux doublets antiparallèles pourraient donner un champ fort à la surface de la Terre avec un moment général nul.

Mais nous en venons ainsi à déchirer nos propres résultats ! Revenons sur une position intermédiaire, car le champ actuel est tout de même très grossièrement un champ de dipôle. Écartons la possibilité qu'en quelques millénaires il ait pu avoir une allure très différente en observant que tout le paléomagnétisme, dans ses développements actuels, repose sur l'idée que la variation séculaire n'est qu'une fluctuation d'un champ moyen dipôle très lentement variable. Alors, à l'échelon des temps historiques qui est le nôtre, nous pensons que nos résultats, tels qu'ils sont, sont la preuve d'une diminution massive du moment magnétique du Globe, au moins durant les deux derniers millénaires. Bien entendu, il serait désirable que le fait soit confirmé par des observations dans des régions éloignées du champ actuel de nos recherches ; des pays de vieille civilisation comme l'Inde ou la Chine devraient en donner la possibilité. Le but final reste le tracé de cartes d'intensité à différentes époques, mais nous n'en sommes pas encore là.

⁽¹⁾ Des études archéologiques très récentes améliorent encore ce résultat. D'après J. M. DUVAL, les Thermes de Cluny seraient non de 300 mais plutôt d'environ 200 et, d'après P. A. FÉVRIER, l'Amphithéâtre de Frejus serait à rajeunir de près de 200 ans (vers 200 après J.-C. et non 0).

E. Discussions en relation avec nos résultats.

A cette décroissance quasi-régulière de l'intensité du champ terrestre, sur plus de deux mille ans, que nous sommes conduits à affirmer, sont liés deux problèmes très discutés que nous voudrions au moins évoquer : celui de la décroissance du moment de GAUSS déduite des mesures magnétiques directes et celui de la validité des applications archéologiques du carbone 14.

1. Désaimantation du Globe d'après BAUER.

Le moment magnétique M de GAUSS (ou ce qui revient au même l'intensité $H_0 = \frac{M}{R^3}$ sur l'équateur géomagnétique), ayant été déterminé par des analyses du champ observé à différentes époques depuis 1830 environ, la comparaison des résultats doit montrer s'il y a ou non évolution ; les discussions de L. A. BAUER à ce sujet sont bien connues. Dès 1903, comparant les analyses les plus anciennes et celles relatives à 1885, il observait une décroissance puissante [7] au taux « alarmant » de $1/2580$, qui faisait passer H_0 de $0,3281$ Oe en 1838 à $0,3229$ Oe en 1884. Comme il s'agit là du champ régulier, partie seulement du champ total, il tente une comparaison des énergies correspondant à tout le champ et trouve une diminution encore plus grande. Passons sur son étude de 1914, conduite à partir de la notion de constante magnétique locale G qu'il avait introduite ; nous retrouvons un travail de 1928 [8] où, utilisant les résultats d'analyses récentes, l'auteur peut faire porter sa comparaison sur 80 années environ ; la décroissance subsiste avec un taux moyen annuel de $1/1500$ qui continue à l'intriguer beaucoup. Depuis lors, plusieurs analyses nouvelles ont été effectuées, au moins celles de H. S. JONES et P. J. MELOTTE [59] pour 1942, celles de E. H. VESTINE [130], de V. I. AFANASIEVA [1] et de S. K. CHAKRABARTY [18] toutes les trois pour 1945, enfin celle très récente de H. F. FINCH et B. R. LEATON [34] pour 1955. Remarquons d'abord que les résultats relatifs à une même époque continuent à présenter une dispersion importante qui nous paraît provenir surtout de ce que les analyses portent sur des cartes magnétiques établies avec des données différentes ; cette observation doit inciter à beaucoup de prudence dans les comparaisons avec des résultats d'analyses anciennes faites à partir de réseaux magnétiques très incomplets ⁽¹⁾. Par exemple, pour ce qui concerne la direction de l'axe géomagnétique, il est remarquable que tous les pôles d'analyses postérieures à la première année polaire sont dispersés sur une petite surface [117] dans laquelle on trouve emmêlés aussi bien

(1) La comparaison serait probablement plus intéressante si elle portait sur des analyses faites à la manière de GAUSS et, en particulier, avec les valeurs du champ correspondant aux 84 points qu'il avait choisis.

les pôles pour 1885 que ceux pour 1945 ; contrairement à l'opinion courante, il nous paraît impossible de parler d'un déplacement défini du pôle actuel de GAUSS. Mais, pour ce qui concerne la valeur du moment, l'ampleur de la variation est très supérieure à la dispersion. Ainsi, les valeurs moyennes de H_0 sont respectivement 0,3134 Oe en 1922 (deux analyses) et 0,3103 Oe en 1945 (cinq analyses). Par conséquent, le moment de GAUSS du Globe continuerait à diminuer, assez régulièrement. Une opinion contraire s'était répandue ces dernières années ; elle est infirmée par une étude récente de T. NAGATA et T. RIKITAKE [83].

Dès notre première publication [120] d'une mesure d'intensité antérieure à toute mesure directe, l'idée d'une forte décroissance du moment terrestre se trouvait étendue à cinq siècles. Nos résultats nouveaux, couvrant maintenant plus de deux millénaires, confirmeraient, avec toutes les restrictions que nous avons faites, ce fait considéré déjà comme singulier alors qu'il ne s'appliquait qu'à moins d'un siècle.

Signalons en terminant l'accord curieux de nos résultats avec ceux avancés par N. STROYKO d'après une étude sur les relations entre la variation séculaire magnétique et les variations de la vitesse de rotation de la Terre [107]. L'auteur prévoit une évolution séculaire qui entraînerait dans nos régions une diminution de F_0 à un taux de 17 γ par an, de l'ordre de grandeur de celui que nous trouvons. En réalité, tout en jugeant fort intéressant le principe d'une telle étude, nous sommes, comme L. CAGNIARD [17], très réservés sur les bases mêmes du travail, surtout en ce qui concerne les faits magnétiques.

2. Datation archéologique par le Carbone 14.

Pour les physiciens archéologues utilisant le Carbone 14, l'idée de variation du moment magnétique de la Terre apparaît un peu comme diabolique ; pour le moins, elle jette un doute sur l'exactitude de la datation au carbone radioactif. Cette méthode, qui résulte des travaux universellement connus de W. F. LIBBY et son école [70] et qui a maintenant de très importants développements, suppose que la production mondiale ^{14}C , résultant du bombardement d'atomes d'azote par les neutrons du rayonnement cosmique, est constante. Or il faut pour cela que le champ magnétique de la Terre, qui agit sur le rayonnement cosmique primaire, soit lui-même constant dans son ensemble. Aussi, plusieurs auteurs se sont-ils inquiétés récemment de nos premiers résultats archéomagnétiques [33, 50, 5, 24]. S'aidant de quelques hypothèses et simplifications, W. ELSASSER, E. P. NEY et J. R. WINKLER [33] se sont attaqués au problème difficile qui consiste à passer des changements du champ terrestre, aux changements de la production d'atomes ^{14}C , puis aux changements de leur concentration dans l'atmosphère et finalement aux erreurs possibles de datation. La dernière difficulté qu'ils rencontrent nous intéresse directement ; pour résoudre l'équation donnant la teneur en

¹⁴C à l'équilibre dans l'atmosphère, à une époque, il faut connaître la variation du moment magnétique terrestre, non seulement depuis cette époque mais aussi assez loin antérieurement. Les auteurs présentent deux exemples, en s'appuyant sur nos résultats initiaux pour l'époque romaine [122]. Ils imaginent d'abord que le moment terrestre est resté longtemps constant et qu'il a décliné, en accord avec nos déterminations, depuis 2 000 ans ; ils trouvent que des objets de cet âge seraient alors datés trop vieux de 240 ans, durée qu'ils admettent de l'ordre des erreurs probables de la méthode. Mais s'ils posent que la décroissance se poursuit depuis 4 000 ans, des objets de cet âge seraient datés, suivant la technique actuelle, 1 000 ans trop vieux. On voit ainsi quelle importance peut prendre en archéologie la variation séculaire de l'intensité du champ magnétique terrestre qui vient ajouter à d'autres [10] une nouvelle cause d'erreur.

Bien entendu, encore faut-il que nos résultats aient une signification mondiale. A ce sujet ELSASSER, NEY et WINCKLER font la remarque que notre étude se rapporte à une région limitée du Globe (ils ne connaissaient alors que nos déterminations en France) et que ces résultats pourraient, à la rigueur, s'expliquer par un énorme effet régional dans la variation séculaire. A la vérité, un effet régional d'une telle ampleur paraît peu probable ; puis, on l'a vu, nous avons étendu un peu le champ de nos investigations en surface ; mais ceci ne fait que confirmer l'intérêt qu'il y aurait à effectuer des déterminations d'intensité en d'autres régions du Globe. Nous ne nous arrêtons pas sur les objections de H. A. ATWATER et R. T. ELLIKSON [5], reprises par R. M. COOK [24], qui observent que suivant les conditions de cuisson, une même terre crue peut acquérir des thermorémanences considérablement différentes. Faut-il rappeler que nous ne nous intéressons jamais à ce qu'était la terre crue, que nous prenons chaque terre cuite en soi, en nous réjouissant d'ailleurs que les différents objets d'un même lot soient magnétiquement très différents. Nos notes antérieures, quoique brèves, expliquaient comment nous essayons de nous mettre à l'abri des changements minéralogiques spontanés ou dus aux recuits ; nous espérons que le présent mémoire enlèvera toute crainte à ce sujet.

V. ESSAIS D'EXTENSION AUX TEMPS GÉOLOGIQUES.

La méthode que nous avons décrite devrait permettre de retrouver l'intensité du champ terrestre à partir des roches qui portent une aimantation thermorémanente. Encore faut-il pour cela que ni l'aimantation originelle ni la composition de la roche n'aient subi de modifications appréciables. Nous avons dit déjà avec quel pessimisme nous envisageons cette double conservation dans les roches très anciennes, quel que soit d'ailleurs le mécanisme de leur aimantation. Cependant nous avons voulu garder espoir dans celles des époques géologiques récentes ; deux essais ont été tentés jusqu'ici : sur des « argiles métamorphiques » du quaternaire moyen et sur l'andésite de Volvic du quaternaire supérieur.

A. Argiles métamorphiques ou terres cuites naturelles.

Nous avons fait, en 1948, des prélèvements de terres cuites naturelles sur des gisements, étudiés jadis par B. BRUNHES [13], dus aux coulées et intrusions du volcan de Gravenoire, au Sud de Clermont-Ferrand. Guidés par L. GLANGEAUD, nous avons choisi deux carrières qui mettent à nu des masses de terres cuites importantes et paraissant de la même époque : l'une est située entre Boisséjour et le Puy de Montaudon, près du carrefour de cote 522, et l'autre se trouve près de l'origine du chemin partant de la route nationale vers Boisséjour. En choisissant des terres cuites bien en place et aussi peu altérées que possible, nous avons recueilli des échantillons à orientation repérée (numérotés de 1 à 4 dans la première carrière, et 5 à 9 dans la seconde) et des fragments pour étude que nous désignons par le numéro de l'échantillon orienté au voisinage immédiat duquel ils ont été pris, ou sinon par une lettre.

Accessoirement, nous avons mesuré, sur quelques fragments, l'aimantation spécifique σ_n et la susceptibilité χ dont les valeurs sont données par le tableau 24 en même temps que le rapport calculé $Q_n = \frac{\sigma_n}{\chi \cdot 0,45}$. Sur les blocs recueillis sous plâtre, nous avons déterminé l'indice de viscosité magnétique relative dont la valeur moyenne 6 % a été indiquée dans le tableau 4. Cette viscosité élevée ⁽¹⁾ est *a priori* inquiétante car on peut toujours craindre qu'elle provienne de minéraux de néoformation.

Notre but initial était de reprendre le travail de B. BRUNHES sur la direction de l'aimantation (déclinaison et inclinaison) dans des conditions expérimentales

TABLEAU 24

PROPRIÉTÉS MAGNÉTIQUES D'ARGILES MÉTAMORPHIQUES D'Auvergne

ÉCHANTILLONS	$\sigma_n \cdot 10^4$ u. e. m.	$\chi \cdot 10^6$ u. e. m.	Q_n
—	—	—	—
3'	12	700	3,8
7'	10	450	4,9
7''	8	370	4,8
C	4,5	275	3,6
9	6	175	7,6

beaucoup meilleures ; ayant toujours l'intention d'étendre cette étude à d'autres gisements nous n'avons pas publié nos résultats que résume le tableau 25.

(1) Le temps d'action a été ici, non de deux semaines comme d'habitude, mais de trois mois.

TABLEAU 25

DIRECT ON D'AIMANTATION DES ARGILES MÉTAMORPHIQUES DU PLATEAU DE GRAVENOIRE

ÉCHANTILLON	D	I
1	15° 15 W	+ 56° 0
2	14° 45 W	+ 58° 45
3	1° 45 W	+ 51° 45
4	13° 0 W	+ 59° 45
5	19° 15 W	+ 60° 45
6	15° 15 W	+ 60° 45
7	14° 0 W	+ 57° 45
8	8° 0 W	+ 61° 15
9	11° 30 W	+ 59° 0
Moyennes	12° 30 W	+ 58° 30

Ces résultats présentent une cohérence qu'il est rare de trouver en paléomagnétisme. La série est à aimantation directe et de direction relativement proche de celle du champ actuel. On pourrait s'inquiéter de cette coïncidence avec un tel matériau à trainage fort ; mais, d'une part la valeur déjà élevée du rapport Q_0 , d'autre part la valeur même de l'effet visqueux, qu'on peut extrapoler, garantissent que l'aimantation naturelle ne se réduit pas à l'A. R. V. due au champ actuel, laquelle est d'ailleurs, comme nous vous l'avons déjà dit, en grande partie éliminée par notre mesure double.

TABLEAU 26

ARGILES MÉTAMORPHIQUES

	3			4		
	M	$\text{arc cos } \frac{X}{M}$	M'	M	$\text{arc cos } \frac{X}{M}$	M'
20°	0,487	63° 15		1,847	42° 15	
100°	0,421	65° 45	0,119	1,830	42° 30	0,076
300°	0,276	64° 15	0,386	1,642	41° 45	0,409
670°			1,115			3,657

t	7			8		
	M	$\text{arc cos } \frac{X}{M}$	M'	M	$\text{arc cos } \frac{X}{M}$	M'
20°	0,965	58° 15		0,847	63° 45	
100°	0,898	57° 30	0,085	0,806	63° 15	0,116
300°	0,751	56° 0	0,481	0,454	60° 15	0,990
670°			2,330			2,062

Nous avons tenté une recherche d'intensité sur quatre échantillons non orientés portant les nos 3, 4, 7 et 8, et provenant des deux premières carrières. Les recuits effectués il y a longtemps, à Paris, dans un champ de 0,404 Oe, ont été à trois étapes seulement 100°, 300° et 670°. Le matériau, que nous n'avons pas enrobé, s'est en général disloqué par chauffe à 670° et nous n'avons fait aucun recuit de contrôle. Il s'agit là pour nous d'un travail préliminaire que nous devons reprendre sur d'autres terres cuites naturelles mieux conservées.

Le tableau 26 donne, avec les notations habituelles, les résultats de nos mesures sur chaque échantillon.

Les axes étant entièrement arbitraires, les cosinus directeurs de la direction du moment dans chaque échantillon n'ont aucune relation de l'un à l'autre. Nous donnons l'arc correspondant à X comme exemple pour montrer la constance de la direction du moment restant après les recuits. La vérification est aussi bonne pour les deux autres axes et il semble ainsi que l'aimantation naturelle est bien unique. Les rapports F_0/F obtenus par quotient des aimantations perdue et acquise dans les intervalles de températures 100°-300°, 300°-670° et 100°-670° sont donnés dans le tableau 27.

TABLEAU 27
ARGILES MÉTAMORPHIQUES

ÉCHANTILLONS	F_0/F		
	100°-300°	300°-670°	100°-670°
3	0,543	0,379	0,423
4	0,565	0,506	0,511
7	0,371	0,406	0,400
8	0,403	0,424	0,414

Les différences correspondant à un même échantillon sont peut-être acceptables si l'on remarque que pour l'intervalle 100°-300° on utilise des différences de moment vraiment faibles. La dispersion des rapports d'objet à objet est certes forte mais sans être choquante. A défaut de tests directs, ce sont là les seuls critères de stabilité dont nous puissions disposer. Le rapport moyen correspondant à l'intervalle maximum 100°-670° conduit pour F_0 à la valeur 0,18 Oe, que nous associerons à l'inclinaison 58°30 mesurée précédemment.

Ce résultat prouverait que l'intensité du champ terrestre que nous avons vu diminuer assez régulièrement durant la période historique n'aurait pas toujours été décroissante. Mais quel crédit peut-on accorder à un résultat obtenu par une étude aussi sommaire ? Quelle garantie avons-nous que cette terre cuite, qui présente tout de même des marques d'altération, n'a pas été très modifiée à la longue dans ses minéraux magnétiques ? Une telle modification, entraînant la

disparition d'une partie de l'aimantation ancienne et l'apparition de minéraux nouveaux, provoquerait nécessairement une diminution du rapport F_0/F . Il faut remarquer que nous avons été attirés vers ces corps par une sorte de préjugé favorable venant de ce qu'ils seraient des argiles cuites. En réalité, leur composition minéralogique et leur température maximum de cuisson peuvent être assez éloignées de celles des terres cuites habituelles. Une étude plus étendue reste incontestablement nécessaire comportant des tests directs de stabilité. Cependant, en cas d'instabilité forte au cours des temps ou par recuit, il faudrait invoquer une coïncidence déjà curieuse pour expliquer l'égalité approchée des rapports F_0/F que l'on observe.

B. *Coulée andésitique du Volcan de la Nugère (Volvic).*

Nous avons effectué, en 1942, une étude étendue de cette coulée sur laquelle nous avons prélevé 26 échantillons orientés [121]. Nous avons observé une uniformité remarquable de son aimantation rémanente ce qui nous laissait supposer qu'elle n'avait pas subi de perturbations importantes aux points de prélèvements. Cette propriété, la faible viscosité magnétique de la roche et son excellent état de conservation pétrographique, nous ont incités ultérieurement à la choisir pour une recherche d'intensité du champ ancien. Cependant, nous savions qu'elle est un peu sensible aux recuits à 670° (tableau 1), mais cet effet paraissant relativement faible, nous pouvions espérer qu'il était négligeable dans les intervalles inférieurs de température.

Nous donnerons successivement les résultats d'une série d'essais effectués en 1946, à Paris, le champ à l'emplacement du four étant 0,404 Oe, puis ceux d'essais récents, effectués à l'Observatoire du Parc Saint-Maur, dans un champ de 0,464 Oe.

1. *Première série d'essais.*

Elle a porté sur trois échantillons taillés dans les blocs à orientation repérée numérotés 7, 12 et 23. Les recuits doubles ont été faits en atmosphère d'azote avec les étapes 100°, 300°, 500°, 590° et 670°. Les résultats des mesures sont donnés dans le tableau 28.

Nous pouvons faire immédiatement deux observations favorables en accord avec celles qui précèdent. D'une part, la direction de l'aimantation restante après chaque recuit (nous donnons son inclinaison I) est sensiblement constante, ce qui confirme la pureté de l'aimantation naturelle. D'autre part, le second recuit à 670° ne provoque que des changements faibles, encore que de sens systématique, de l'aimantation acquise. On sait bien que ce test ne peut pas garantir la stabilité ; par nature, il ne peut que condamner : il ne le fait pas ici.

TABLEAU 28

ANDÉSITE DE VOLVIC : PREMIERS ESSAIS SUR LA RECHERCHE DE L'INTENSITÉ

t	7			12			23		
	M	I	M'	M	I'	M'	M	I	M'
20°	0,832	63° 45	—	0,500	70° 15	—	0,586	72° 15	—
100°	0,807	63° 45	0,028	0,468	70° 30	0,018	0,544	73° 0	0,036
300°	0,722	63° 45	0,095	0,401	68° 45	0,068	0,407	76° 30	0,150
500°	0,348	67° 30	0,498	0,183	69° 30	0,296	0,219	—	0,480
590°	0,048	—	1,036	0,033	—	0,655	0,055	—	0,877
670°	—	—	1,070	—	—	0,724	—	—	0,783
670°	—	—	1,043	—	—	0,704	—	—	0,743

Il faut cependant remarquer que pour l'échantillon 23 des changements importants s'étaient produits avant, que marque bien la valeur élevée de M' correspondant à 590°.

Sur le tableau 28 on peut encore observer que l'aimantation correspondant à l'intervalle bas de température 100°-300°, est relativement faible ; il en résulte que les rapports F_0/F correspondants se trouvent entachés d'erreurs relatives fortes ; or cet intervalle est *a priori* le meilleur parce qu'il correspond à la probabilité la plus faible de changements minéralogiques par recuit ; c'est là un défaut gênant de la roche étudiée. Cependant, cette source d'erreurs ne suffit pas à expliquer la dispersion des rapports du tableau 29, dispersion telle qu'elle rend finalement ce premier essai inutilisable.

Nous savons que le test général de stabilité, par comparaison des rapports F_0/F par lignes et par colonnes, peut être mauvais soit par suite de changements minéralogiques naturels, provoqués ou spontanés, ayant eu lieu sur le terrain au cours

TABLEAU 29

ANDÉSITE DE VOLVIC ; PREMIERS ESSAIS : RAPPORTS F_0/F

Nos	100°-300°	300°-500°	500°-590°	300°-670°	100°-670°
7	1,27	0,92	0,56	0,75	0,79
12	1,34	0,95	0,42	0,62	0,67
23	1,20	0,57	0,41	—	—

des temps, soit par suite de transformations expérimentales dues aux recuits. Pour juger du second effet, et pour tenter, éventuellement, de nous en protéger nous avons effectué une nouvelle étude.

2. — Deuxième série d'essais.

Elle porte encore sur trois échantillons, taillés dans de nouveaux blocs orientés, numérotés 1, 2 et 13. Les recuits sont plus nombreux que dans les essais précédents et ils sont suivis, pour chaque température à partir de 400°, d'un contrôle par détermination du moment acquis, $M'_{(300^{\circ}, F, 20^{\circ})}$.

TABLEAU 30

ANDÉSITE DE VOLVIC. NOUVEAUX ESSAIS SUR LA RECHERCHE DE L'INTENSITÉ

t	1			2			13		
	M	I	M'	M	I	M'	M	I	M'
20°	1,062	66° 45		1,684	63° 15		0,478	65° 45	
100°	1,035	66° 15	0,030	1,670	63° 45	0,020	0,463	65° 15	0,017
200°	0,967	65° 15	0,045	1,648	63° 15	0,060	0,438	64° 15	0,029
300°	0,869	63° 45	0,073	1,595	62° 45	0,099	0,331	66° 15	0,091
400°	0,706	61° 45	0,148	1,415	62° 30	0,269	0,238	67° 45	0,215
300°			0,083			0,107			0,101
500°	0,417		0,404	1,017		0,644	0,063		0,639
300°			0,093			0,114			0,193
590°	0,026		1,096	0,018		1,783	0,018		1,086
300°			0,069			0,102			0,148
670°			1,087			1,712			1,067
670°			1,076			1,686			1,063
300°			0,075			0,120			0,100

Le tableau 30 résume les résultats des mesures. Nous y retrouvons les faits favorables observés antérieurement : constance de la direction du moment restant et égalité des moments obtenus après les deux recuits à 670°. Ajoutons que les courbes de désaimantation $M = f(t)$, que l'on pourrait tracer pour chacun des six échantillons des deux essais, sont très régulières, ce qui garantit la qualité des mesures ; de plus elles sont assez voisines d'allure ⁽¹⁾ et rappellent celle que l'on

TABLEAU 31

ANDÉSITE DE VOLVIC. NOUVEAUX ESSAIS : RAPPORTS F_0/F

N ^{os}	100°-300°	100°-400°	200°-500°	300°-500°	500°-590°	300°-670°	100°-670°
1	3,86	2,79	1,53	1,36	0,57	0,86	0,99
2	0,96	1,03	1,08	1,06	0,88	1,00	0,99
13	1,68	1,14	0,61	0,50	0,10	0,35	0,44

(1) A l'exception cependant de celle relative à l'échantillon 13 qui présente deux coudes nets.

obtiendrait pour une A. T. R. avec la magnétite comme minéral. Il en est de même des courbes d'aimantation $M' = f(t)$.

Mais, comme dans l'essai précédent, les rapports F_0/F diffèrent fortement (tableau 31). Réserveons pour le moment le cas de l'échantillon 2, et considérons l'ensemble des 5 autres ; il est indiscutable que, même en négligeant les plus aberrants des rapports F_0/F , obtenus à partir de différences vraiment faibles,

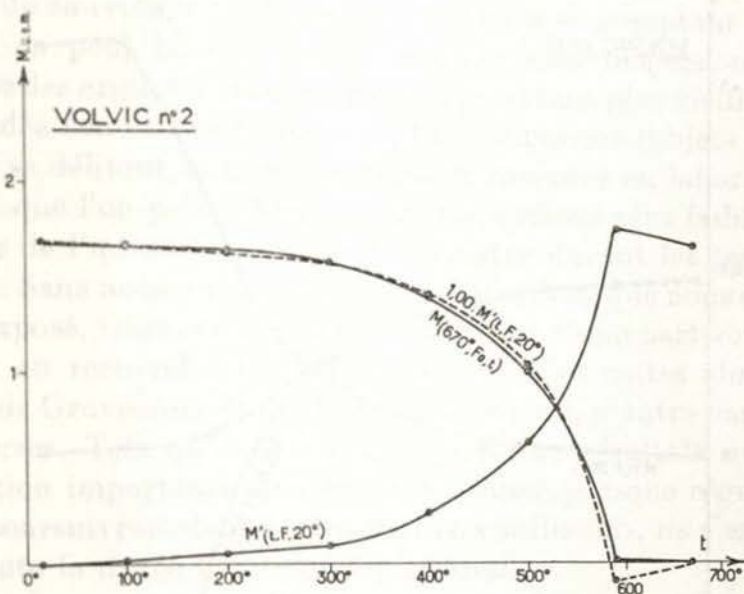


FIG. 4. — Courbes d'aimantation et de désaimantation : andésite de Volvic, échantillon N° 2.

la dispersion générale reste considérable. L'une des raisons de cette situation est une modification minéralogique que révèle le test par recuit de contrôle à 300°. Le tableau 30 montre que les valeurs successives $M'_{(300^\circ, F, 20^\circ)}$, pour chaque échantillon, changent quand t s'élève. Le phénomène moyen, d'ailleurs assez modéré, est une augmentation de l'aimantabilité dans l'intervalle 300°-20°, suivie d'une diminution pour les températures plus élevées. Cette observation d'une faible évolution par recuit n'exclut pas l'autre possibilité, qu'une partie de la dispersion vienne de changements minéralogiques au cours du temps. On pourrait penser au phénomène de Kawai, d'exsolution dans les titanomagnétites [61, 62] ; mais l'absence d'un composant actuel à point de CURIE bas (d'après les variations de M' en fonction de t) n'incite pas à penser que ce mécanisme ait intéressé l'andésite étudiée.

Revenons à l'échantillon 2. Le tableau 31 montre que la dispersion des rapports F_0/F qui lui correspondent est relativement faible ; mieux, et corrélativement d'ailleurs, on voit sur la figure 4 que la courbe de désaimantation $M = f(t)$ et la courbe d'aimantation $M' = f(t)$, renversée, sans dilatation (ce qui revient

à choisir un rapport d'ajustage $k = 1$), sont en excellente coïncidence ⁽¹⁾. Faut-il voir là l'effet d'un hasard ? Faut-il au contraire garder ce cas ⁽²⁾ et conclure que l'intensité F_0 ancienne avait pour valeur celle de F' , soit 0,46 Oe environ ? Au minimum ne peut-on pas retenir l'indication qualitative d'une intensité de l'ordre

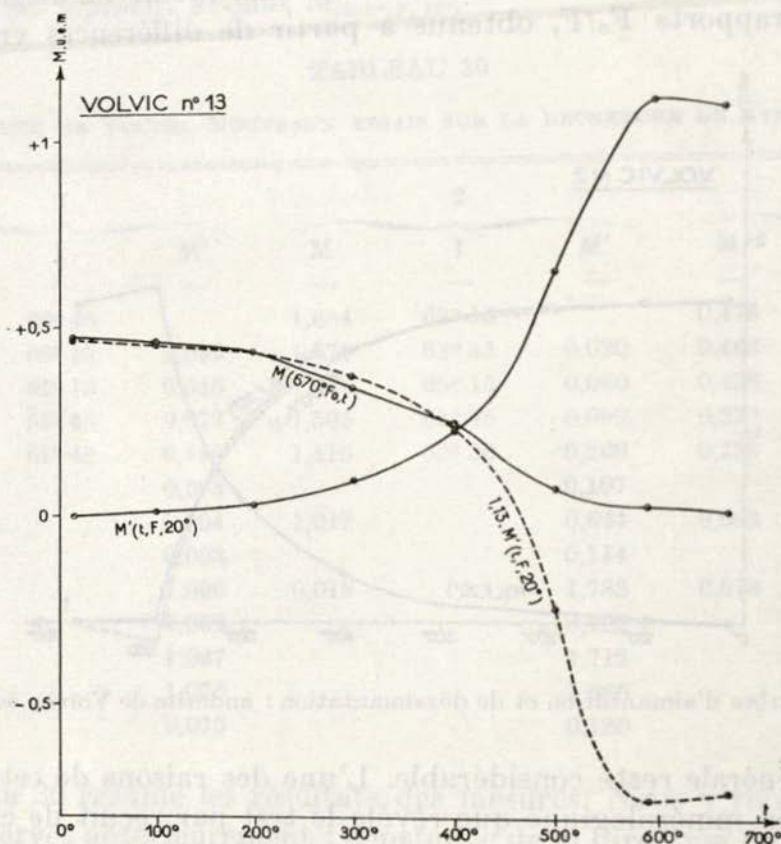


FIG. 5. — Courbes d'aimantation et de désaimantation : andésite de Volvic, échantillon N° 13.

de grandeur de l'actuelle ? Nous ne nous le permettrons pas, car il manque le critère final, le plus important sans doute, l'égalité des intensités obtenues à partir de plusieurs objets de la même époque. En effet, considérons les six valeurs de F_0 que l'on obtiendrait en utilisant, pour chaque objet, l'intervalle total 100°-670°, sans s'inquiéter d'autre chose ; elles sont en Oe :

0,32 0,27 0,30 0,46 0,46 0,20

⁽¹⁾ Sur la figure 5 a été représenté, pour donner un exemple opposé, le cas de l'échantillon 13, qui semble avoir subi une forte évolution minéralogique à partir de 400° ; on a tenté un rapport $k = 1,13$ avec accrochage au point correspondant à 200°, ce qui assure une coïncidence approchée pour les températures basses.

⁽²⁾ Il est peut-être intéressant de souligner que l'échantillon 2 présentait le rapport Q de beaucoup le plus élevé parmi ceux des six échantillons étudiés [121].

Or, la grande uniformité pétrographique de la roche, confirmée par des observations de A. LACROIX [121], devrait entraîner des évolutions minéralogiques sensiblement parallèles et freiner ainsi l'éparpillement des rapports, révélateur de changements. Dans ces conditions, nous ne pouvons que laisser sans conclusion cette étude qui servira au moins de repoussoir à tous les résultats que nous avons présentés, relatifs aux terres cuites historiques.

L'argument de sauvetage : « l'âge de l'andésite se comptant par dizaines de milliers d'années on peut bien admettre une certaine dispersion », n'est pas à retenir. L'exemple des argiles métamorphiques, pourtant plus vieilles que l'andésite et étudiées dans des conditions beaucoup plus mauvaises (objets sans forme géométrique simple, se délitant, à gros trainage, et mesures en laboratoire non thermostaté), montre que l'on peut observer des dispersions plus faibles.

La recherche de l'intensité du champ terrestre durant les temps géologiques est ainsi amorcée. Sans nous en dissimuler les difficultés, que nous avons soulignées au cours de cet exposé, nous comptons la poursuivre d'une part sur d'autres terres cuites naturelles, en recherchant de véritables argiles cuites alors que les sédiments du volcan de Gravenoire étaient plutôt marneux, d'autre part sur des roches volcaniques diverses. Tels qu'ils sont, nos premiers résultats auront au moins suggéré cette notion importante que la décroissance presque régulière du champ terrestre qui se poursuivrait depuis plus de deux mille ans, ne s'est probablement pas étendue à toute la durée des temps quaternaires.

VI. CONCLUSIONS ET SUGGESTIONS.

Durant les pages qui précèdent nous avons essayé de définir une méthode de travail permettant de déterminer, avec des chances raisonnables de précision, l'intensité du champ terrestre dans le passé à partir de thermorémanences fossiles. L'opération, très simple en principe, puisqu'elle consiste à comparer le moment magnétique naturel d'un objet au moment thermorémanent provoqué dans le même objet par un champ connu, suppose des conditions nombreuses et sévères que nous avons discutées. Rappelons que, d'une manière générale, il faut :

— que l'aimantation naturelle soit une A. T. R. acquise à une époque connue, dans un champ non perturbé, et qu'elle soit demeurée constante sans aucune addition d'aimantations nouvelles postérieures ;

— que la composition du corps n'ait pas subi de modifications physiques, chimiques ou même purement cristallographiques, au moins dans ses minéraux magnétiques ;

— que les recuits, nécessaires par définition à la production d'A. T. R. nouvelles, n'entraînent pas non plus de telles transformations.

Ajoutons encore que les moments mesurés intervenant par leurs différences,

une bonne précision est nécessaire dans leur mesure, alors qu'ils sont par nature faibles et portés par des corps très hétérogènes.

Nous avons montré d'abord comment, grâce au choix des appareils et avec un agencement convenable des mesures, on pouvait éliminer les effets de la répartition hétérogène de l'aimantation, de la variation réversible des moments en fonction de la température et de l'aimantation visqueuse ; comment aussi, grâce au choix des matériaux, on pouvait éliminer les effets du champ démagnétisant perturbateur des aimantations originelle et nouvelle, et limiter la probabilité des changements minéralogiques. Puis, nous avons échafaudé un complexe d'opérations de contrôle ayant pour but d'éliminer les objets ne satisfaisant pas à l'une quelconque des conditions posées. L'ensemble de ces contrôles, assuré par notre artifice des recuits doubles avec renversement, forme une sorte de hiérarchie comportant successivement :

— des contrôles individuels subis par chaque objet séparément : la direction de la rémanence originelle, réduite progressivement par recuit, doit rester constante (test I ou arc $\cos \frac{X}{M}$) ; des aimantations nouvelles répétées dans les mêmes conditions doivent conduire aux mêmes valeurs des moments acquis (test M' et M'' , et test $M'_{(300^{\circ}, F, 20^{\circ})}$) ; enfin, dans des intervalles successifs de température les aimantations ancienne, perdue par recuit, et nouvelle acquise, doivent rester dans le même rapport (test F_0/F). Nous avons donné des exemples détaillés de résultats relatifs à de tels essais sur quelques objets.

— un contrôle de groupe : les différents objets d'un lot doivent conduire à des valeurs voisines de l'intensité F_0 cherchée. Ce test a d'autant plus de valeur que les objets du lot sont plus nombreux et aussi, ce qui peut surprendre, qu'ils sont plus différents les uns des autres à tous points de vue. Pour chacun des lots retenus, nous avons toujours donné la liste des valeurs F_0 individuelles.

— un contrôle général final : les valeurs obtenues, pour la même région, à partir de lots d'objets d'époques différentes, doivent présenter une certaine coordination. Nous ne pouvons jusqu'ici faire jouer ce test que pour l'Ouest de l'Europe durant la période historique. Nous avons vu qu'il était assez satisfaisant étant donné surtout qu'il juge à la fois nos erreurs et celles des archéologues sur la datation des objets étudiés.

Il ne faut pas se dissimuler que, conduite ainsi, la détermination de l'intensité du champ terrestre, pour une époque et une région données, demande un travail considérablement long et minutieux, et susceptible à tout moment d'être entièrement perdu si l'un des tests se montre négatif. Insistons sur le fait que, tout au long des essais sur un objet, non seulement les mesures des moments doivent être soignées, mais aussi toutes les opérations relatives aux recuits. S'il est évident que le champ à l'emplacement du four doit toujours être bien connu, notre méthode

à deux recuits associés exige qu'on réalise la même température de palier, mais aussi la même marche de chauffe, à cause du gradient thermique qui existe nécessairement dans le four et dans l'objet. En effet, ce qui importe c'est que tout point de l'objet revienne à une température, au fond quelconque, mais identique d'un recuit à l'autre ; il n'est pas suffisant pour cela que le couple thermoélectrique de mesure indique la même température. Il en résulte d'ailleurs que lorsqu'on recuit plusieurs objets à la fois, l'inversion de position d'une chauffe à l'autre, ne doit pas porter sur chaque échantillon mais sur leur ensemble. Remarquons en passant que notre mesure suppose aussi que le corps ne se transforme pas entre les deux recuits associés. Lorsque cela se produit, et les tests de stabilité nous amènent alors à abandonner l'essai, nous observons de petites irrégularités dans les mesures ; par exemple une composante très faible du moment restant peut paraître changer de signe, la composante Y' , nulle par définition, peut prendre des valeurs apparentes appréciables. Il en résulte que le désordre des valeurs F_0/F se trouve augmenté, ce qui est finalement heureux. Nous n'avons pas donné d'exemples de cette situation car il faudrait présenter pour cela les tableaux complets, beaucoup trop étendus, des résultats des mesures ; mais ce fait était particulièrement net pour les essais relatifs à l'andésite de Volvic, alors que les conditions de forme géométrique des échantillons étaient excellentes.

Nous avons insisté beaucoup sur l'étendue du travail nécessaire à une détermination d'intensité ; on peut se demander si nous considérons la méthode comme définitivement élaborée ? La réponse est évidemment négative, mais nous ne ferons que suggérer quelques perfectionnements nécessaires ou valant d'être essayés.

D'abord nous avons compté sur la proportionnalité des A. T. R., ancienne et nouvelle, au champ qui les provoque. Nous savons que cette proportionnalité est généralement excellente pour des champs aussi faibles que ceux que nous avons rencontrés ; mais il est aisé de s'affranchir de cette hypothèse. Ainsi, on pourrait choisir F voisin du champ F_0 soupçonné, ou déterminé par des essais préliminaires, ou encore provoquer des aimantations nouvelles dans des champs différents, par exemple ayant des intensités F et $2F$ encadrant F_0 .

En ce qui concerne la purification, en quelque sorte, des aimantations anciennes troublées *a priori* par des A. R. I., des A. R. V. ou des aimantations par cristallisation, nous utilisons le nettoyage thermique avec seuil à 100° , dont les recuits progressifs constituent d'ailleurs une sorte de généralisation. Mais nous avons incidemment envisagé un lavage chimique qui pourrait détruire les minéraux de néoformation eux-mêmes en même temps que les aimantations parasites qu'ils sont susceptibles de porter.

On peut être surpris d'observer que nous n'utilisons pas du tout le nettoyage par champs alternatifs alors que nous en avons provoqué une étude étendue, couronnée par l'excellent travail de thèse de M^{lle} RIMBERT [97]. Nous comptons

beaucoup sur cette méthode, qui s'est montrée excellente pour la séparation d'une A. R. I. et d'une A. T. R. : l'étude d'un piton de basalte foudroyé du plateau de Gergovie en est un bel exemple [97]. De fait, il nous paraît que l'analyse par champs alternatifs est à conseiller dans les études archéo ou paléomagnétiques portant seulement sur la direction du champ, dans lesquelles on peut se contenter de détruire progressivement l'aimantation naturelle. Mais pour la recherche de l'intensité, où l'on doit provoquer des A. T. R. nouvelles, nous craignons un effet de « polarisation » par le champ alternatif, qui a été défini par M^{lle} RIMBERT en ce qui concerne la capacité d'acquisition d'A. R. I. et dont l'ampleur nous a surpris. Ne l'ayant pas étudié encore pour le cas de l'acquisition d'A. T. R., ce qui ne doit présenter aucune difficulté, nous avons préféré laisser jusqu'ici nos échantillons à l'abri de tout champ alternatif.

Nous nous proposons de poursuivre la recherche de l'intensité aussi loin que possible dans le passé ; mais, pour ne pas gaspiller de longs efforts, nous en sommes venus à une prudente sévérité dans le choix des lots à mettre en essais au départ de chaque étude nouvelle. Sévérité du point de vue archéologique (ou géologique) : il est de peu d'intérêt d'étudier des terres cuites dont on ne connaît pas bien l'époque, le lieu de cuisson et d'éventuelles tribulations thermiques. Sévérité aussi du point de vue des qualités mécaniques et minéralogiques : il est inutile d'étudier des objets apparemment altérés ou susceptibles de l'être nettement par recuit à température élevée. Enfin, nous admettons qu'il est encore sans intérêt d'étudier une série ne permettant pas une bonne détermination de l'inclinaison magnétique. Par exemple, cette dernière condition nous a fait reculer récemment devant deux études d'intensité qui nous intéressaient pourtant beaucoup d'avance par la grande ancienneté des matériaux qui nous étaient confiés : d'une part des poteries de Ras-Chamra recueillies par M. SCHAEFFER dont les fouilles au Moyen Orient sont mondialement connues, et d'autre part, des fonds de foyers préhistoriques découverts à La Couronne (Bouches-du-Rhône) par MM. ESCALON DE FONTON et Ch. LAGRAND.

Nous venons d'être conduits à évoquer des relations récentes avec des archéologues qui ont bien voulu s'intéresser à notre recherche non seulement sur l'intensité, mais aussi sur la direction du champ ancien ; nous avons eu l'occasion d'en signaler, presque incidemment, quelques autres. En réalité, les archéologues ou les architectes des Monuments Historiques, qui nous ont compris et très efficacement aidés, sont extrêmement nombreux à Paris et en province, mais aussi hors de France, à Tunis, à Bâle et Zurich, à Trèves et Bonn, à Bruxelles, à Canterbury, Cambridge et Oxford. En les remerciant tous, nous souhaitons que la collaboration confiante ainsi établie se poursuive pour le profit réciproque du géomagnétisme et de l'archéologie.

Nous voudrions aussi remercier ceux qui nous ont constamment encouragés et aidés, et parmi eux : notre maître M. le Doyen Ch. MAURAIN et M. J. COULOMB, Directeur général du C. N. R. S. D'un autre point de vue, nous devons beaucoup à l'habileté et au dévouement de nos deux collaborateurs de tous les instants, MM. MÉNESSIER et FORMONT.

Nos déplacements jusqu'aux champs de fouilles auraient été difficiles sans l'aide des subventions que le Centre national de la Recherche scientifique a bien voulu mettre à notre disposition. D'ailleurs, une partie importante de notre matériel provient de la même source et nos appareils les plus nouveaux ont été construits dans les ateliers du C. N. R. S., à Bellevue, sous la direction active et créatrice de M. GONDET.

Manuscrit reçu le 20 novembre 1958.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] V. I. AFANASIEVA, The spherical harmonic analysis of the earth's magnetic field for the epoch 1945. *Terr. Magn. and Atm. El.*, **51**, 1946, 19-30.
- [2] S. AKIMOTO, Magnetic properties of ferromagnetic minerals contained in igneous rocks. *Japanese J. of Geophys.*, **1**, n° 2, 1955, 1-31.
- [3] S. AKIMOTO, Magnetic properties of ferromagnetic oxide minerals as a basis of rock-magnetism. *Phil. Mag. sup.*, **6**, 1957, 288-298.
- [4] O. ALTHAUSEN, Détermination du champ magnétique terrestre aux différentes époques géologiques (en russe). *Bull. Acad. Sc. U. R. S. S.*, **8**, 1944, 385-392.
- [5] H. A. ATWATER and R. T. ELLIKSON, Remanent magnetization of ancient bricks. *Nature*, **181**, 1958, 404.
- [6] Auteurs divers, Succession de notes dans *Phil. Mag. sup.*, **6**, 1957, n° 22, et dans *Phil. Trans. Roy. Soc. London, A*, **250**, 1957, n° 974.
- [7] L. A. BAUER, The physical decomposition of the earth's permanent magnetic field, n° III. *Terr. Magn. and Atm. El.*, **8**, 1903, 97-129.
- [8] L. A. BAUER, Chief results of a preliminary analysis of the earth's magnetic field for 1922. *Terr. Magn. and Atm. El.*, **28**, 1923, 1-28.
- [9] P. M. S. BLACKETT, Lectures on rock magnetism. *The Weizmann Science Press of Israel*, 1956.
- [10] W. S. BROECKER and J. L. KULP, The radiocarbon method of age determination. *American Antiquity*, **22**, 1956, 1-11.
- [11] J. M. BRUCKSHAW, Rock magnetism. Some recent developments. *Science Progress* **167**, 1954, 406-418.
- [12] J. M. BRUCKSHAW and S. A. VINCENZ, The permanent magnetism of the Mull lavas. *M. N. Roy. Ast. Soc. Geophys. sup.*, **6**, 1954, 579-589.
- [13] B. BRUNHES, Recherches sur la direction d'aimantation des roches volcaniques. *J. de Phys.*, 4^e s., **5**, 1906, 705-724.
- [14] Sir E. BULLARD and H. GELLMAN, Homogeneous dynamos and terrestrial magnetism. *Phil. Trans. Roy. Soc. London A*, **247**, 1954, 213-278.
- [15] Sir E. BULLARD et plusieurs auteurs, Discussion on movements in the earth's core and electrical conductivity. IATME, Rome, 1954, *Ann. de Géophys.*, **11**, 1955, 49-108.

- [16] Sir E. BULLARD et plusieurs auteurs, Variation séculaire et paléomagnétisme. IAGA, Toronto, 1957, à paraître dans *Ann. de Géophys.*, 1958.
- [17] L. CAGNIARD, Les variations du champ magnétique et les fluctuations de la vitesse de rotation terrestre sont-elles corrélatives ? Implications éventuelles d'une telle corrélation. 72^e session AFAS, Luxembourg, 1953, *Actes*, p. 161-166.
- [18] S. K. CHAKRABARTY, The spherical harmonic analysis of the earth's main magnetic field. *Indian J. Meteorol. and Geophys.*, **5**, 1954, special Nr.
- [19] S. CHAPMAN and J. BARTELS, Geomagnetism. Oxford University Press, 1940.
- [20] R. CHEVALLIER, L'aimantation des laves de l'Etna et l'orientation du champ terrestre en Sicile du XII^e au XVIII^e siècles. *Thèse Paris*, 1925 et *Ann. de Phys.*, 10^e s., **4**, 1925, 5-162.
- [21] R. CHEVALLIER, J. BOLFA et S. MATHIEU, Titanomagnétites et ilménites ferromagnétiques. *Bull. Soc. franc. Minér. Crist.*, **78**, 1955, 307-346 et 365-399.
- [22] P. CINTAS, Céramique punique. *Publ. de l'Institut des Hautes Études de Tunis*, **3**, 1950, 685 pages.
- [23] J. A. CLEGG, M. ALMOND and P. H. S. STUBBS, The remanent magnetism of some sedimentary rocks in Britain. *Phil. Mag.*, **45**, 1954, 583-598.
- [24] R. M. COOK, Intensity of remanent magnetization of archaeological remains. *Nature*, **181**, 1958, 1421-1422.
- [25] A. COX, Remanent magnetization of lower to middle Eocene basalt flows from Oregon. *Nature*, **177**, 1957, 685-686.
- [26] K. M. CREER, Palaeomagnetic investigations in Great Britain. **5**, The remanent magnetization of unstable Keuper Marls. *Phil. Trans. Roy. Soc. London*, A, **250**, 1957, 130-143.
- [27] K. M. CREER, E. IRVING and S. K. RUNCORN, The direction of the earth's magnetic field in remote epochs. Technical Comm. Paleomagnetism, 10th Assembly IATME, Rome, 1954.
- [28] E. R. DEUTSCH, The magnetic hysteresis of rocks and minerals at high temperatures. *J. of Geomagn. and Geol.*, **8**, 1956, 118-128.
- [29] R. R. DOELL, Remanent magnetization of the upper miocene "blue" sandstones of California. *Trans. Am. Geophys. Un.*, **37**, 1956, 156-167.
- [30] P. M. DU BOIS, Comparison of palaeomagnetic results for selected rocks of Great Britain and North America. *Phil. Mag. Sup.*, **6**, 1957, 177-186.
- [31] W. M. ELSASSER, Hydromagnetism. *Am. J. of Phys.*, **23**, 1955, 590-609 et **24**, 1956, 85-110.
- [32] W. M. ELSASSER, Hydromagnetic dynamo theory. *Rev. of modern Phys.*, **28**, 1956, 135-163.
- [33] W. M. ELSASSER, E. P. NEY and J. R. WINCKLER, Cosmic-ray intensity and Geomagnetism. *Nature*, **178**, 1956, 1226-1227.
- [34] H. F. FINCH and B. R. LEATON, The earth's main magnetic field epoch 1955,0. *M. N. Roy. Ast. Soc. Geophys. Sup.*, **7**, 1957, 314-317.
- [35] G. FOLGHERAITER, Sur les variations séculaires de l'inclinaison magnétique dans l'antiquité. *J. de Phys.*, 3^e s., **8**, 1899, 660.
- [36] J. FORMIGÉ, Les monuments romains de la Provence. *Librairie Champion*, Paris, 1924, 61 pages.
- [37] J. W. GRAHAM, Changes of ferromagnetic minerals and their bearing on magnetic properties of rocks. *J. Geophys. Res.*, **58**, 1953, 243-260.
- [38] J. W. GRAHAM, Rock magnetism and the earth's magnetic field during paleozoic time. *J. Geophys. Res.*, **59**, 1954, 215-222.
- [39] J. W. GRAHAM, Evidence of polar shift since triassic time. *J. Geophys. Res.*, **60**, 1955, 329-347.
- [40] J. W. GRAHAM, Paleomagnetism and magnetostriiction. *J. Geophys. Res.*, **61**, 1956, 735-739.
- [41] G. GRENET, Sur les propriétés magnétiques des roches. *Thèse Paris* 1930, et *Ann. de Phys.*, 10^e s., **13**, 1930, 263-348.

- [42] G. GRENET, L'influence de l'altération des roches volcaniques sur la stabilité de leur aimantation. *Cahiers de Phys.*, **7**, 1942, 41-42.
- [43] G. GRENET, Quelques mesures d'aimantation permanente de roches du Massif Central et remarques sur les méthodes de détermination de la valeur du champ magnétique terrestre dans le passé. *Ann. de Géophys.*, **1**, 1945, 256-263.
- [44] D. I. GOUGH, A study of the paleomagnetism of the Pilansberg dykes. *M. N. Roy. Ast. Soc. Geophys. Sup.*, **7**, 1956, 196-213.
- [45] D. H. GRIFFITHS, The remanent magnetism of varved clays from Sweden. *M. N. Roy. Ast. Soc. Geophys. Sup.*, **7**, 1955, 103-114.
- [46] G. HAIGH, The process of magnetization by chemical change. *Phil. Mag.*, **3**, 1958, 267-286.
- [47] A. F. HALLIMOND and E. F. HERROUN, Laboratory determinations of the magnetic properties of certain igneous rocks. *Proc. Roy. Soc., A*, **141**, 1933, 302-314.
- [48] T. HATHERTON, The permanent magnetization of horizontal volcanic sheets, *J. Geophys. Res.*, **59**, 1954, 223-232.
- [49] T. HATHERTON, The magnetic properties of the Whakamaru ignimbrites. *New Zealand J. Sc. and Techn.*, **B**, **35**, 1954, 421-432.
- [50] J. HERDMENGER, C¹⁴ Alterbestimmung keine Allheilmethode. *Forschungen und Fortschritte*, **31**, 1957, 235.
- [51] E. F. HERROUN and A. F. HALLIMOND, Laboratory experiments on the magnetization of rocks. *Proc. Phys. Soc.*, **55**, 1943, 214-221.
- [52] J. HOSPERS, Rock magnetism and polar wandering. *J. Geology*, **63**, 1955, 59-74.
- [53] L. G. HOWELL and J. D. MARTINEZ, Polar movements as indicated by rock magnetism. *Geophysics*, **22**, 1957, 384-397.
- [54] L. G. HOWELL, J. D. MARTINEZ and E. H. STATHAM, Some observations on rock magnetism. *Geophysics*, **23**, 1958, 285-298.
- [55] D. R. INGLIS, Theories of the earth's magnetism. *Rev. Mod. Phys.*, **27**, 1955, 212-248.
- [56] E. IRVING, Palaeomagnetic and palaeoclimatological aspects of polar wandering. *Geof. pura e appl.*, **33**, 1956, 23-41.
- [57] G. ISING, On the magnetic properties of varved clays. *Ark. f. mat. ast. o. fysik*, 29 A, **5**, 1942, 37 pages.
- [58] E. A. JOHNSON, T. MURPHY and O. W. TORRESON, Pre-history of the earth's magnetic field. *Terr. Magn. and Atm. El.*, **53**, 1948, 349-372.
- [59] H. SPENCER JONES and P. J. MELOTTE, The harmonic analysis of the earth's magnetic field for epoch 1942. *M. N. Roy. Ast. Soc. Geophys. Sup.* **6**, 1953, 409-430.
- [60] N. KAWAI and S. KUME, The thermal fluctuation after effect found in the natural remanent magnetic polarization of rocks. *Geomagn. and Geol.*, **5**, 1953, 66-70.
- [61] N. KAWAI, S. KUME and S. SASAJIMA, Magnetism of rocks and solid phase transformation in ferromagnetic minerals. *Proc. Japan Acad.*, **30**, 1954, 588-592 et 864-868 ; **31**, 1955, 346-351.
- [62] N. KAWAI, S. KUME and K. YASUKAWA, Exsolution of titanomagnetite and its time effect on rock-magnetism. *Proc. Japan Acad.*, **32**, 1956, 455-458, 459-463 et 464-468.
- [63] R. F. KING, The remanent magnetism of artificially deposited sediments. *M. N. Roy. Ast. Soc. Geophys. Sup.*, **7**, 1955, 115-134.
- [64] J. KOENIGSBERGER, Gröszenverhältnis von remanenten zu induziertem Magnetismus in Gesteinen ; Gröszte und Richtung des remanenten Magnetismus. *Zeits. für Geophysik*, **6**, 1930, 190-207.

- [65] J. KOENIGSBERGER, Die Abhängigkeit der natürlichen remanenten Magnetisierung bei Eruptivgesteinen von deren Alter und Zusammensetzung. *Beit. z. angew. Geophysik*, **5**, 1935, 193-246.
- [66] J. KOENIGSBERGER, Natural residual magnetism of eruptive rocks. *Terr. Magn. and Atm. El.*, **43**, 1938, 119-130 et 299-320.
- [67] R. LAUR-BELART, Ausgraben in Augst 1948 : Insula XXIII, Gewerbahallen mit Öfen. Stiftung pro Augusta Raurica. Basel, 1949, 31 pages.
- [68] E. LE BORGNE, Sur la susceptibilité magnétique du sol. *Thèse Paris*, 1955 et *Rev. Fac. Sc. Istanbul*, fasc. 2 et 3, 1955.
- [69] E. LE BORGNE, Susceptibilité magnétique anormale du sol superficiel. *Ann. de Géophys.*, **11**, 1955, 399-419.
- [70] W. F. LIBBY, *Radiocarbon dating*, 2^e édition, 1955, University of Chicago Press.
- [71] F. LÆWINSON-LESSING et MITKEWITCH, Sur l'aimantation permanente naturelle et artificielle des roches. *C. R. Acad. Sc.*, **180**, 1925, 942-945.
- [72] A. G. MC NISH and E. A. JOHNSON, Magnetization of unmetamorphosed varves and marine sediments. *Terr. Mag. and Atm. El.*, **43**, 1938, 401-407.
- [73] H. MANLEY, The terrestrial magnetic field. *Research*, **4**, 1951, 43-46.
- [74] J. D. MARTINEZ and L. G. HOWELL, Palaeomagnetism of chemical sediments. *Nature*, **178**, 1956, 204-205.
- [75] CH. MAURAIN, Variations séculaires du champ magnétique terrestre près de Paris de 1883 à 1941. *Ann. I. P. G. Paris*, **22**, 1945, 62-69.
- [76] TH. MOUREAUX, Détermination des éléments magnétiques en France. Chap. III : Nouvelles cartes magnétiques de la France. *Ann. B. C. M.*, **1**, 1884, B 215-B 224.
- [77] T. NAGATA, The eruption of Miyake-Sima, one of the seven Izu islands, in 1940. Part IV. *Bull. Earthq. Res. Inst.*, **19**, 1941, 304-324.
- [78] T. NAGATA, *Rock magnetism*, 1953, Maruzen Co, Tokyo, 225 pages.
- [79] T. NAGATA and S. AKIMOTO, Magnetic properties of ferromagnetic ilmenites. *Geof. pura e appl.*, **34**, 1956, 36-50.
- [80] T. NAGATA, S. AKIMOTO and S. UYEDA, Reverse thermo-remanent magnetism. *Proc. Japan Acad.*, **27**, 1951, 643-645 et **28**, 1952, 277-281.
- [81] T. NAGATA, S. AKIMOTO, S. UYEDA, K. MOMOSE and E. ASAMI, Reverse magnetization of rocks and its connection with the geomagnetic field. *J. Geomagn. and Geol.*, **6**, 1954, 182-193.
- [82] T. NAGATA, S. AKIMOTO, S. UYEDA, Y. SHIMIZU, M. OZIMA, K. KOBAYASHI and H. KUSO, Palaeomagnetic studies on a quaternary volcanic region in Japan. *J. Geomagn. and Geol.*, **9**, 1957, 23-41.
- [83] T. NAGATA and T. RIKITAKE, Geomagnetic secular variation during the period from 1950 to 1955. *J. Geomagn. and Geol.*, **9**, 1957, 42-50.
- [84] T. NAGATA, S. UYEDA and M. OZIMA, Magnetic interaction between ferromagnetic minerals contained in rocks. *Phil. Mag. Sup.*, **6**, 1957, 264.
- [85] T. NAGATA and T. WATANABE, Magnetic properties of the rocks containing maghemite (γ Fe₂O₃). *Geophys. notes, Geophys. Inst. Tokyo*, **3**, 1950, n^o 21, 8 pages.
- [86] L. NÉEL, Théorie du traînage magnétique des ferromagnétiques en grains fins avec applications aux terres cuites. *Ann. de Géophys.*, **5**, 1949, 99-136.
- [87] L. NÉEL, L'inversion de l'aimantation permanente des roches. *Ann. de Géophys.*, **7**, 1951, 90-102.
- [88] L. NÉEL, Some theoretical aspects of rock-magnetism. *Phil. Mag. Sup.*, **4**, 1955, 191-242.

- [89] G. D. NICHOLLS, The mineralogy of rock magnetism. *Phil. Mag. Sup.*, **4**, 1955, 113-190.
- [90] G. D. NICHOLLS, The effect of volatiles on oxide ore compositions and crystallization temperatures of igneous rocks. *Comm. Int. Conference on rock magnetism, London, Nov. 1956*.
- [91] F. PÖCKELS, Ueber das magnetische Verhalten einiger basaltischer Gesteine. *Ann. d. Physik u. Chemie*, **63**, 1897, 195-201.
- [92] E. POUILLARD, Sur le comportement de l'alumine et de l'oxyde de titane vis-à-vis des oxydes de fer. *Thèse Lille, 1949* et *Ann. de Chimie*, **5**, 1950.
- [93] K. PUZICHA, Die magnetischen Eigenschaften der Eruptivgesteine. *Zeits. f. prakt. Geologie*, **38**, 1930, 161-172 et 184-189.
- [94] M^{lle} F. RIMBERT, Sur la désaimantation, par action de champs magnétiques alternatifs, de la magnétite et du sesquioxyde de fer α . *C. R. Acad. Sc.*, **242**, 1956, 890-893.
- [95] M^{lle} F. RIMBERT, Sur l'action de champs alternatifs sur des roches portant une aimantation rémanente isotherme de viscosité. *C. R. Acad. Sc.*, **242**, 1956, 2536-2538.
- [96] M^{lle} F. RIMBERT, Sur l'aimantation rémanente anhystérique des ferrimagnétiques. *C. R. Acad. Sc.*, **245**, 1957, 406-408.
- [97] M^{lle} F. RIMBERT, Contribution à l'étude de l'action de champs alternatifs sur les aimantations rémanentes des roches. Applications géophysiques. *Thèse Paris, 1958*.
- [98] A. ROCHE, Étude sur l'aimantation de roches volcaniques tertiaires et quaternaires d'Auvergne et du Velay. *Thèse Paris, 1953*.
- [99] M^{lle} J. ROQUET, Sur les rémanences des oxydes de fer et leur intérêt en géomagnétisme. *Thèse Paris, 1953*, et *Ann. de Géophys.*, **10**, 1954, 226-247 et 282-325.
- [100] M^{lle} J. ROQUET, Étude des propriétés magnétiques de roches volcaniques à aimantation naturelle inversée. *Ann. de Géophys.*, **11**, 1955, 461-474.
- [101] M^{lle} J. ROQUET et E. THELLIER, Sur des lois numériques simples relatives à l'aimantation du sesquioxyde de fer rhomboédrique. *C. R. Acad. Sc.*, **222**, 1946, 1288-1290.
- [102] T. ROSE, On the natural residual magnetization of rocks. *C. R. Acad. Sc. U. R. S. S.*, **31**, 1941, 669-670.
- [103] J. P. ROTHÉ, Contribution à l'étude des anomalies du champ magnétique terrestre, *Thèse Paris 1937*, et *Ann. I. P. G. Paris*, **15**, 1937, 1-110.
- [104] S. K. RUNCORN, The earth's core. *Trans. A. G. U.*, **3**, 1954, 49-63.
- [105] S. K. RUNCORN, Rock magnetism. Geophysical aspects. *Phil. Mag. Sup.*, **4**, 1955, 244-291.
- [106] E. SCHNEIDER, E. THELLIER et M^{me} O. THELLIER, Contribution géophysique à l'étude du trias ophitique pyrénéen. *Ann. de Géophys.*, **4**, 1948, 15-32.
- [107] N. STOYKO, De l'influence de la rotation terrestre sur le champ magnétique. *C. R. Acad. Sc.*, **234**, 1952, 1798-1800.
- [108] E. THELLIER, Aimantation des briques et inclinaison du champ magnétique terrestre. *Ann. I. P. G. Paris*, **14**, 1936, 65-70.
- [109] E. THELLIER, Sur l'aimantation dite permanente des basaltes. *C. R. Acad. Sc.*, **204**, 1937, 876-879.
- [110] E. THELLIER, Aimantation des terres cuites ; application à la recherche de l'intensité du champ magnétique terrestre dans le passé. *C. R. Acad. Sc.*, **204**, 1937, 184-186.
- [111] E. THELLIER, Recherche de l'intensité du champ magnétique terrestre dans le passé : premiers résultats. *Ann. I. P. G. Paris*, **15**, 1937, 179-184.
- [112] E. THELLIER, Sur l'aimantation des terres cuites et ses applications géophysiques. *Thèse Paris, 1938*, et *Ann. I. P. G. Paris*, **16**, 1938, 157-302.

- [113] E. THELLIER, Sur les propriétés de l'aimantation thermorémanente des terres cuites. *C. R. Acad. Sc.*, **213**, 1941, 1019-1022.
- [114] E. THELLIER, Sur la vérification d'une méthode permettant de déterminer l'intensité du champ magnétique terrestre dans le passé. *C. R. Acad. Sc.*, **212**, 1941, 281-283.
- [115] E. THELLIER, Recherche du champ magnétique terrestre dans le passé. *L'Astronomie*, **56**, 1942, 65-69, 89-93 et 100-104.
- [116] E. THELLIER, Propriétés magnétiques des terres cuites et des roches. Rapport au colloque sur le ferromagnétisme et l'antiferromagnétisme, Grenoble 1950. *J. de Phys.*, **12**, 1951, 205-218.
- [117] E. THELLIER, Chapitre Magnétisme terrestre, tome La terre, *Encyclopédie de la Pléiade*, Gallimard éd., Paris (à l'impression).
- [118] E. THELLIER et M^{me} F. RIMBERT, Sur l'analyse d'aimantations fossiles par action de champs magnétiques alternatifs. *C. R. Acad. Sc.*, **239**, 1954, 1399-1401.
Sur l'utilisation en paléomagnétisme de la désaimantation par champs alternatifs. *C. R. Acad. Sc.*, **240**, 1955, 1404-1406.
- [119] E. THELLIER et M^{me} O. THELLIER, Sur les variations thermiques de l'aimantation thermorémanente des terres cuites. *C. R. Acad. Sc.*, **213**, 1941, 59-61.
- [120] E. THELLIER et M^{me} O. THELLIER, Sur l'intensité du champ magnétique terrestre, en France, trois siècles avant les premières mesures directes. *C. R. Acad. Sc.*, **214**, 1942, 382-384.
- [121] E. THELLIER et M^{me} O. THELLIER, Recherches géomagnétiques sur des coulées volcaniques d'Auvergne. *Ann. de Géophys.*, **1**, 1944, 37-52.
- [122] E. THELLIER et M^{me} O. THELLIER, Sur l'intensité du champ magnétique terrestre, en France, à l'époque gallo-romaine. *C. R. Acad. Sc.*, **222**, 1946, 905-907.
- [123] E. THELLIER et M^{me} O. THELLIER, Sur la direction du champ magnétique terrestre retrouvée sur des parois de fours des époques punique et romaine, à Carthage. *C. R. Acad. Sc.*, **233**, 1951, 1476-1478.
- [124] E. THELLIER et M^{me} O. THELLIER, Sur la direction du champ magnétique terrestre, dans la région de Trèves, vers 380 après J.-C. *C. R. Acad. Sc.*, **234**, 1952, 1464-1466.
- [125] O. W. TORRESON, T. MURPHY and J. W. GRAHAM, Magnetic polarization of sedimentary rocks. *J. Geophys. Res.*, **54**, 1949, 111-129.
- [126] S. UYEDA, Magnetic interaction between ferromagnetic materials contained in rocks. *J. Geomagn. and Geol.*, **7**, 1955, 9-36.
- [127] S. UYEDA, Magnetic interaction between ferromagnetic materials contained in rocks. *J. Geomagn. and Geol.*, **8**, 1956, 39-70.
- [128] S. UYEDA, Thermoremanent magnetism and coercive force of the ilmenite-hematite series. *J. Geomagn. and Geol.*, **9**, 1957, 61-78.
- [129] E. H. VESTINE, L. LAPORTE, C. COOPER, I. LANGE, W. C. HENDRIX. Description of the earth's main magnetic field and its secular change 1905-1945. *Dep. of Terr. Magn.*, Carnegie Institution, Washington, 1947, Public. 578, 532 pages.
- [130] E. H. VESTINE, I. LANGE, L. LAPORTE, W. E. SCOTT. The geomagnetic field, its description and analysis. *Dep. of Terr. Magn.*, Carnegie Institution Washington, 1947, Public. 580, 390 pages.
- [131] S. A. VINCENZ, The magnetic properties of some tertiary intrusives of the isle of Mull. *M. N. Roy. Ast. Soc. Geophys. Sup.*, **6**, 1954, 590-603.