

Le champ magnétique terrestre fossile

par le Professeur Émile THELLIER

Directeur de l'Institut de Physique du Globe

Préface

de Jean COULOMB

Membre de l'Institut



Professeur à la Faculté des Sciences de Paris, et en outre, depuis neuf ans, Directeur de l'Institut de Physique du Globe dans lequel s'était écoulée toute sa carrière, Émile THELLIER est le grand spécialiste français de l'aimantation des roches, le grand spécialiste international de l'aimantation des terres cuites. Lorsque lui fut proposé naguère par Charles MAURAIN un sujet de thèse sur le champ magnétique fossile tel que FOLGHERAITER avait cherché à le retrouver dans les poteries anciennes et CHEVALLIER dans les laves de l'Etna, ce sujet avait été défloré, plutôt que fécondé, par un assez grand nombre de travaux superficiels. THELLIER, reprenant le problème à la base, découvrit des lois d'addition pour les aimantations thermorémanentes des argiles, lois qui devaient être interprétées théoriquement beaucoup plus tard par Louis NÉEL, et montra les précautions à prendre pour déterminer sur des briques bien datées la direction du champ magnétique ancien, ainsi que les précautions beaucoup plus grandes qui étaient indispensables pour en déterminer l'intensité. THELLIER n'a

cessé durant toute sa carrière de perfectionner les méthodes et les appareils, et d'accumuler ainsi une moisson de précieux résultats.

Il est bon d'avertir le lecteur du sérieux avec lequel il devra aborder ces questions, dont la difficulté réside précisément dans les précautions de détails.

Dans le premier des trois articles à paraître, M. THELLIER rappelle les données fondamentales relatives au champ magnétique terrestre, puis les notions physiques et minéralogiques nécessaires à la compréhension des divers mécanismes d'aimantation pour les roches et les terres cuites.

Le second article sera consacré à l'archéomagnétisme, c'est-à-dire à la recherche du champ magnétique qui régnait au moment d'événements susceptibles de datation historique ou archéologique, en utilisant comme matériaux les varves glaciaires, les coulées volcaniques, et surtout les terres cuites. C'est là, comme nous l'avons dit, un domaine où l'apport personnel de M. THELLIER a été fondamental, et où son exposé peut être « dur et pur » comme il convient.

Le dernier article sera consacré au paléomagnétisme, c'est-à-dire à la recherche du champ magnétique aux diverses époques géologiques d'après l'aimantation des roches qui en proviennent. C'est un sujet qui a vu fleurir dans les dernières années un nombre considérable de travaux, parfois hâtifs, dont les conclusions ont été considérées en général comme prouvant la validité des idées de WEGENER sur la dérive des continents. THELLIER, comme toujours, se refuse à croire sans preuve et critique impitoyablement les méthodes qui lui paraissent insuffisamment assurées. A vrai dire, il n'est plus possible à aucun géophysicien de séparer le vrai du possible dans la marée montante des publications correspondantes. THELLIER ne voit guère d'acquisition

certaine en dehors des phénomènes d'inversion du champ magnétique terrestre, et encore ne sont-ils bien étudiés que pour l'époque tertiaire. Pour la dérive des continents et les hypothèses apparentées, il se contente de bien exposer les raisonnements suivis, sans vouloir juger vraiment des résultats; l'accumulation des faits ramène

aujourd'hui la tentation, à laquelle il se refuse, de céder aux arguments d'autorité. Cette impartialité peut décourager les lecteurs avides de sensations; elle apprendra aux autres avec quelle patience ils doivent regarder mûrir les Sciences de la Terre.

I. — Archéo et paléomagnétisme

Le champ magnétique terrestre provoque dans toute masse de roche une aimantation dont l'intensité, fonction de la nature de la roche, est généralement très faible. Ces aimantations *induites*, actuelles, responsables de légères perturbations du champ normal que l'on utilise en prospection magnétique du sous-sol, sont sans intérêt pour ce qui va nous concerner. Mais le champ magnétique terrestre peut avoir laissé, à une certaine époque de l'existence de la roche, une aimantation *rémanente*, c'est-à-dire capable de résister longtemps ensuite, indépendamment du champ. Dans des conditions favorables que nous préciserons, de telles rémanences ont réalisé un véritable enregistrement du champ terrestre tel qu'il était à l'époque en cause. Ce sont ces traces fossiles de champs anciens que des centaines de géophysiciens, dispersés sur tout le Globe, s'acharnent actuellement à déchiffrer.

L'intérêt géophysique direct de ces recherches est évident. Le champ magnétique de la Terre variant beaucoup au cours des siècles, et cette « variation séculaire » n'étant connue, tant bien que mal, que durant les trois ou quatre dernières centaines d'années, il s'agit de retrouver l'état magnétique du Globe dans le passé historique plus lointain (archéomagnétisme) et, pourquoi pas, dans le passé géologique (paléomagnétisme). Cette connaissance est particulièrement importante pour les théoriciens du géomagnétisme qui, dans leur recherche d'une explication de l'origine du champ moyen, ne peuvent le dissocier de sa propriété la plus spectaculaire, sa variation au long des siècles. Mais aussi, les recherches correspondant aux périodes historique et préhistorique s'étant trouvées en connexion étroite avec des problèmes purement archéologiques, le chapitre « archéomagnétisme » s'est beaucoup étendu dans ce sens. Pour les périodes géologiques, une certaine interprétation des faits observés a fait naître l'espoir d'une mesure possible d'éventuels mouvements, la dérive des continents par exemple, déjà avancés sur des bases purement géologiques. Cet espoir ayant éveillé fortement l'attention des géologues (stratigraphes, paléoclimatologistes et géodynamiciens) a donné au chapitre « paléomagnétisme » une extension inattendue.

I. — Résultats des mesures directes sur le champ terrestre

Avant d'exposer les résultats des mesures effectuées sur le champ terrestre passé par le biais des aimantations fossiles, il faudrait rappeler les faits établis d'après l'ensemble des mesures directes, mesures effectuées au moyen de l'incroyable variété d'appareils : boussoles, magnétomètres, inductomètres, jusqu'aux très récents magnétomètres atomiques, qu'ont créés les géophysiciens pour déterminer le champ

terrestre, soit dans les observatoires magnétiques, soit un peu partout sur terre, en mer et dans les airs. Nous ne pouvons le faire ici que très sommairement (1).

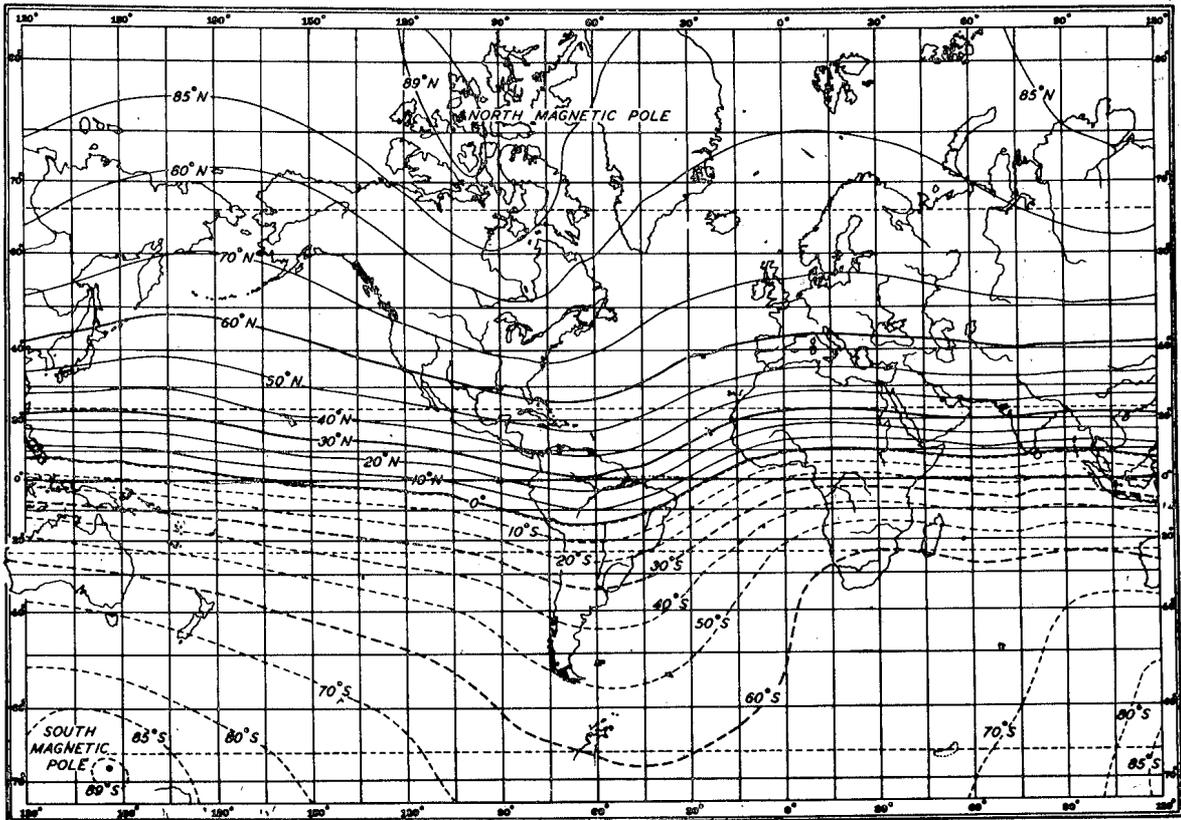
Nous définirons le vecteur champ magnétique terrestre en un lieu donné, à un instant donné, par un groupe de trois éléments qui seront, soit D, H, Z , soit D, I, F ; D et I , respectivement déclinaison et inclinaison magnétiques, sont des angles comptés en degré et minute, et H, Z et F , composante horizontale, composante verticale et intensité totale du champ, sont comptées en Ersted mais couramment exprimées en γ , sous-unité valant un cent-millième d' Ersted . De fait, nous ne nous intéresserons pas au champ de tous les instants, sujet à d'incessantes petites fluctuations, mais au *champ moyen* défini, pour chaque élément, par la moyenne des valeurs qu'il a présentées pendant une durée, se comptant en années, centrée sur l'époque considérée. Le champ moyen, dont le champ instantané ne s'écarte jamais beaucoup, n'a plus qu'une variation douce, cette variation séculaire qui est notre sujet, appréciable déjà à l'échelle de l'année et forte à l'échelle du siècle. On a pu montrer, que le champ moyen et sa dérive séculaire sont dus presque exclusivement à des causes situées à l'intérieur du Globe, et l'on pense qu'il s'agit de courants électriques circulant dans le noyau terrestre.

DESCRIPTION DU CHAMP TERRESTRE MOYEN, ACTUEL, A LA SURFACE DU GLOBE.

Les figures 1 et 2 montrent la répartition des éléments I et F , les plus importants à notre point de vue; ces cartes, résultat d'un long travail de la Carnegie Institution de Washington, correspondent à l'époque 1945,0, ce qui signifie vers le 1^{er} janvier 1945.

Sur la figure 1, les lignes sinueuses (isoclines) joignent les points du Globe présentant la même inclinaison moyenne à l'époque considérée. On remarquera que l'isocline 0° , ou équateur magnétique, ceinture la Terre dans sa partie équatoriale, mais en s'écartant fortement de l'équateur géographique dans certaines régions. Cette isocline remarquable partage la surface terrestre en un hémisphère magnétique boréal où l'inclinaison est positive (pôle Nord d'une boussole d'inclinaison entraîné vers le bas) et un hémisphère austral où elle est négative. De part et d'autre de l'équateur magnétique, l'inclinaison varie rapidement en fonction de la latitude, puis le gradient de variation diminue et devient

(1) On trouvera des indications suffisantes, à ce point de vue, dans l'un ou l'autre des articles suivants, faciles à lire : Encyclopédie française, tome III « Le ciel et la Terre », 2^e partie, section A, chapitre IV (12 pages), ou, Encyclopédie de la Pléiade, volume « La Terre » : « Le champ magnétique terrestre », pp. 531-615.



THE GEOMAGNETIC INCLINATION IN DEGREES OF ARC FOR 1945

FIG. 1. — INCLINAISON MAGNÉTIQUE SUR LE GLOBE EN 1945,0
(PUBLICATIONS DU DÉPARTEMENT DE MAGNÉTISME TERRESTRE
DE L'INSTITUTION CARNEGIE, A WASHINGTON).

très faible dans les régions polaires, vers les pôles magnétiques d'inclinaison, où I atteint sa valeur limite de 90° . Le pôle magnétique boréal (qui est magnétiquement un pôle Sud) se trouve dans le grand Nord Canadien, et le pôle austral près de la Terre Adélie, sur le continent antarctique.

Sur la figure 2, il s'agit des « isomagnétiques de F », lignes joignant les points du Globe qui présentent la même intensité totale du champ. On remarque que les valeurs les plus faibles de F s'observent dans les régions équatoriales, mais sans que l'équateur magnétique soit en aucune façon une ligne iso- F , et les valeurs les plus élevées dans les régions polaires, mais sans que les pôles magnétiques correspondent au maximum de F .

CHAMP DIPOLE ET CHAMP NON DIPOLE.

On a observé depuis longtemps (Gilbert, dès 1600), que le champ terrestre ressemble à celui d'un dipôle (ou doublet) magnétique centré, c'est-à-dire à celui d'un aimant trapu qui serait situé au centre de la Terre; mais il faut appeler l'attention sur les limitations de cette ressemblance. L'analyse mathématique du champ moyen observé à la surface du Globe montre qu'il n'en est vraiment ainsi que très loin

de la Terre et elle précise les caractéristiques de l'aimant fictif équivalent, ou dipôle de Gauss, dont l'axe (axe géomagnétique) rencontre la surface de la Terre en deux points antipodaux, dits pôles géomagnétiques. Actuellement, le pôle de l'hémisphère boréal, situé au Nord-Ouest du Groenland, a pour coordonnées géographiques : colatitude, $110^\circ \frac{1}{2}$, et longitude $69^\circ W$, et le moment magnétique a pour mesure, en unités e.m. : $M = 0,315 R^3$, R étant le rayon de la Terre compté en centimètre. On sait qu'un tel champ de dipôle, qui est de révolution par rapport à l'axe du dipôle, est facilement calculable; en un point P quelconque, à la distance r du centre O de la Terre supposée sphérique (fig. 3), il est la résultante d'une composante

verticale $F_r = \frac{2 M \cos \theta}{r^3}$ et d'une composante horizontale

$F_t = \frac{M \sin \theta}{r^3}$ situées dans le plan méridien géomagnétique

de P (plan défini par l'axe géomagnétique et le point P). L'angle θ , ou colatitude géomagnétique, qu'il faut calculer à partir des coordonnées géographiques de P , est l'angle de OP avec l'axe géomagnétique.

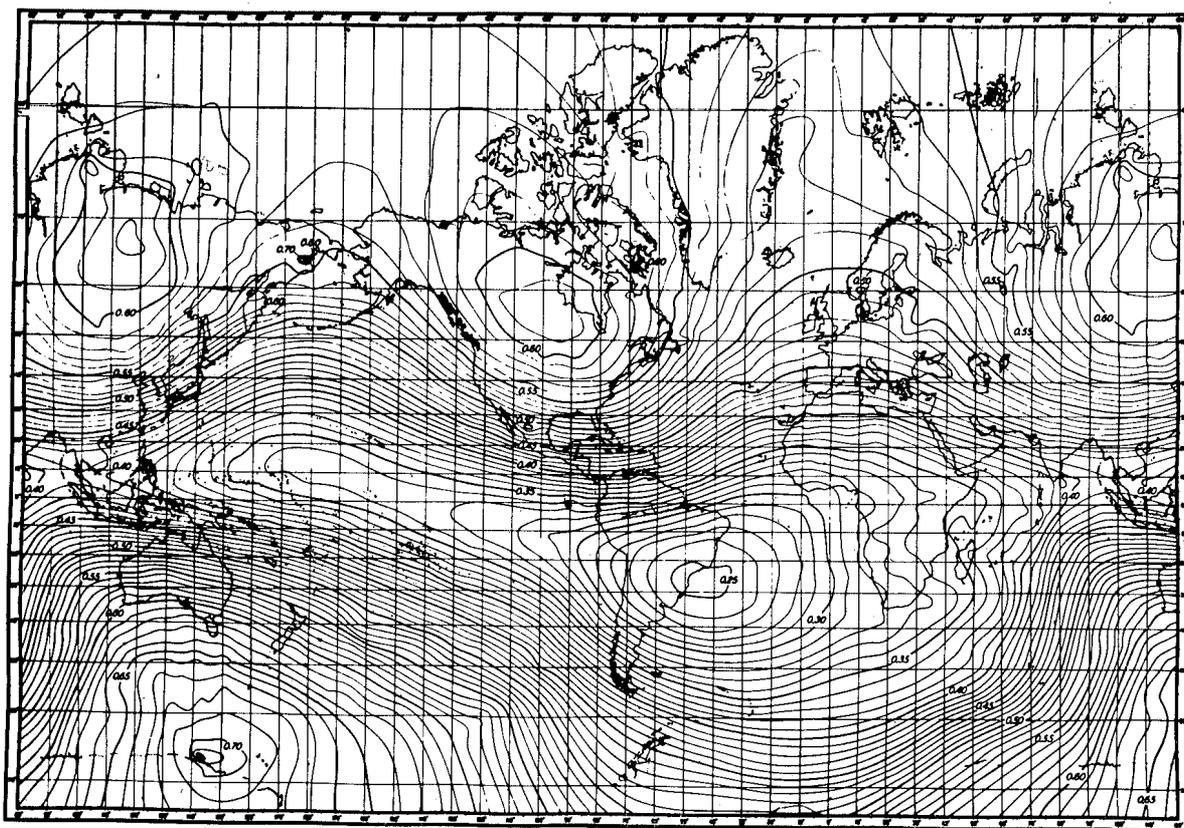


FIG. 2. — INTENSITÉ DU CHAMP MAGNÉTIQUE TERRESTRE SUR LE GLOBE EN 1945,0 (PUBLICATIONS DU DÉPARTEMENT DE MAGNÉTISME TERRESTRE DE L'INSTITUTION CARNEGIE A WASHINGTON).

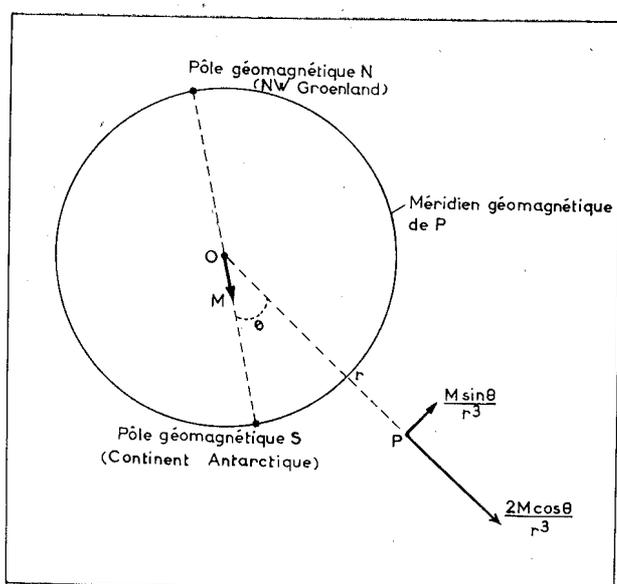


FIG. 3.

En donnant à r la valeur R du rayon terrestre, on obtient le champ dipôle à la surface de la Terre, et tout y est simple : l'équateur géomagnétique est un grand cercle perpendiculaire à l'axe des pôles géomagnétiques; F est minimum et constant (égal à $0,315$ Oe) sur l'équateur géomagnétique et il est maximum (égal à $2 \times 0,315$ Oe) aux pôles géomagnétiques; toutes les lignes isomagnétiques sont des cercles parallèles à l'équateur géomagnétique, sauf les courbes d'égale valeur de D (isogones) plus compliquées à cause de la définition de la déclinaison qui fait intervenir aussi l'axe géographique de la Terre.

Mais ce champ calculé est-il vraiment une bonne approximation du champ moyen réel observé ? La figure 4, tracée par E.C. Bullard, donne pour tout le Globe et pour l'époque 1945,0 la différence entre le champ vrai et le champ dipôle, différence que l'on peut appeler le champ non dipôle. Sur cette carte, on a, d'une part porté la différence des composantes verticales vraie et dipôle (nombre exprimé ici en centaines de γ) puis tracé des courbes joignant les points d'égale différence algébrique; d'autre part porté, en un certain nombre de points régulièrement distribués, le vecteur différence des composantes horizontales vraie et calculée. Deux faits remarquables apparaissent immédiatement. C'est d'abord l'énormité des différences que l'on peut rencontrer entre champ vrai et champ dipôle (près de

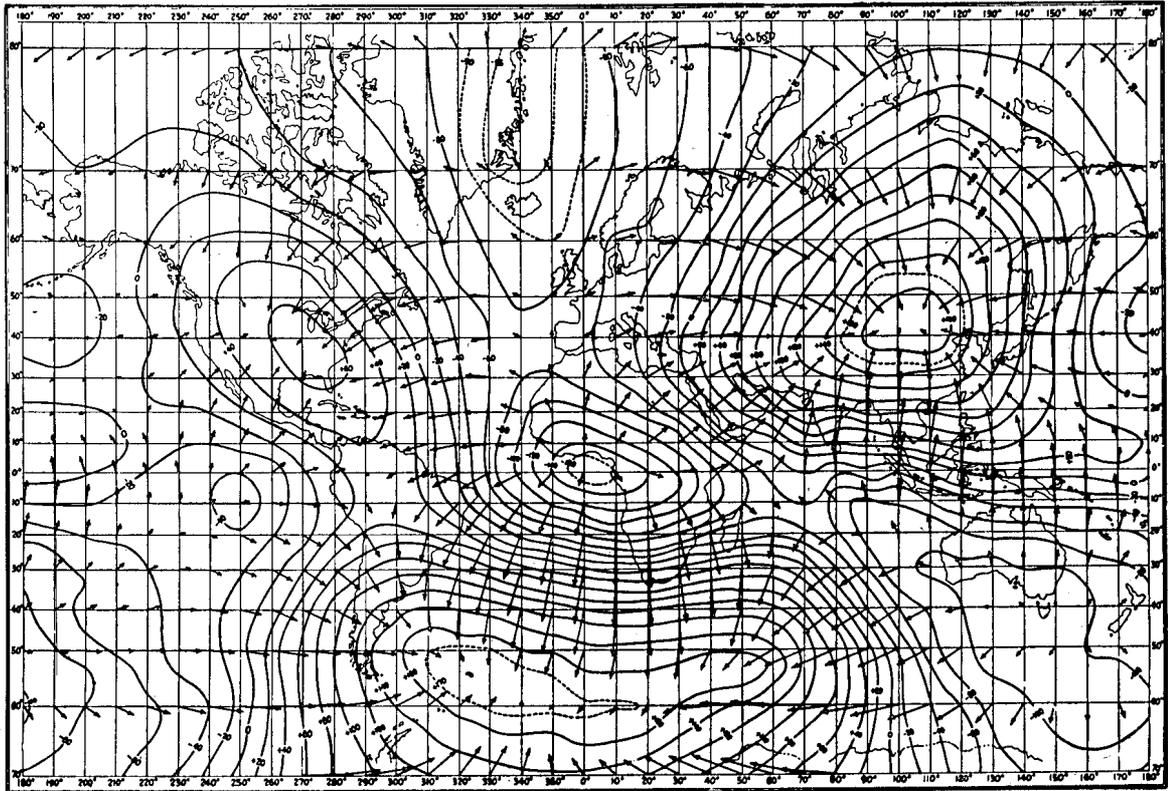


FIG. 4. — CHAMP NON DIPOLE SUR LE GLOBE EN 1945,0
(CARTE DE E.C. BULLARD).

20 000 γ en certains points) ou, ce qui revient au même, l'importance relative du champ non dipôle. C'est ensuite la régularité de l'organisation du champ non dipôle par grandes régions du Globe, organisation que simule celle que donnerait l'addition au dipôle de Gauss de quelques aimants « régionaux » placés verticalement, en profondeur, par exemple à la limite du noyau et du manteau, les uns ayant leur pôle Nord vers le haut et les autres vers le bas. Faut-il rappeler que ces parentés d'aspect ne signifient pas du tout que de tels aimants, le doublet de Gauss compris, existent dans le Globe; d'abord il s'agit plutôt de nappes de courant et il est bien connu, de plus, qu'une répartition de champ donné à l'extérieur de la sphère Terre ne permet pas d'en induire la répartition des causes, ce problème ayant une infinité de solutions. Faut-il rappeler aussi que la division du champ terrestre en deux champs, dipôle et non dipôle, est une pure opération de calcul; si elle est commode, elle n'a pas de véritable valeur d'analyse physique, et elle ne signifie pas du tout que les deux champs proviennent de causes séparées.

ÉVOLUTION SÉCULAIRE DE L'ENSEMBLE DU CHAMP TERRESTRE.

On saisit facilement la vitesse d'évolution d'un élément du champ, sur tout le Globe, à une époque donnée, en traçant des cartes du taux annuel de variation de cet élément. En général on calcule le taux moyen sur cinq années

et les courbes joignant les points où il présente la même valeur sont dites isopores de l'élément considéré. Le fait remarquable révélé par les cartes d'isopores est de nouveau une nette organisation régionale: il est de vastes régions du Globe où l'élément donné diminue tandis qu'il est en augmentation dans d'autres. Ainsi, pour la déclinaison magnétique, le taux de variation qui est actuellement + 6' en France (ce qui revient à une diminution de 6' par an de la valeur absolue de D , qui est ouest), s'élève jusqu'à un quart de degré, positivement ou négativement suivant les régions, sans parler des régions polaires. Fait supplémentaire important, à l'échelle des dizaines d'années ce taux change progressivement mais fortement. La vitesse d'évolution du champ terrestre est donc un phénomène assez capricieux dans l'espace et le temps.

Il semble plus intéressant de laisser ce détail de la vitesse d'évolution du champ pour considérer le changement cumulé sur un temps long; mais on se heurte là à une sévère limitation due à l'insuffisance des mesures, en nombre et en qualité, qui est grave dès le XIX^e siècle. On peut d'ailleurs s'intéresser, séparément, à l'évolution des parties dipôle et non dipôle du champ, fournies par des analyses successives dont la plus ancienne se rapporte à 1830. Mais à cette époque une partie seulement du Globe avait été explorée et les analyses ne sont vraiment comparables qu'à partir de 1885. La confrontation de leurs résultats montre qu'il n'est pas possible de déceler un changement significatif de la *direction* du champ dipôle depuis près d'un siècle;

il ne s'ensuit évidemment pas que ce champ soit immuable à l'échelle des milliers d'années. En ce qui concerne son *intensité*, les analyses montrent que la valeur du moment M décroît nettement et assez régulièrement depuis un siècle, à un taux qui est de l'ordre de 0,04 % par an.

Pour le champ non dipôle, il faudrait comparer la carte de sa distribution actuelle (fig. 4) avec une carte analogue tracée pour une époque antérieure. E.C. Bullard, qui a répété cet essai avec beaucoup de soin, n'a pas cru pouvoir remonter au-delà du début du XX^e siècle et il a comparé les cartes correspondant à 1945,0 et 1907,5. Sa conclusion, sur laquelle il fait lui-même beaucoup de réserves, serait que l'ensemble du champ non dipôle se conserverait mais en dérivant d'Est en Ouest à une vitesse qui serait de l'ordre de 1° en longitude pour 5 années environ. Ainsi, alors que les anomalies locales ou régionales, celles qui intéressent les prospecteurs ou les géologues, sont fixes, liées qu'elles sont à des accidents de la croûte terrestre superficielle ou profonde, le champ non dipôle, qu'on peut considérer comme constitué par des anomalies s'étendant sur des régions mondiales, serait lentement mobile; c'est une des raisons qui conduisent à rechercher son origine au-delà du manteau terrestre, dans le noyau réputé « fluide ».

Pour les époques antérieures au milieu du XIX^e siècle, il faut bien se résigner à admettre que l'évolution du champ n'est plus analysable sur l'ensemble du Globe; elle n'est connue qu'en un petit nombre de lieux, et jamais au-delà

du début du XVI^e siècle pour D , de la fin du même siècle pour I et du début du XIX^e siècle pour F . Des quelques longues séries d'observations connues, on peut seulement conclure à la grande ampleur du mouvement de dérive du champ en direction. Faut-il rappeler l'exemple de la région parisienne où la déclinaison, qui était de 10° à l'Est vers la fin du XVI^e siècle, a dérivé ensuite progressivement d'Est en Ouest passant par la valeur zéro vers 1660 et venant dépasser 22°W vers 1815. Depuis elle a rétrogradé, atteignant la valeur 6°W environ actuellement, et la dérive continue vers l'Est au taux déjà indiqué de 1° environ par décennie. Pendant ce temps l'inclinaison évoluait aussi fortement; c'est ainsi qu'elle est passée, par exemple, de 71° vers 1780 à 64° 1/2 actuellement. Cette variation, observée sur quelques siècles, n'est pas un phénomène local : elle est sensiblement la même à des centaines de kilomètres à la ronde; mais elle n'est pas non plus, et il s'en faut de beaucoup, un phénomène simple et harmonieux sur tout le Globe.

Finalement les mesures directes, trop limitées dans le temps, ne permettent pas d'atteindre à une loi générale d'évolution. Aussi ne nous reste-t-il plus qu'à partir, avec les archéologues et paléomagnéticiens, à la conquête d'un passé magnétique plus lointain, sans trop nous étonner qu'une telle possibilité de ressusciter un phénomène disparu puisse exister.

II. — Les bases de l'archéologie et du paléomagnétisme

Pour comprendre les voies de la recherche du champ ancien et l'étendue de ses possibilités, il est nécessaire d'examiner d'abord les propriétés magnétiques des roches et des terres cuites capables de fossiliser le champ terrestre sous forme d'aimantations rémanentes. Cette étude, dont nous ne pourrions qu'effleurer la surprenante variété, porte sur des corps essentiellement hétérogènes, non métalliques et très faiblement magnétiques; en tout cela elle s'oppose à celle, plus familière, qui concerne les métaux ferromagnétiques et leurs alliages.

MINÉRALOGIE MAGNÉTIQUE.

Les terres cuites et les roches sont des agrégats de cristaux ayant chacun leur personnalité et qui, d'abord, peuvent différer par leur nature même. La plupart des minéraux, par exemple tous les silicates, sont dia, para ou antiferromagnétiques et, par suite, ne sont pas susceptibles de rémanences. Ils constituent pour nous un fond inerte dans lequel sont dispersés, souvent en très faible proportion, les « grains magnétiques », cristaux isolés ou assemblages de minéraux, qui sont non pas des ferro mais des ferrimagnétiques, substances devenues familières avec les ferrites dont les plus simples ont pour composition chimique $Fe_2O_3 \cdot MO$, formule dans laquelle M représente un atome-gramme de métal bivalent. Comme un ferro, un composé ferrimagnétique est caractérisé par deux propriétés intrinsèques : son aimantation spécifique à saturation σ_s (moment magnétique limite, induit dans un gramme de substance par un champ magnétique croissant indéfiniment, à une température donnée, pour laquelle nous prendrons 20 °C), et son point de Curie T_c , température au-dessus de laquelle aucune rémanence ne peut subsister.

Parmi les minéraux magnétiques naturels se trouvent quelques composés binaires, sulfures ou oxydes, tels que la pyrrhotine (famille, en réalité, dont l'individu type peut être caractérisé par : $\sigma_s = 20$ u.e.m., $T_c = 320$ °C), la magnétite ($\sigma_s = 93$ u.e.m., $T_c = 580$ °C) et le sesquioxyde

de fer. Celui-ci se présente à l'état anhydre sous deux formes cristallines aux propriétés magnétiques très différentes : l'une, cubique, $Fe_2O_3 \gamma$ ou maghémite est instable à température élevée (au-delà de 300 °C) et son aimantation à saturation est de l'ordre de celle de la magnétite; l'autre, rhomboédrique, $Fe_2O_3 \alpha$ ou hématite, plus répandue, est un corps curieux, sorte d'antiferromagnétique imparfait se comportant comme un ferrimagnétique faible. Le point de Curie de l'hématite, 670 °C, se trouve être le plus élevé de tous ceux qui nous intéressent; il en résulte que si l'on chauffe à cette température un échantillon quelconque de terre cuite ou de roche, il perd nécessairement toute trace de rémanence quelle que soit sa complexité minéralogique et l'origine de son aimantation.

Les minéraux magnétiques les plus importants sont des composés ternaires, oxydes mixtes de fer et de titane, que l'on classe en deux familles : celle des titanomagnétites et celle des ilménites-hématites. Les titanomagnétites, qui cristallisent dans le système cubique (type spinelle), sont des solutions solides de magnétite (Fe_3O_4) et du composé ulvospinelle ($TiO_2, 2 FeO$), minéral rare à l'état pur mais que l'on sait préparer. Les plus fréquentes dans la nature, couramment appelées « magnétites », ont des compositions, en molécules, allant de 100 % à 30 % de magnétite vraie; leurs aimantations spécifiques à saturation s'étalent entre 93 et 10 u.e.m., et leurs points de Curie entre 580 °C et 100 °C environ. Il est souvent dit que 99 % de l'aimantation des roches volcaniques est portée par des minéraux appartenant à cette famille, mais la proportion est plus faible pour les autres roches surtout les roches sédimentaires. Les ilménites-hématites sont des solutions solides d'hématite et d'ilménite (TiO_2, FeO) et elles cristallisent dans le système rhomboédrique. Vers les fortes teneurs en hématite, elles sont peu aimantables comme l'hématite elle-même, mais très « dures » magnétiquement, c'est-à-dire très difficiles à aimanter mais aussi à désaimanter, du moins à la température ordinaire. Vers les teneurs moyennes, elles sont ferrimagnétiques avec des aimantations à satura-

tion pouvant atteindre 20 u.e.m. et des points de Curie étalés entre 250 et 100 °C; plus intéressantes par la singularité de leurs propriétés magnétiques que par leur abondance, elles continuent à être l'objet de très actives recherches et discussions.

Récemment, les géomagnéticiens japonais ont ramené l'attention sur des minéraux, déjà signalés par R. Chevalier, les titanomaghémites, intermédiaires entre les deux familles par la composition, mais possédant les propriétés des titanomagnétites, le système cristallin cubique en particulier.

De fait, tout ce qui précède se rapporte plutôt à des minéraux synthétiques; les minéraux naturels sont bien plus compliqués dans leur composition qui dérive de substitutions chimiques variées, différents métaux venant remplacer une partie du fer et du titane des oxydes précédents, plus ou moins théoriques. Ces substitutions peuvent entraîner d'importantes variations dans les propriétés magnétiques et autres des minéraux initiaux; par exemple, des maghémites naturelles, légèrement substituées, peuvent être stables jusqu'à des températures relativement élevées et rester insensibles aux recuits à 670 °C qui les désaimantent mais ne les font pas évoluer en hématite.

Si la composition d'un grain magnétique donné est importante, cette connaissance est très loin de permettre la prévision de l'aimantation induite que provoque un champ donné agissant sur le grain et, plus encore, l'aimantation rémanente qu'il pourra laisser. En effet, l'aimantation spécifique effective du grain dans les champs faibles ou modérés dépend considérablement aussi de sa forme, de ses dimensions, des contraintes qu'il supporte et encore de la direction du champ par rapport au grain qui est très fortement anisotrope en général. Il en résulte que la direction du moment magnétique induit dans le grain peut se trouver très différente de celle du champ appliqué et sa valeur, fonction de l'orientation du grain dans le champ, est toujours fortement réduite par l'effet du champ démagnétisant propre au grain; car si le corps, dans son ensemble, est peu magnétique, le grain l'est souvent beaucoup. Ainsi, à l'échelle, microscopique, du grain individuel à peu près autonome, nous sommes en présence d'une extrême complexité. Mais, hormis le cas de corps à cristallisation organisée, comme cela peut se rencontrer dans des roches métamorphiques fortement litées, les grains n'ont pas d'orientation cristallographique privilégiée et leurs axes ou plans de facile ou difficile aimantation sont dispersés au hasard. Dans ces conditions, si l'on applique un champ magnétique uniforme à un échantillon un peu volumineux, tel qu'il contienne un très grand nombre de grains magnétiques, il s'y produit une compensation statistique et la direction du moment magnétique de l'ensemble de l'objet (résultante générale des moments de chaque grain), se trouve alignée suivant celle du champ appliqué; ce champ étant ensuite supprimé, l'aimantation rémanente, qui subsiste, possède aussi cette direction. Ainsi, pour ce qui concerne la direction générale d'aimantation, l'anisotropie microscopique et l'hétérogénéité ont cédé le pas à une sorte d'isotropie macroscopique qui n'a rien à voir cependant avec une véritable uniformité d'aimantation.

L'école française en tire la conclusion pratique, maintes fois confirmée par des expériences directes, que si l'on veut retrouver la direction exacte d'un champ à partir d'une aimantation qu'il a pu laisser dans une roche ou une terre cuite, il faut utiliser de gros échantillons dont la masse peut aller jusqu'au kilogramme dans le cas de roches à grains visibles à l'œil nu. Une autre conclusion, plus générale, est que l'on se trouve nécessairement contraint à une

« physique d'échantillons » dès que l'on veut passer à des mesures vraiment quantitatives sur les valeurs des aimantations; on ne travaille pas sur des matières, mais sur des objets.

INVENTAIRE SOMMAIRE DES DIFFÉRENTS TYPES DE RÉMANENCES.

Des aimantations rémanentes peuvent être provoquées par plusieurs voies auxquelles correspondent des lois d'acquisition et des propriétés variées. Ainsi, avec un objet et un champ donnés, on peut obtenir des valeurs très différentes de moment rémanent suivant le processus d'action du champ; et des moments égaux provoqués dans un objet par des champs différents, convenables, peuvent n'être pas du tout identiques par leurs propriétés. Comme nous le verrons, les choses vont si loin en ce sens que l'on peut superposer dans un objet des rémanences d'origine différente qui ajoutent leurs effets mais sans interférer au point de rester séparables. Toutes ces lois et propriétés ont été étudiées au laboratoire par de longues séries d'expériences, qui se continuent d'ailleurs, sur des terres cuites ordinaires ou spécialement préparées, sur des roches variées, mais aussi sur des minéraux purs (cristaux isolés ou poudres), par exemple sur de l'hématite ou encore sur des magnétites ou maghémites en grains dispersés dans un corps non magnétique, comme le kaolin, et constituant ainsi des sortes de roches élémentaires. Un objet donné, naturel ou préparé, étant ramené après chaque essai à l'état vierge magnétique par recuit, on peut étudier sur lui successivement les divers types d'aimantation, et les comparer dans des conditions strictement identiques de composition minéralogique. Dans chaque cas il est intéressant, d'une part de déterminer comment varie le moment rémanent M_r de l'objet en fonction de l'intensité H du champ auquel il a été soumis, c'est-à-dire de connaître la loi d'aimantation $M_r = f(H)$; d'autre part, de connaître les qualités de ce moment rémanent, essentiellement sa stabilité vis-à-vis des différentes actions destructives. Comme la rémanence d'un aimant, en effet, M_r peut diminuer soit spontanément en fonction du temps, soit par réchauffement, soit par action d'un champ magnétique alternatif que l'on ramène à zéro, sans à-coups, à partir d'une valeur donnée $H \sim$. Nous ne parlerons pas de la possibilité de désaimantation par action de champs continus appliqués en sens inverse de la rémanence (champ coercitif); dans le cas d'un corps hétérogène, c'est là une action compliquée, le champ pouvant agir à la fois en désaimantant certains grains et en aimantant les autres; l'action purement destructive d'un champ alternatif décroissant est beaucoup mieux définie.

Signalons dès maintenant que l'ensemble, apparemment inextricable, des faits établis expérimentalement, a été expliqué jusque dans le détail, par d'ingénieux travaux théoriques de L. Néel. Son idée au départ (1949) était que ces propriétés, communes à des corps chimiquement très variés, venaient d'une même cause physique, la division des minéraux magnétiques en grains si fins qu'ils ne peuvent contenir chacun qu'un domaine de Weiss. Ultérieurement (1955) il a pu bâtir une théorie plus générale n'impliquant plus la nécessité de grains monodomaines, théorie qui, non seulement explique la plupart des faits établis, mais sert de guide dans de nouvelles recherches expérimentales et continue d'ailleurs à inspirer d'autres travaux théoriques.

Les neuf types de rémanence, que nous allons rencontrer, sont couramment désignés par des sigles, que nous indiquerons, mais dont nous n'abuserons pas. Les trois premiers et les trois derniers modes n'impliquent pas de changements de température pendant l'action du champ magnétisant; on peut évidemment expérimenter à différentes tempéra-

tures maintenues constantes : nous ne considérerons ici que la température ordinaire que nous désignerons d'ailleurs toujours par 20 °C. Les trois mécanismes restants, dits thermorémanents, font intervenir un refroidissement du corps, en présence du champ considéré. Dans l'inventaire suivant, nécessairement très sommaire, des caractéristiques les plus importantes de chacun des types, nous éviterons des complications d'exposé en supposant que l'objet en essais ne renferme que des minéraux magnétiquement durs et chimiquement insensibles à des recuits pouvant aller jusqu'à 670 °C. Ces conditions sont généralement remplies par les terres cuites les plus variées. La seconde peut toujours être réalisée par de longs recuits préliminaires, qui sont susceptibles de changer le corps initial mais qui permettent ensuite de travailler sur un corps nouveau, soit, mais constant.

Aimantation rémanente isotherme, A.R.I.

C'est celle que l'on provoque par action brève d'un champ magnétique, comme on le fait ordinairement pour créer un aimant. Le moment rémanent M_r , pratiquement négligeable dans le cas des champs faibles (quelques Oersted), devient important avec des champs élevés, et il tendrait vers une limite M_{rs} (rémanence à saturation) avec des champs extrêmement forts. Cette variété d'aimantation est relativement très douce : en l'absence de tout champ, elle diminue spontanément, de plus en plus lentement (désaimantation par traînage); mais surtout des champs alternatifs faibles la réduisent déjà et elle se trouve pratiquement détruite quand leur intensité efficace H_{\sim} atteint la valeur du champ H créateur (2). Ainsi, des échantillons, collectés pour étude et porteurs de rémanence dure, sont insensibles aux champs continus faibles dans lesquels on les déplace au laboratoire ou au cours des transports en voiture ou par chemins de fer électriques; par contre, les champs magnétiques brefs mais intenses, créés par les courants électriques que constitue la foudre frappant le sol (des dizaines et jusqu'à des centaines de milliers d'ampères), peuvent produire de fortes rémanences. En région volcanique, il est fréquent de trouver sur des zones très étroites des aimantations presque à saturation entourées, à des dizaines de mètres à la ronde, par des aimantations anormales du type A.R.I. mais de plus en plus faibles. Dans de tels endroits, le champ magnétique terrestre est fortement perturbé et la direction de la boussole peut y perdre toute signification. La figure 5 correspond à un cas particulièrement spectaculaire d'anomalie magnétique de la composante verticale Z du champ terrestre, observée sur une petite surface du Plateau de Gergovie que traverse un dyke basaltique incontestablement foudroyé; les anomalies maximales, positive ou négative, sont de l'ordre de grandeur de la composante Z normale elle-même.

Ainsi, dans la nature, l'A.R.I., qu'elle soit très forte ou insidieusement faible, est pour nous une aimantation accidentelle n'ayant rien à voir avec une fossilisation du champ terrestre et dont on ne peut attendre que des ennuis.

Aimantation rémanente visqueuse, A.R.V.

En définissant l'aimantation rémanente isotherme, nous avons posé que le champ H agissait pendant un temps très

(2) Ce n'est là qu'une règle approchée, en supposant d'ailleurs que la direction du champ alternatif est celle de l'aimantation rémanente. Appliqué à angle droit, par exemple, le champ alternatif serait moins actif (de 2 à 3 fois pour fixer les idées).

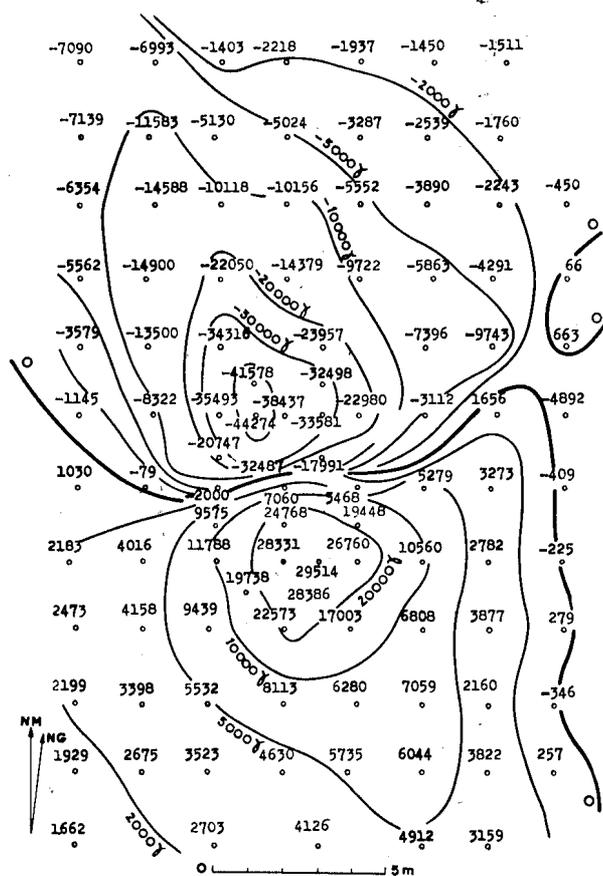


FIG. 5. — ANOMALIE DE LA COMPOSANTE VERTICALE DU CHAMP TERRESTRE AU VOISINAGE D'UN POINT FOUROYÉ SUR UN POINTEMENT BASALTIQUE DU PLATEAU DE GERGOVIE.

court. Prenons ce temps t comme unité; si nous répétons l'action du champ H pendant des temps plus longs, par exemple 10 t , 100 t , 1 000 t , nous observons que le moment rémanent M_r croît légèrement d'une expérience à l'autre et, dans l'exemple choisi, de quantités égales (loi logarithmique). Disons, sans plus insister, que l'aimantation supplémentaire correspondante, relativement négligeable devant l'A.R.I. proprement dite dans les champs moyens et forts, est par contre appréciable dans les champs faibles où elle est pratiquement proportionnelle à l'intensité H du champ appliqué (précisons à une température donnée, car elle est aussi fonction de la température).

L'action d'un champ alternatif détruit aisément l'A.R.V. pour sa partie principale, mais la destruction complète demande des intensités H_{\sim} d'autant plus grandes que le temps d'action a été plus grand lui-même. Dans sa théorie, L. Néel explique le phénomène de traînage magnétique par l'effet de l'agitation thermique sur les domaines élémentaires de Weiss des grains magnétiques, cette agitation amenant des probabilités, de plus en plus rares d'ailleurs, de changements (renversements ou déplacements de parois) que le champ H statique n'avait pas produits.

Dans la nature, ce type d'aimantation est général par suite de la présence continue du champ terrestre : temps très long, champ faible, le résultat est une aimantation qui reste faible mais sans être négligeable.

Aimantation rémanente anhystérique, A.R.A.

Dite parfois idéale, elle résulte de l'action d'un champ continu H aidée par l'action concomitante d'un champ alternatif assez fort (3) qu'on ramène progressivement à zéro. Le champ H étant à son tour supprimé, on observe une rémanence, magnétiquement dure, d'intensité appréciable pour H faible et d'ailleurs proportionnelle à H .

Ce type d'aimantation, qui n'existe guère dans la nature, est à craindre au laboratoire, tout particulièrement dans les opérations de désaimantation par action de champs magnétiques alternatifs au cours desquelles on doit compenser exactement le champ terrestre dans tout le volume occupé par l'échantillon en essais.

Aimantation thermorémanente, A.T.R.

L'aimantation thermorémanente est à la fois la plus étonnante et la plus efficace de celles que nous avons à considérer. L'objet ayant été chauffé jusqu'au delà du point de Curie du corps (T_c maximum de ses minéraux), on le laisse refroidir jusqu'à la température ordinaire dans un champ magnétique constant d'intensité H . On observe alors un moment rémanent (on dit thermorémanent) M_{rt} , qui, pour des champs faibles de l'ordre de l'Oe, est proportionnel à H mais avec un facteur de proportionnalité élevé, c'est-à-dire que le mécanisme thermorémanent est très efficace; pour H donné, faible, c'est de beaucoup le plus efficace. Autre fait, capital, le moment thermorémanent M_{rt} est très dur magnétiquement; des champs alternatifs de plusieurs dizaines d'Oe le laissent complètement inchangé et il faut atteindre plusieurs centaines d'Oe pour commencer à le réduire.

L'aimantation thermorémanente existe généreusement dans la nature; c'est la partie principale de l'aimantation naturelle des terres cuites et des roches volcaniques. Elle s'est fixée dans ces corps à l'époque de leur formation, quand ils se sont refroidis dans le champ magnétique terrestre tel qu'il était alors. Hormis le cas de corps ayant subi ensuite de profondes transformations chimiques ou des réchauffements importants, l'aimantation thermorémanente originelle reste immuable au cours des temps, c'est l'aimantation fossile parfaite.

Aimantation thermorémanente partielle.

L'aimantation thermorémanente précédente, acquise entre le point de Curie du corps et la température ordinaire, est dite « totale » par opposition avec la thermorémanence « partielle » que l'on peut provoquer au laboratoire en ne laissant agir le champ H , en cours de refroidissement, que dans l'intervalle correspondant à deux températures données T_1 et T_2 ; c'est-à-dire que l'on fait en sorte que du point de Curie à T_1 , puis ultérieurement de T_2 à la température ordinaire, le champ soit exactement annulé là où se trouve le corps. Le moment rémanent ainsi obtenu, pour un corps et un champ H donnés, dépend évidemment de T_1 et T_2 , et il est parlant de le noter $M(T_1, H, T_2)$. Parmi les propriétés de l'aimantation thermorémanente partielle, celle d'additivité est remarquable: la somme des moments acquis au cours d'essais successifs, dans des intervalles contigus

(3) Le moment acquis finalement dépend évidemment de l'intensité de ce champ, mais il ne croît presque plus au-delà de quelques centaines d'Oe.

de température, est égale au moment qui serait acquis en une seule opération, par action du même champ, dans l'intervalle total de température. Ainsi, trois aimantations partielles prises par une terre cuite, dans un champ d'intensité H , par exemple entre 670 et 400 °C, 400 et 250 °C, 250 et 20 °C, ont pour somme l'aimantation totale $M(670, H, 20)$ prise d'un seul coup entre 670 et 20 °C. Plus importante encore est la propriété dite de « mémoire magnétique », et l'on pourrait préciser mémoire magnétique des températures; une aimantation partielle acquise entre T_1 et T_2 est insensible à des réchauffements (en champ nul, faut-il ajouter) à toute température inférieure à T_2 et elle est détruite par un réchauffement jusqu'à T_1 . Il y a ainsi une sorte de réversibilité: le réchauffement $T_2 - T_1$ détruisant ce qui avait été thésaurisé durant le refroidissement $T_1 - T_2$ et cela correspond à une véritable indépendance des moments thermorémanents acquis aux différentes températures. Dans le cas simple des grains monodomains de L. Néel, les moments partiels sont portés par des catégories de grains différents; chaque grain, suivant sa nature mais surtout suivant son volume, est caractérisé par une température dite de « blocage » au-dessus de laquelle son aimantation spontanée (moment du domaine) est très mobile et au-dessous de laquelle elle est pratiquement figée. De cette indépendance des moments partiels, on peut déduire toutes sortes de conséquences, vérifiées expérimentalement avec une réelle précision. Par exemple, une aimantation totale $M(670, H, 20)$ réchauffée à T_0 perd la fraction de son moment qui est le moment partiel $M(T, H, 20)$ correspondant à l'intervalle de T_0 à 20 °C et le moment restant est celui qui aurait été obtenu par action du champ H depuis le point de Curie jusqu'à T . Il ne s'agit d'ailleurs pas d'une simple égalité numérique: ce moment restant est bien insensible à tout réchauffement, à température inférieure à T comme le serait $M(670, H, T)$.

Aimantation thermorémanente inversée.

C'est une curiosité plus intéressante sans doute du point de vue strict du physicien que par ses conséquences géophysiques réelles. Prévue théoriquement par L. Néel, réalisée couramment avec certains ferrites, elle a été observée expérimentalement sur quelques roches volcaniques dont la plus célèbre est une lave dacitique du Mont Haruna au Japon. Elle correspond au fait, à première vue troublant, que la thermorémanence acquise par refroidissement dans un champ magnétique est bien suivant la direction de ce champ mais en sens opposé, contrairement à ce qui se passe dans le cas général et que nous n'avons même pas précisé tant cela peut paraître évident. Cette « auto inversion » possible de l'aimantation thermorémanente a donné lieu à un nombre considérable de travaux théoriques (en particulier de L. Néel) et expérimentaux, et elle a été l'assise de toutes sortes de discussions tant sur ses causes que sur ses conséquences. Actuellement elle est considérée comme spéciale à des ilméno-hématites, d'un domaine étroit de composition, dans le réseau desquelles se produisent de très fortes interactions qui restent à élucider.

Aimantation rémanente cristalline, A.R.C.

Elle est dite aussi « chimique » ce qui, pas plus en français qu'en anglais (C.R.M.), n'entraîne de changement du sigle. Entrée ouvertement dans la littérature paléomagnétique depuis peu de temps, elle paraît de première importance dans le cas de roches très anciennes ou ayant subi des transformations chimiques; mais elle reste difficile à étudier au laboratoire, du moins dans des conditions indiscutables.

Cette rémanence résulte de la formation dans un champ magnétique de minéraux dont les cristaux, partant de germes extrêmement petits (où l'agitation thermique a un rôle dominant), augmentent progressivement de volume. Disons seulement qu'elle est d'intensité proportionnelle au champ, toutes choses égales et pour des champs faibles, et qu'elle est très dure magnétiquement, autant et même plus peut-être que la très tenace A.T.R. totale.

Une telle aimantation sera souvent insidieusement ennemie en paléomagnétisme, car elle peut avoir fossilisé le champ terrestre mais à une époque qui n'est pas bien définie en général.

Aimantation piézo-rémanente, A.R.P.

L'attention se porte de plus en plus actuellement sur l'effet de fortes pressions (milliers et dizaines de milliers d'atmosphère), unidirectionnelles et aussi hydrostatiques, sur des corps porteurs de rémanences, un tel effet pouvant être très important dans le cas des roches métamorphiques. Mais, inversement en quelque sorte, on soupçonne la possibilité de création de rémanences par effet continu d'une pression et d'un champ magnétique, le corps devenant d'ailleurs magnétiquement anisotrope sous des pressions unidirectionnelles. Cette anisotropie est très nette dans des cas bien étudiés de cristallisation sous tension; l'A.R.C. ainsi acquise tend à se placer dans le plan perpendiculaire à la direction de compression; plus exactement, ce plan devient de facile aimantation.

Aimantation rémanente détritique, A.R.D.

L'aimantation dite détritique se distingue de toutes les autres qui sont provoquées dans un objet préexistant, alors qu'elle se construit, en quelque sorte, en même temps que la matière qui la porte. Lorsqu'un sédiment se dépose en eau calme, celles de ses petites particules qui sont aimantées se comportent comme de minuscules boussoles à champ total; elles tombent lentement en restant orientées par le champ magnétique terrestre et le sédiment se trouve comporter tous ces petits aimants alignés. S'il se consolide, il doit garder une rémanence qui fossilise le champ de l'époque du dépôt. En réalité, les particules se posent en subissant des changements d'orientation aléatoires qui, pour des grains parfaitement sphériques, seraient sans conséquence pour ce qui concerne la direction de la rémanence. Mais les grains naturels ont toutes les formes, et des expériences de redéposition au laboratoire montrent que, si la déclinaison est bien conservée, l'inclinaison l'est très mal (différences allant jusqu'à 20° dans des champs de l'ordre du champ terrestre). Dans les conditions naturelles, des complications supplémentaires viennent de la pente possible du fond sur lequel le dépôt a lieu et aussi des courants hydrodynamiques près de ce fond.

Ainsi, si l'époque de fossilisation du champ est bien définie, son mécanisme est très infidèle et, finalement, nous n'avons là qu'un document magnétique bien inquiétant, d'autant plus encore que les aimantations détritiques sont souvent d'intensité extrêmement faible.

SUPERPOSITION DE DIVERSES RÉMANENCES ET LEUR ÉVENTUELLE SÉPARATION.

Dans la nature différents types de rémanences peuvent avoir été provoqués indépendamment dans un même corps. Un sédiment, portant une aimantation détritique originelle, peut avoir subi des changements minéralogiques ayant provoqué une aimantation cristalline, avec effet de pression

si le sédiment était enfoui profondément; dans ce cas il a aussi été réchauffé, ce qui lui a valu ultérieurement une aimantation thermorémanente partielle, acquise entre les températures de réchauffement et actuelle. Ce n'est pas tout, car il n'a pas échappé à l'aimantation visqueuse due à son séjour prolongé dans le champ terrestre à la température ordinaire et, pour une roche sédimentaire, cette A.R.V. peut constituer une part importante de l'aimantation naturelle. Enfin, reste une probabilité, forte pour une roche ancienne prélevée non loin de la surface du sol, d'aimantation A.R.I. par des coups de foudre ayant frappé son voisinage immédiat.

Il s'agit là d'un cas inextricable et c'est, plus ou moins, qu'on le veuille ou non, celui de toutes les roches très anciennes; mais il est heureusement des cas bien plus simples d'aimantations naturelles composées se prêtant à une analyse fine, quantitative. Cette situation favorable est presque de règle pour les terres cuites et les roches volcaniques, pas très anciennes, dont l'aimantation thermorémanente originelle, à la fois relativement stable et intense, n'a subi le plus souvent que de faibles modifications. D'une façon générale, la différence entre l'aimantation initiale et l'A.R.N. (aimantation rémanente naturelle) que nous mesurons, peut provenir de l'effet visqueux, de la foudre, de réchauffements et enfin de modifications minéralogiques qu'il faut bien envisager dans certains cas. Nous allons considérer successivement ces quatre possibilités en indiquant comment on peut conjurer leur éventuelle malfaisance. Nous abordons ainsi l'étude du « nettoyage magnétique », souvent considéré à l'étranger comme une technique nouvelle alors qu'il est pratiqué en France depuis longtemps.

Lutte contre l'aimantation visqueuse.

Depuis leur refroidissement, générateur du moment thermorémanent auquel nous nous intéressons, terres cuites et roches volcaniques ont subi l'action visqueuse du champ terrestre. Souvent l'A.R.V. ainsi acquise n'est qu'une fraction très faible de l'A.T.R., et pour l'apprécier il suffit, en principe, de mesurer l'effet visqueux pendant un intervalle de temps donné et d'extrapoler ensuite pour les milliers et les millions d'années en cause.

Au laboratoire magnétique de l'Institut de Physique du Globe, au Parc Saint-Maur, un contrôle de viscosité est appliqué à tous les échantillons recueillis par une double mesure de leur moment magnétique, une première fois après un séjour d'une quinzaine de jours dans la position qu'ils occupaient sur le terrain, et une seconde fois après un séjour analogue mais dans une position inversée par rapport au champ terrestre. L'effet visqueux se révèle par une légère différence entre ces deux moments et on retient, comme indice de viscosité de l'échantillon, le rapport de la demi-différence observée au moment total. La discussion rigoureuse de la signification de cette mesure et de son extrapolation à des temps très longs serait compliquée, mais on peut montrer qu'un indice de l'ordre de 1 %, fréquent pour les terres cuites, correspond à un effet perturbateur très faible de l'A.R.V. totale. Pour un indice beaucoup plus élevé (parfois plus de 10 % dans certaines roches volcaniques pas nécessairement très anciennes) toute tentative de correction de l'effet accumulé d'aimantation visqueuse devient sans signification et l'échantillon doit être rejeté.

Lutte contre l'A.R.I. : analyse par champs alternatifs.

L'expérience suivante est facile et instructive. Un échantillon de terre cuite, sur lequel on a préalablement étudié, à la température ordinaire, la loi d'acquisition d'A.R.I.,

est porté à 670 °C et on provoque une A.T.R. de champ faible en le refroidissant dans le champ terrestre par exemple; quand il a atteint 20 °C, on mesure son moment M_{rt} thermorémanent. On le soumet alors à un champ H de l'ordre de la centaine d'Oe dont on sait qu'il aurait produit un moment M_r sur le corps vierge. L'expérience montre que l'A.R.I. s'installe comme si l'A.T.R. n'existait pas, c'est-à-dire qu'on observe un moment effectif qui est la résultante des deux moments indépendants. Appliquons maintenant à l'échantillon ainsi doublement aimanté, un champ alternatif dont l'intensité maximum $H \sim$ s'élève dans les essais successifs. On observe que tout continue à se passer comme si les deux aimantations s'ignoraient mutuellement, l'A.T.R. restant immuable et l'A.R.I. se réduisant progressivement. En particulier, dans le cas spécial où M_{rt} et M_r sont antiparallèles et égaux, la résultante mesurée est nulle au départ et on assiste à ce fait paradoxal, l'apparition d'une rémanence sous l'effet purement destructeur du champ alternatif. Dans le cas général où l'A.T.R. et l'A.R.I. ont des directions différentes, on voit la résultante mesurée changer progressivement de direction. Dans tous les cas, dès que $H \sim$ dépasse nettement la valeur H du champ générateur de l'A.R.I., celle-ci est détruite et on retrouve, en grandeur et direction, le moment thermorémanent initial M_{rt} ; par différence, on peut d'ailleurs calculer le moment M_r ajouté. Ainsi, l'action progressive de champs alternatifs va au-delà d'un simple « nettoyage » de l'A.T.R., elle réalise une véritable analyse de la rémanence composée initiale, applicable aux aimantations naturelles constituées par une A.T.R. souillée par de l'A.R.I. de foudre.

Il faut remarquer que la séparation qui vient d'être décrite n'a cette rigueur que si les deux aimantations sont d'intensités relativement modérées. En effet, A.T.R. et A.R.I. de plus en plus intenses sont aussi de plus en plus semblables comme le montrent clairement les courbes de désaimantation par champs alternatifs de la figure 6, dont les ordonnées sont des pourcent de l'aimantation restante

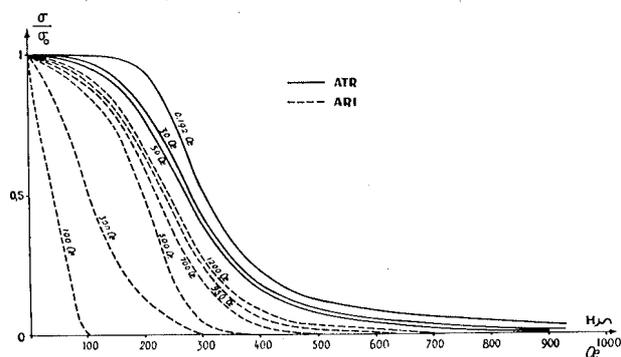


FIG. 6. — ÉVOLUTION DE LA VALEUR RELATIVE D'AIMANTATIONS THERMORÉMANENTES ET RÉMANENTES ISOTHERMES ATTAQUÉES PAR DES CHAMPS ALTERNATIFS D'INTENSITÉ MAXIMUM PROGRESSIVEMENT CROISSANTE (MAGNÉTITE EN GRAINS FINS DISPERSÉS AU Taux DE 1 % DANS DU KAOLIN). THÈSE F. RIMBERT 1958.

par rapport à l'aimantation attaquée au départ. Les courbes en trait plein appartiennent à des A.T.R., celles en pointillé à des A.R.I. La plus haute (A.T.R.) et la plus basse (A.R.I.) correspondent à des rémanences faibles; s'écartant d'elles on va vers des rémanences de plus en plus fortes qui tendent

vers le même comportement. Il en résulte qu'une A.T.R. souillée par une puissante A.R.I. n'est plus séparable. Ainsi, des roches volcaniques voisines d'un impact de foudre n'ont plus d'intérêt sauf si l'on se proposait d'étudier l'effet de la foudre !

Signalons, sans insister, quelques autres faits importants relatifs aux autres types de rémanences. Comme on l'a vu, des champs alternatifs faibles détruisent aussi la partie principale de l'aimantation rémanente visqueuse qui ne diffère pas essentiellement de la partie douce d'une A.R.I. Quant à celle-ci, elle disparaît spontanément, peu à peu, de sorte qu'on ne la trouve plus dans une A.R.I. très ancienne. Une aimantation cristalline éventuelle se comporterait comme une A.T.R., c'est-à-dire résisterait aux champs alternatifs modérés.

Lutte contre l'effet des réchauffements : analyse thermique.

L'analyse par recuits successifs est particulièrement intéressante sur un corps porteur d'aimantation thermorémanente, ce qui est le cas des terres cuites et des roches volcaniques. Cette analyse thermique, qui peut détecter et corriger la perturbation de l'aimantation originelle provoquée par un éventuel réchauffement accidentel, est encore une source de curieuses applications archéologiques et géologiques, tout cela découlant des lois rigoureuses auxquelles l'aimantation thermorémanente partielle obéit nonobstant la complexité du corps en cause.

L'exemple suivant fera bien comprendre les possibilités inattendues d'une telle technique. Soit une tuile romaine qui, cuite en position « debout », s'était ainsi refroidie dans le champ magnétique terrestre de l'époque, d'inclinaison I et d'intensité F . Elle avait acquis le moment thermorémanent total $M(670, F, 20)$ incliné de I sur l'horizontale. Si nous extrayons maintenant cette tuile du mur romain où elle avait été ultérieurement placée « à plat », et si nous la débarrassons de son A.R.V. bimillénaire par action d'un champ alternatif de quelques dizaines d'Oe, nous retrouvons son aimantation telle qu'elle était à l'origine et, posant que la brique a été cuite debout, nous retrouvons l'inclinaison I . Mais imaginons que la construction ait subi un incendie au cours de son histoire et que la tuile considérée se soit trouvée portée de ce fait à 250 °C par exemple. Bien entendu elle s'était refroidie après l'incendie dans sa position à plat, dans un champ ayant maintenant une intensité F' et une inclinaison I' . D'après les propriétés de l'A.T.R. partielle, la tuile possède deux thermorémanences qui s'ignorent mutuellement : suivant la direction originelle, un moment restant $M(670, F, 250)$, égal à l'A.T.R. qui aurait été acquise au refroidissement initial si le champ terrestre avait disparu dès 250 °C; et, suivant la direction très différente du champ dans lequel elle se trouvait à l'époque de l'incendie, un moment thermorémanent $M(250, F', 20)$. La mesure du moment magnétique actuel de la tuile ne nous informe évidemment pas de cette dualité; elle fournit seulement la résultante des deux moments dont l'orientation ne nous permet plus de retrouver l'inclinaison I ancienne. Mais, réchauffons progressivement la tuile, par exemple à 50 °C, 100 °C, 150 °C... en la laissant chaque fois se refroidir dans un champ magnétique parfaitement annulé. Dans le premier cas envisagé d'une tuile non réchauffée, nous verrons le moment magnétique se réduire progressivement en intensité mais sans changer de direction; dans le second cas de la tuile aux deux A.T.R., tout recuit n'atteignant pas la température 250 °C, laisse intact le premier moment et détruit partiellement le second; il s'ensuit que la résultante mesurée change de direction

à chaque étape. Mais, quand nous aurons atteint 250 °C, le second moment ayant complètement disparu, la direction du moment restant mesuré après chaque recuit sera constante et présentera l'inclinaison I pour la tuile debout.

Ainsi, l'observation de la direction, constante ou variable, de l'aimantation restante, à la suite de recuits progressifs, nous indique si l'A.T.R. est unique ou composée et nous permet de retrouver sa direction originelle; mais elle nous donne aussi une température, celle à laquelle la tuile avait été portée durant l'incendie.

On pourrait poursuivre la discussion sur le « nettoyage magnétique », limitons-nous aux quelques remarques complémentaires suivantes :

— Nous avons sous-entendu que la température extérieure restait de 20 °C et on peut s'en inquiéter étant donnée l'ampleur possible des variations « climatiques ». Effectivement, toute élévation de température produit une légère désaimantation et inversement. Mais la riposte est facile, il suffit d'imposer à tous les objets un nettoyage thermique modéré, par exemple à 100 °C, dont l'effet sera de détruire toute trace d'actions thermomagnétiques ayant eu lieu au-dessous de cette température.

— Nous avons choisi pour exemple un réchauffement à 250 °C correspondant juste à une des étapes de nos recuits. En réalité, l'analyse des résultats se fait sur des courbes (variation, en fonction de la température de recuit, de 3 composantes trirectangulaires du moment) et la température de coupure apparaît sans que cette coïncidence soit nécessaire.

— Si le réchauffement par incendie avait dépassé 670 °C, l'aimantation originelle aurait été entièrement détruite; les directions des moments des tuiles, en place dans le mur, seraient alors parallèles. C'est ce qui se produit dans la partie inférieure des parois de fours bâties éventuellement avec des terres cuites de réemploi.

— On pourrait se demander si l'A.T.R. « basse » $M(250, F', 20)$ n'est pas beaucoup plus douce vis-à-vis des champs alternatifs que l'A.T.R. « haute », reste de l'aimantation originelle. De fait, la différence n'est pas assez franche pour qu'on puisse trouver là un moyen de nettoyage sans recuit.

— Inversement, le recuit n'offre pas la possibilité de séparer nettement l'A.R.I. de l'A.T.R. car si l'A.R.I. est

plus sensible que l'A.T.R. totale à des chauffés modérées, elle ne disparaît qu'au point de Curie des minéraux. Par suite si l'on soupçonne sa présence, il faut d'abord l'enlever par action de champs alternatifs modérés.

Ainsi, les deux méthodes très efficaces d'analyse des rémanences, par champs alternatifs et par recuit, ont chacune leur domaine de prédilection; la première agit contre les rémanences isothermes (aimantation A.R.I. due à la foudre et A.R.V.), la seconde contre les thermorémanences de recuit accidentel.

Transformations minéralogiques.

Terres cuites et roches sont susceptibles d'avoir subi, dans leurs minéraux ferrimagnétiques, des modifications soit chimiques : magnétite oxydée en hématite ou inversement; soit purement physiques : hématite évoluant en maghémite (beaucoup plus magnétique) ou encore titanomagnétite s'exsolvant en deux autres à points de Curie encadrant le sien.

La transformation d'un grain magnétique aimanté a pour premier effet de détruire sa rémanence; il en résulte que l'intensité d'aimantation globale d'un corps partiellement altéré se trouve réduite mais sans changement de direction. Une altération minéralogique modérée n'entraîne donc pas d'erreur dans les recherches courantes qui portent sur l'orientation du champ ancien; elle serait grave seulement si l'on devait utiliser les valeurs de l'intensité d'aimantation, ce qui est le cas des recherches sur l'intensité du champ ancien. Mais la formation de minéraux ferrimagnétiques entraîne l'apparition de rémanences nouvelles dont la plus à craindre est l'aimantation rémanente cristalline particulièrement désagréable par sa grande dureté magnétique. Pour la démasquer on ne peut recourir qu'à des tests, dits de « terrain », dont le plus simple consiste à comparer les champs fossiles déterminés sur des échantillons d'altération et plus généralement de composition aussi différente que possible, dans une même formation. Un moyen de lutte élégant, mais difficile à mettre au point, consisterait à détruire sélectivement les minéraux nouveaux, formés à la température ordinaire; ce n'est pas le cas des roches métamorphiques dont il est inutile de répéter qu'il est d'avance inextricable.

III. — Recherches archéomagnétiques

INVENTAIRE DES POSSIBILITÉS.

Le problème fondamental de l'archéomagnétisme est la poursuite, pas à pas, de la variation lente du champ terrestre sur un temps aussi long que possible à partir de l'époque actuelle, en différentes régions du Globe. Etant donné ce que nous savons des quelques dernières centaines d'années, nos « pointés » de temps doivent ne comporter que des erreurs très inférieures à un siècle, sinon ce ne serait plus qu'une sorte de bruit de fond que nous mesurerions. Cette nécessité de datation précise est le seul frein aux études archéomagnétiques qui ne présentent plus de véritable difficulté technique.

Le matériau idéal serait un corps qui aurait fossilisé le champ terrestre sans le déformer, à une date connue à une décennie près, sous forme d'une aimantation magnétiquement dure et qui n'aurait subi ensuite aucune addition de rémanences parasites; le matériau n'ayant subi lui-même ni modifications minéralogiques, ni changements de position ou d'orientation.

La rencontre de ces conditions n'est pas impensable; elle s'est trouvée à peu près réalisée sur des restes bien en place de parois de fours de potiers puniques, à Carthage, fours qui étaient en activité au moment de l'invasion romaine et avaient été arrêtés par la destruction générale. Pratiquement on peut transiger un peu sur chaque condition; ainsi, il suffit que les rémanences parasites soient séparables par le jeu des nettoyages magnétiques décrits précédemment et, sauf s'il s'agit d'une recherche d'intensité, il suffit que les transformations minéralogiques n'aient pas entraîné une aimantation rémanente cristalline.

Jusqu'ici les seuls matériaux qui réalisent tant bien que mal la condition essentielle, celle de la fixation du champ à une époque bien définie, sont d'une part les varves porteuses d'A.R.D., d'autre part les roches volcaniques et les terres cuites porteuses d'A.T.R. Des efforts considérables ont été dépensés pour « interroger » ces corps; indépendamment des difficultés techniques qu'il a fallu surmonter (prélèvements et mesures magnétiques), on s'est heurté à d'autres venant des matériaux eux-mêmes et il en est résulté des limitations sévères de possibilités pourtant alléchantes.

Les varves.

Des sédiments déposés en eau calme se présentent parfois en feuillets correspondant chacun au dépôt d'une année.

Il peut en être ainsi dans les régions péri-glaciaires où se succèdent des dépôts de grosses particules à l'époque de la fonte des neiges et des particules de plus en plus fines à la saison froide suivante. Cette alternance saisonnière de granulation peut rester visible, rappelant celle des anneaux annuels de troncs d'arbres. Les géologues trouvent dans ces varves un cas unique de durée de dépôt exactement dénombrable en années et, mieux encore, de datation absolue si la sédimentation se poursuit actuellement. Les climatologues s'intéressent aussi à de tels dépôts dont les variations peuvent refléter des variations climatiques.

D'après ce que nous avons dit de l'aimantation rémanente détritique, les varves doivent la présenter au mieux, leur dépôt s'étant effectué dans des eaux dont le calme a permis justement à la stratification de s'établir. Dès 1926, G. Ising, en Suède, avait vu là une possibilité d'applications archéomagnétiques. Déçu par les résultats qu'il obtenait dans la mesure des rémanences naturelles de séries varvées de son pays, il avait songé à utiliser l'anisotropie magnétique. En effet, toujours à cause de l'action directrice du champ terrestre pendant la chute des particules, le matériau consolidé devrait présenter une direction de plus facile aimantation (induite) suivant la direction du champ de l'époque du dépôt. Une nouvelle déception attendait G. Ising qui ne publia ses observations que bien plus tard; d'abord, les différences à mesurer étaient relativement faibles, mais surtout l'anisotropie effective venait d'un effet parasite, vraiment congénital, la structure feuilletée elle-même.

Entre temps, des études analogues étaient entreprises à la Carnegie Institution à Washington et des résultats étaient présentés dans plusieurs publications dont la plus importante, celle de 1948, portait principalement sur une longue série varvée du N-E des Etats-Unis qui se situerait entre 15 000 et 10 000 BN (before now). On trouve dans le mémoire des graphiques montrant les variations présumées de la déclinaison et de l'inclinaison magnétiques durant ces 50 siècles. Malheureusement, les auteurs, eux-mêmes, inquiets ne serait-ce que par les résultats de leurs expériences de dépôt provoqué, n'ont pas confiance dans leurs conclusions, surtout pour ce qui concerne l'inclinaison magnétique; pour la déclinaison, ils retiennent que durant les 5 000 ans en cause elle semble avoir divagué de part et d'autre de sa valeur actuelle avec une ampleur totale, de l'ordre de 30°, ne dépassant pas celle observée en Europe durant les 3 ou 4 derniers siècles. L'étude des varves en resta là aux U.S.A., et on peut se demander si c'est, satisfaits ou déçus,

que les géomagnéticiens de la Carnegie Institution glissèrent aussitôt vers l'étude magnétique des sédiments quelconques (censés présenter le même type d'aimantation), ouvrant grande ainsi une porte qui n'était qu'entrebaillée sur les temps géologiques, champ immense du paléomagnétisme.

L'étendard du magnétisme des varves fut relevé plus tard en Angleterre et en Suède. A l'Université de Birmingham une équipe de chercheurs s'acharne sur tous les aspects de ce problème, multipliant les expériences soit sur des varves artificielles provoquées dans des conditions les plus variées, soit sur des varves naturelles, dans l'espoir de trouver une possibilité de correction des effets parasites. C'est leur conclusion qui a été mentionnée à propos de l'A.R.D., et elle revient à dire que les varves ne peuvent pas fournir la précision minimum exigée en archéomagnétisme.

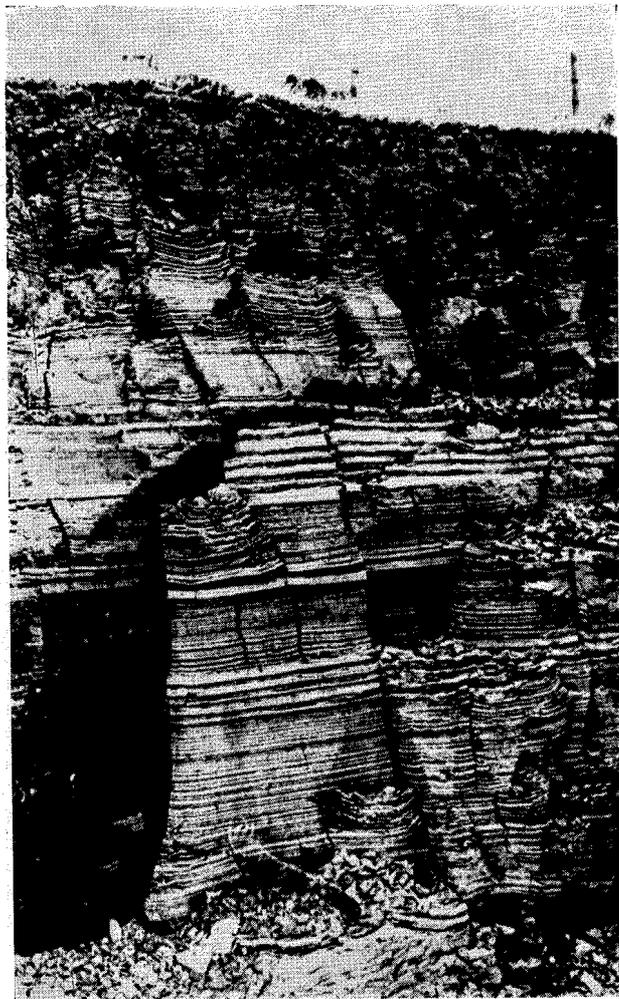


FIG. 7. — EXEMPLE D'UNE TRÈS BELLE FORMATION VARVÉE.

Les coulées volcaniques historiques.

Elles ne sont pas très nombreuses mais, certaines, du fait des catastrophes qu'elles ont provoquées, sont datées avec une extrême précision. Les roches qui les constituent portent des A.T.R. relativement fortes, faciles à mesurer. Mais cette

face brillante a un sombre revers : c'est une grave infidélité dans la fossilisation du champ terrestre dont une manifestation immédiate est la dispersion des directions d'aimantation d'un point à un autre d'une même coulée, même pour des échantillons voisins. Les causes de cette dispersion ne sont que trop faciles à prévoir.

On rencontre d'abord les effets attendus de l'aimantation visqueuse, du réchauffement partiel par les coulées suivantes et de l'aimantation isotherme par effet de foudre. Cette dernière cause de perturbation est particulièrement grave par l'intensité des aimantations parasites qu'elle provoque et aussi par sa fréquence, les formations volcaniques souvent en relief étant généreusement foudroyées. Au cours des prélèvements d'échantillons il faut éviter au maximum les zones à aimantation anormale, qu'une boussole ordinaire permet de détecter, de façon à échapper aux perturbations les plus criantes. Cette précaution prise, les techniques du nettoyage magnétique pourront faire le reste.

Mais il est d'autres causes de dispersion qui jouent au cours même de la venue des coulées. D'abord, qui a vu le chaos d'une extrusion volcanique, ne serait-ce qu'en images, aura peine à admettre que tout élément de la coulée n'a plus subi de déplacement, par entraînement ou affaissement, dès le moment où son aimantation a commencé, bien au-dessus de 500 °C. Puis, et c'est là leur défaut majeur, les laves, par leurs aimantations, rémanente et induite, relativement très fortes, créent un champ parasite qui se compose avec le champ terrestre normal. Cette modification, qu'on observe facilement en terrain volcanique, est non seulement forte (il s'agit souvent de plusieurs degrés en direction) mais aussi très irrégulière au hasard des caprices de forme de la masse aimantée (1). Ainsi, une coulée nouvelle se refroidissant parmi d'autres enregistre un champ perturbé; mais serait-elle seule en terrain non aimanté que sa propre aimantation modifierait encore le champ à son intérieur (c'est l'effet de champ démagnétisant) d'une façon qui dépend de sa forme et de l'intensité totale de son aimantation, d'ailleurs variable tout au long de son refroidissement. Cet effet n'épargnerait même pas une coulée théorique, horizontale, d'épaisseur constante et s'étendant à l'infini; l'inclinaison magnétique s'y trouverait systématiquement réduite, la diminution pouvant se compter encore en degrés. Il en résulte que les coulées volcaniques n'ont pas vraiment le standing archéomagnétique ce qui ne les empêche pas, et nous expliquerons ce paradoxe, de rester des matériaux de choix en paléomagnétisme.

Ce ne sont d'ailleurs pas tant ces considérations pessimistes qui ont limité l'utilisation des coulées volcaniques historiques, mais la difficulté très matérielle de les identifier dans leur enchevêtrement sur le terrain, même lorsqu'il s'agit de venues dont les dates sont historiquement sûres. L'étude la plus importante à ce sujet est celle que R. Chevalier avait conduite après la première guerre mondiale sur les coulées historiques de l'Etna. Intéressant par les innovations qu'il apportait dans les mesures et par l'originalité de son but, ce travail a incontestablement ramené l'attention des géophysiciens sur le champ fossile qui avait été l'objet d'études brillantes mais trop imprécises vers le début

(1) Le calcul est immédiat pour une irrégularité qui serait en forme de sphère; I étant son intensité d'aimantation et V son volume, elle agirait à l'extérieur comme un doublet situé en son centre, de moment VI , et le champ perturbateur serait maximum à ses deux pôles magnétiques où il aurait pour mesure $8/3 \pi I$. Avec $I = 10^{-2}$ u.e.m., intensité non exceptionnelle, cela fait 0,08 Oe, alors que le champ terrestre normal n'est que de l'ordre de 0,5 Oe.

du siècle actuel. La recherche de R. Chevallier avait porté sur 7 coulées qu'il admettait bien datées, entre 1911 et 1284, et sur 4 autres plus douteuses. Ayant prélevé sur chacune plusieurs échantillons, il n'avait pu que déplorer l'énorme dispersion des valeurs individuelles de D et I (déclinaison et inclinaison) obtenues pour chaque coulée; et il en résultait nécessairement une certaine irrégularité dans la disposition des points correspondant à des dates successives, sur les graphiques représentant l'évolution de D et I en fonction du temps. Cette double dispersion serait probablement un peu réduite avec les techniques actuelles, mais elle vient surtout des laves elles-mêmes.

Dans la discussion de ses résultats, R. Chevallier s'était montré déçu de ne pas voir les variations de D , et surtout celles de I , obéir à une certaine symétrie par rapport à celles observées pendant les derniers siècles. Une telle exigence, qui ressortit à l'idée répandue de périodicité de la variation séculaire, n'est pas à retenir; les variations sont ce qu'elles sont, périodiques ou plus capricieuses et notre problème est justement de les retracer. Aussi, les résultats de R. Chevallier sont peut-être moins erronés qu'il ne le craignait tout en restant cependant difficilement utilisables. Par exemple, l'inclinaison retrouvée sur la coulée de 1911, celle qui, a priori, offre le moindre risque d'aimantation parasite et d'erreur sur la datation, est inférieure de 6° à la valeur normale de I en Sicile à cette époque.

Quelques mesures sporadiques ultérieures ont porté sur des coulées volcaniques historiques d'Islande (Hospers) et du Japon (Nagata, Kato, Yukutake) mais on y retrouve les mêmes défauts, inhérents au matériau lui-même: grosse dispersion des valeurs individuelles mesurées sur chaque coulée et très petit nombre de ces coulées qui soient bien datées.

Un travail très récent (1963) de R.R. Doell et A. Cox mérite une mention spéciale. Il porte sur des coulées historiques des îles Hawaï, 9 au total épanchées entre 1750 et 1955. Prélèvements et mesures des rémanences ont été assez soignés mais surtout, cette fois, un nettoyage magnétique attentif a été effectué. De la longue discussion des auteurs sur ce qu'on peut attendre de telles mesures il ressort que, malgré les précautions prises, l'imprécision reste forte. Nous mentionnerons plus loin leurs conclusions dans l'exposé des résultats archéomagnétiques.

Les terres cuites.

Ce jeu de large destruction auquel nous venons de nous livrer, sur les varves et les roches volcaniques, va s'arrêter là; heureusement, car si les terres cuites n'étaient pas les excellents matériaux qu'elles sont, il n'y aurait plus guère d'archéomagnétisme en l'état actuel des choses.

Comme les roches volcaniques, les terres cuites portent fondamentalement une A.T.R., acquise pendant le refroidissement consécutif à leur cuisson. Le plus souvent, la permanence de leur position de cuisson est plus sûre que pour les roches volcaniques et leurs intensités d'aimantation sont nettement plus faibles ce qui minimise les perturbations du champ alentour d'elles. Malgré leur évidente variété, les terres cuites ont une autre qualité déjà soulignée, c'est leur grande dureté magnétique comparée à celle de la plupart des roches volcaniques. Il s'ensuit que, très aimantables en thermorémanence, elles le sont peu en rémanence isotherme et, en même temps, leurs A.T.R. sont très résistantes comparées à leurs A.R.I. Et tout cela entraîne des possibilités de nettoyages magnétiques aux conclusions catégoriques.

Les propriétés intrinsèques des terres cuites sont donc très favorables à la fossilisation fidèle du champ terrestre. Nous verrons comment elles permettent d'en retrouver la direction et l'intensité. Mais ces déterminations n'ont d'intérêt que si la date du refroidissement (du dernier dans le cas des parois de fours ou de foyers) est connue à quelques décades près. Malheureusement il n'existe actuellement aucune méthode physique, y compris le datage au carbone radioactif, qui permette d'atteindre une telle précision; les âges ne peuvent être établis que par des méthodes purement archéologiques ce qui laisse seulement l'espoir de couvrir la période historique et de pénétrer un peu dans les temps préhistoriques. Il faut remarquer avec soulagement que les exigences en datation ne sont peut-être pas aussi dures pour ce qui concerne l'intensité du champ dont la variation pourrait être moins effervescente que celle de la direction. Remarque déjà faite, enfin, beaucoup d'applications foisonnent, imprévues, autour des propriétés magnétiques des terres cuites, liant de plus en plus archéologues et géophysiciens dans une étroite collaboration.

LES TECHNIQUES DE MESURE.

Le sujet est immense et nous donnerons seulement une idée des méthodes du laboratoire de l'Institut de Physique du Globe, au Parc Saint-Maur, depuis longtemps spécialisé dans l'étude des rémanences fossiles. Nous penserons surtout terres cuites, mais les mêmes techniques sont utilisables pour tous les types de roches.

Recherche de la direction du champ ancien dans le cas d'un four.

Des vestiges de fours, aux formes et dimensions variées, apparaissent souvent dans les fouilles archéologiques; si les parties hautes sont presque toujours effondrées, il reste des parties basses encore bien en place: le fond du foyer, ses parois latérales et, parfois, sur des fours céramiques la sole épaisse, percée de « trous à feu » par lesquels les flammes montaient du foyer dans la chambre de cuisson le surmon-

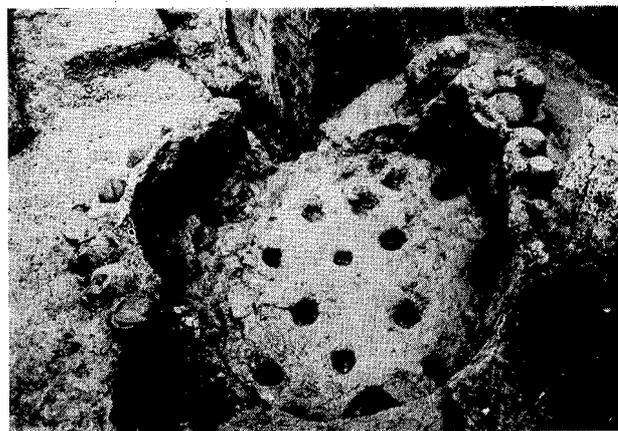


FIG. 8. — FOUR ROMAIN, A POTERIES, DU I^{ER} SIÈCLE, A NEUSZ (RHÉNANIE).

(Photo « Rheinisches Landesmuseum » Bonn).

La sole est bien conservée avec ses trous à feu; de la chambre contenant les poteries à cuire il reste l'amorce de parois verticales; les poteries qu'on y voit font corps avec la paroi faite de terre argileuse et de débris de terres cuites.

tant (fig. 8). Supposons résolu le problème de la date de cessation de l'activité du four; il faut encore discuter avec les archéologues du choix des parties non ruinées les plus convenables, c'est-à-dire offrant les meilleures garanties qu'elles n'aient pas changé de position depuis l'origine et qu'elles aient été fortement chauffées quand le four était actif.

Ces conditions étant remplies, et l'hypothèse de réchauffements ultérieurs et de coup de foudre étant provisoirement écartée, les restes de terre cuite en place portent une aimantation rémanente qui est dirigée comme l'était le champ terrestre à l'époque de l'abandon du four. La mesure de cette direction sur place n'est pas possible; on doit recueillir des fragments de la terre cuite, mais en fixant sur chacun des repères exacts d'orientation. En principe, un seul échantillon pourrait suffire; bien entendu, dans la mesure du possible, on en prend plusieurs aussi différents qu'il se peut les uns des autres par leur position dans le four et par leur composition minéralogique, très variable suivant les conditions de cuisson en chaque point.

— Prélèvement des échantillons (fig. 9).

On repère l'attitude de l'échantillon au moyen d'une masse de plâtre, à faces trirectangulaires que l'on moule sur la portion de terre cuite à enlever, préalablement un peu dégagée. Le moule, à section carrée, constitué par



FIG. 9. — PRÉLÈVEMENT SUR LA SOLE D'UN FOUR A TUILES, A PALAJA (AUDE).

(Photo A. Blanc, Carcassonne).

quatre plaques de duralumin articulées, étant posé sur le bloc à prélever et soigneusement nivelé, on le remplit de plâtre qui enrobe en partie la terre cuite. Lissant alors, en glissant sur les bords du moule, la partie supérieure du plâtre encore mou, on obtient un plan bien défini et horizontal. Dès que le plâtre est sec, on trace sur cette surface un trait fin, le long d'une règle à échelle posée sur la surface et pointée, en visées réciproques, sur un théodolite préalablement installé loin de la fouille et orienté sur le soleil (2); des calculs ultérieurs donnent l'azimut exact de la ligne repère. Le moule étant enlevé, on détache au burin,

sans s'inquiéter de sa forme, un bloc de terre cuite faisant corps avec le trièdre de plâtre qui définit son orientation in situ avec une précision de l'ordre du quart de degré (fig. 10).

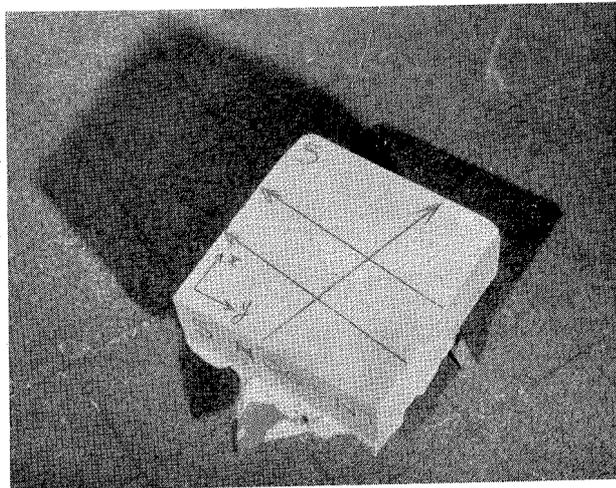


FIG. 10.

— Mesure des moments magnétiques.

La détermination du moment magnétique d'un échantillon est obtenue en mesurant ses composantes suivant les trois directions orthogonales définies par les faces du bloc de plâtre.

La méthode de choix est celle dite « par induction » qui s'appuie sur le principe de la réciprocité des phénomènes électromagnétiques et d'induction. Soit un système de bobines à champ uniforme dans un volume étendu, c'est-à-dire tel que si l'on y faisait passer un courant d'intensité i (en u.e.m.) il en résulterait dans tout le volume considéré un champ magnétique de direction constante et de valeur Gi . Inversement en quelque sorte (et i étant nul), si on place un corps aimanté dans la région d'uniformité, chacune de ses particules crée à travers les bobines un flux magnétique égal au produit de la constante électrodynamique G par la projection de son moment magnétique suivant l'axe de champ. Cet axe étant par hypothèse constant dans tout le volume, il s'ensuit que le corps entier produit un flux total égal à $G.M_x$, M_x étant la projection de son moment global sur l'axe des bobines. La condition d'uniformité, qui est essentielle, impose évidemment le choix de bobines relativement grandes devant les dimensions des échantillons et cela conduira à bobiner beaucoup de kilogrammes de cuivre; mais la forme de l'objet et la répartition de l'aimantation à son intérieur sont indifférentes; seul est en cause le moment global de l'échantillon agissant par sa composante alignée sur l'axe des bobines (3).

(2) On pourrait éviter l'emploi d'un théodolite en se bornant à tracer l'ombre d'un fil à plomb, à un instant déterminé avec précision; le calcul est alors celui d'un orientation sur le soleil par l'heure.

(3) Il en serait autrement avec des magnétomètres qui exigent, dans le cas de corps peu aimantés, une forme géométrique simple et une répartition uniforme de l'aimantation.

L'inductomètre le plus simple qu'on puisse imaginer consisterait en un solénoïde relié à un galvanomètre balistique; l'échantillon étant placé au centre de la bobine avec l'une de ses directions repères dirigée suivant l'axe de la bobine, son enlèvement brusque produirait une variation de flux, mesurée par la déviation balistique, et égale au produit de la constante de la bobine par la valeur de la composante correspondante du moment. En réalité, il faut faire mieux, ne serait-ce que pour éviter les variations aléatoires de flux, importantes devant celles à mesurer, que produiraient dans le solénoïde les variations incessantes du champ terrestre perturbé par l'environnement extérieur et intérieur au laboratoire.

L'inductomètre le plus sensible du Laboratoire du Parc Saint-Maur, construit il y a une dizaine d'années dans les ateliers du C.N.R.S. à Bellevue, réalise cette condition avec un système de quatre bobines et il fournit des mesures absolues par utilisation d'une méthode de zéro. Le circuit est constitué par deux bobines d'Helmholtz emboîtées (4) de rayons moyens R et $2R$, et branchées en opposition (fig. 11). Les nombres de spires, respectivement N et $N/4$, rendent les surfaces égales. L'ensemble offrant ainsi une surface nulle aux champs variables résultant des causes

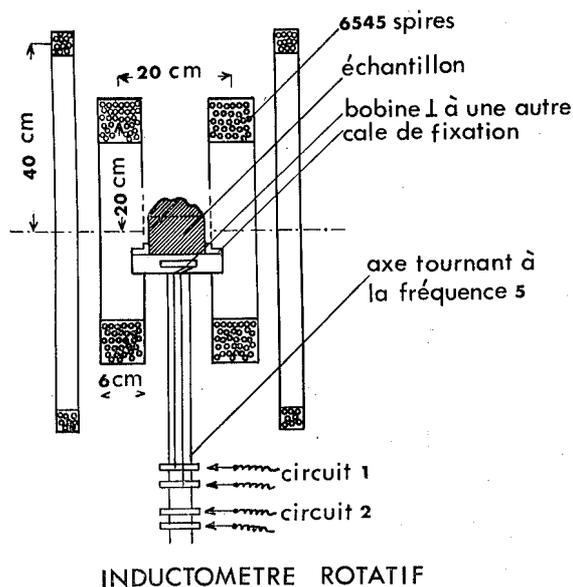


FIG. 11.

extérieures, le flux dû à la partie uniforme de ces champs perturbateurs est toujours nul, mais la compensation va plus loin, car la symétrie du système entraîne aussi l'élimination de l'effet de leur gradient. Etant donnés les rapports des rayons et des nombres de spires, les constantes électrodynamiques des deux bobines d'Helmholtz sont dans le

(4) Une « bobine d'Helmholtz » est constituée par deux bobines circulaires, identiques, ayant même axe et séparées par une distance égale à leur rayon. Cette condition, dite d'Helmholtz, réalise une grande uniformité de champ parallèlement à l'axe du système dans un volume étendu autour de son centre, région qui reste très accessible contrairement à ce qui se passe dans un solénoïde long.

rapport de 8 à 1, ce qui réalise une région centrale d'uniformité dont la constante G est les $7/8$ de celle de la bobine de rayon R seule. Le $1/8$ perdu et les bobines de grand rayon constituent le tribut payé à la compensation. Les valeurs adoptées dans l'appareil existant sont : $R = 19,7$ cm et $N = 6\,545$ spires.

L'échantillon à mesurer est fixé sur un plateau horizontal qui est situé vers le centre des bobines et qu'on peut entraîner en rotation autour d'un axe vertical à la vitesse de

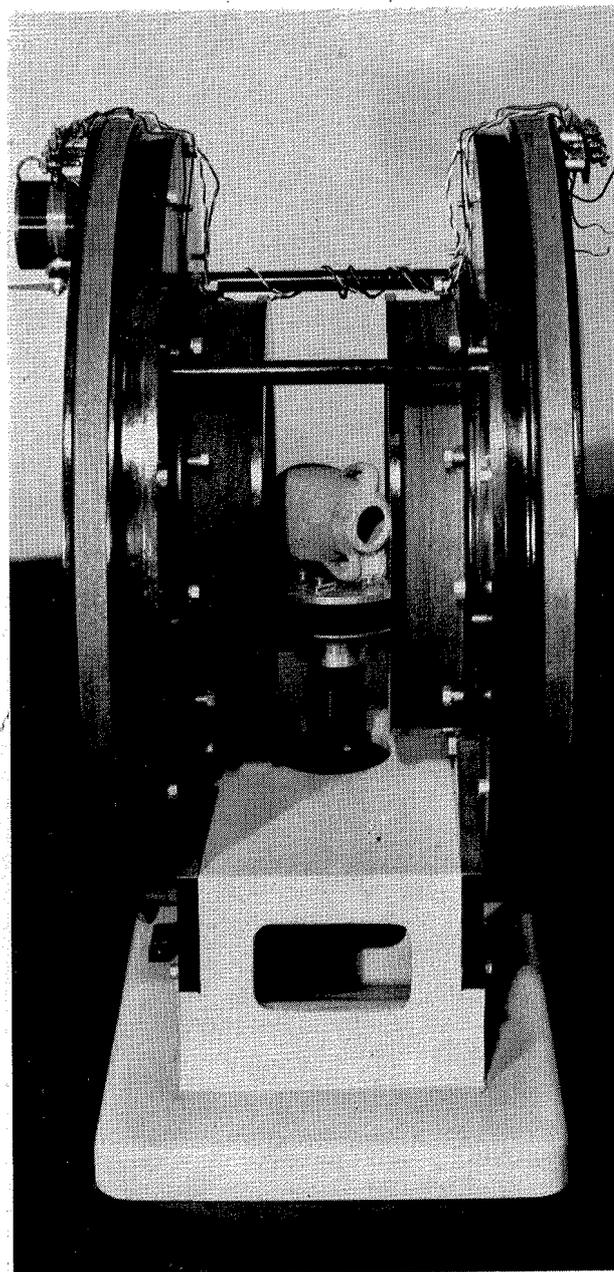


FIG. 12. — INDUCTOMETRE ROTATIF DU LABORATOIRE DU PARC SAINT-MAUR AVEC UNE POTERIE PUNIQUE EN PLACE SUR LE PLATEAU TOURNANT.

(Photo H. Gondet, Laboratoire du Centre national de la Recherche scientifique, Bellevue).

5 tr/seconde (fig. 12). L'une des composantes, qui a été placée verticalement, ne crée aucun flux dans les bobines; la résultante des deux autres constitue un moment horizontal tournant qui provoque une variation alternative de flux, d'où résulte une force électromotrice de fréquence 5 Hz (5). Cette force électromotrice, fortement amplifiée, est appliquée à un galvanomètre à vibrations qui ne sert que d'indicateur de zéro. En effet, le plateau tournant est une boîte plate qui contient deux petites bobines horizontales, de surfaces exactement connues (200 cm²), alimentées séparément par l'intermédiaire d'un commutateur circulaire, et respectivement parallèles à deux axes rectangulaires tracés à la surface supérieure du plateau. Les deux composantes horizontales du moment de l'échantillon ayant été disposées parallèlement à ces axes, la mesure consiste à faire varier les intensités de courant dans chacune des bobines jusqu'à ce que le galvanomètre ne dévie plus. Ceci implique que les moments magnétiques des deux bobines sont égaux et opposés chacun au moment de la composante correspondante de l'objet. Donc la lecture des deux intensités (faite sur un potentiomètre) donne la valeur des deux composantes. Bien entendu trois mesures analogues sont effectuées, les trois axes étant successivement placés verticalement et ainsi chaque composante se trouve mesurée deux fois séparément.

— Exemple de résultats.

Des trois composantes du moment magnétique d'un échantillon l'une, soit Z , était verticale sur le terrain et les deux autres, soit X et Y , étaient horizontales. Il en résulte que l'inclinaison I du moment, égale à l'inclinaison du champ qui l'a provoquée jadis, est donnée par la relation :

$$\operatorname{tg} I = \frac{Z}{\sqrt{X^2 + Y^2}}$$

la déclinaison D se calcule à partir des composantes X et Y qui, sur la surface (orientée) de l'échantillon, définissent la direction horizontale de l'aimantation.

Il est intéressant de juger de l'accord que peuvent présenter les valeurs I et D obtenues à partir de plusieurs échantillons prélevés sur une même formation archéologique. Les résultats qui suivent sont relatifs à un four romain de Fréjus (Var), site de la « Plate-forme », fouillé par P.A. Février qui lui assigne la date 40 avant J.-C.

Les inclinaisons sont boréales et le sens Est ou Ouest de D est indiqué par E ou W.

Cet exemple, qui n'a rien d'exceptionnel, montre combien peut être modérée la dispersion des valeurs de l'inclinaison; les écarts plus élevés sur la déclinaison viennent de ce que cette grandeur est calculée à partir de deux composantes relativement faibles. Il est remarquable qu'on puisse obtenir des valeurs aussi groupées malgré toutes les causes qui contribuent à les disperser : infimes anisotropies du matériau, rémanences parasites des divers types, légers déplacements des restes de parois sous la poussée des terres, erreurs dans l'orientation, erreurs dans la détermination des moments magnétiques. Bien entendu, les mesures avaient été conduites pour éliminer l'effet de rémanence visqueuse et, faut-il le préciser, l'analyse par champs alternatifs n'a pas révélé d'aimantation isotherme attribuable à la foudre.

(5) Nous avons là un véritable alternateur à aimant tournant mais combien faible : un kilogramme de terre cuite équivalant seulement à un aimant ordinaire de quelques milligrammes.

Beaucoup d'autres fours ont fourni des valeurs D et I aussi bien ou mieux groupées. Comme on peut le prévoir, la dispersion est systématiquement plus grande pour des terres cuites qui, tendant à suivre le mauvais exemple des roches volcaniques, portent des rémanences relativement fortes. D'une façon générale, il est intéressant de noter que les dispersions anormales justifiant un nettoyage magnétique poussé (alternatif ou thermique) sont rares sauf dans les cas, parfois difficiles, de fours successifs enchevêtrés.

D'autres formations archéologiques, quand elles sont datables, peuvent donner lieu aux mêmes mesures : fours à chaux ou à bronze, fours de verriers, foyers de thermes, fonds de foyers de cabanes ou de grottes, murs vitrifiés; mais encore faut-il qu'elles présentent de la terre cuite (ou des grès) compacte et pas seulement un peu de sable ou de limon rougis.

Cas des objets déplacés : inclinaison seulement.

Sauf le cas exceptionnel où elles seraient restées en place, la situation est très différente pour les briques, tuiles ou poteries, qui ont été enlevées des fours après cuisson. Il en résulte une incapacité totale à fournir l'orientation du champ ancien, c'est-à-dire sa déclinaison; mais des possibilités restent pour l'inclinaison, du fait que ces objets sont souvent disposés en assemblages réguliers dans les fours.

Par exemple, dans le procédé de cuisson dit « à la volée », encore employé à l'échelon artisanal, la plupart des briques crues empilées sont placées « de champ » horizontalement et elles acquièrent ainsi une thermorémanence dont l'inclinaison sur la face définie par la longueur et l'épaisseur de la brique est égale à l'inclinaison du champ terrestre. Mais l'horizontalité des briques crues n'est pas parfaite et, surtout, des tassements se produisent dans le four pendant la cuisson; il en résulte que les valeurs mesurées présentent une dispersion plus grande que dans le cas des parois de four. Cependant les écarts à l'horizontale étant aléatoires, on peut espérer que la valeur moyenne obtenue sur un lot important — une vingtaine de briques au moins — représente l'inclinaison du champ avec une erreur ne dépassant pas beaucoup un degré. Un doute pourrait rester, dans le cas de briques anciennes, relatif à l'hypothèse qu'il a fallu faire sur leur position dans les fours; mais il n'y a là aucune difficulté, c'est l'accord des valeurs qui confirme l'hypothèse. Ainsi, pour des tuiles romaines, supposer la cuisson « de champ » conduit à des valeurs discordantes; c'est l'hypothèse de la cuisson « debout » qui les accorde. Nous pouvons donc affirmer, en passant, que les Romains cuisaient ainsi leurs tuiles. Et, si les positions de cuisson étaient variées, on ne commettrait pas d'erreur car, observant une incohérence irréductible, on ne calculerait pas d'inclinaison moyenne. Cette situation est fréquente avec les poteries. Bien entendu, là aussi, l'incohérence observée peut venir d'aimantations rémanentes accidentelles fortes (recuits ou effet de foudre) et, avant de rejeter une série discordante, il faut lui appliquer le nettoyage magnétique. Un exemple récent, au laboratoire du Parc Saint-Maur, est celui des briques recueillies sur des temples d'Angkor, au Cambodge. Chacun des lots, de 25 briques, avait fourni des valeurs dont la dispersion était inacceptable. L'analyse a montré que l'incohérence venait d'aimantations rémanentes isothermes fortes, incontestablement dues aux coups de foudre dont tous ces temples ont été gratifiés durant leur longue existence, et le nettoyage par champ alternatif a constitué un remède souverain. Le tableau suivant donne, comme exemple, le cas du temple de Prasat Andet construit, d'après B. Groslier, entre 657 et 681; les valeurs I_i correspondent

à l'aimantation que portaient les briques à leur arrivée au laboratoire et les valeurs I_f sont les inclinaisons obtenues après un lavage alternatif qui était généralement achevé dès 150 Oe. La cohérence de la série des I_f (limitée ici aux 10 premiers objets du lot), beaucoup meilleure que celle des I_i , est presque normale pour des briques. La moyenne générale après nettoyage, pour la série des 25 objets, est $37^\circ 1/2$.

La vérification de ces conditions entraîne une série d'opérations qui rendent très laborieuse une détermination d'intensité, et pour leur description nous ne pouvons que renvoyer le lecteur à une étude étendue publiée en 1959 dans les Annales de Géophysique (t. 15, pp. 285-376). Signalons seulement l'une des idées maîtresses de cette technique. Elle consiste à conduire le recuit nécessaire par étapes (à 100, 150, 200 °C...), chaque étape comportant

Echantillons										
N°	11	12	13	14	15	16	17	18	Moyenne	
I	$64^\circ 1/4$	$65^\circ 1/4$	64°	$65^\circ 1/2$	$63^\circ 1/4$	$64^\circ 1/4$	$64^\circ 1/4$	$63^\circ 1/2$	$64^\circ 1/4$	
D	$3^\circ E$	$5^\circ 1/2 W$	$9^\circ 1/4 W$	$8^\circ 1/4 W$	$5^\circ 3/4 W$	$10^\circ W$	$10^\circ W$	$5^\circ 1/2 W$	$6^\circ 1/2 W$	

Objet	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
I_i	$30^\circ 1/4$	42°	$37^\circ 1/2$	61°	$17^\circ 1/2$	$2^\circ 3/4$	$40^\circ 1/2$	$1^\circ 1/4$	$23^\circ 1/2$	63°
I_f	38°	$41^\circ 1/4$	38°	$41^\circ 1/4$	$36^\circ 1/2$	$39^\circ 1/4$	36°	$27^\circ 3/4$	27°	33°

Il faut remarquer que les tuiles et les briques ne renseignent pas sur le sens, boréal ou austral de l'inclinaison; les poteries non plus d'ailleurs qui sont cuites avec leur ouverture aussi bien vers le bas que vers le haut. Cette indétermination peut être levée par des « ratés » de cuisson qu'on trouve en abondance sur les sites d'ateliers céramiques; ils portent adhérentes aux poteries « brûlées » des masses de terre, ayant servi de base aux piles, qui indiquent nettement le sens haut-bas. Le moindre reste de four, aussi délabré soit-il l'indiquerait aussi, en l'absence d'autres éléments comme des fours plus convenables. On ne possède rien de tel actuellement pour la période Kmère, mais il est très probable que l'inclinaison, vers le VII^e siècle, était boréale au Cambodge.

Recherche de l'intensité du champ ancien.

La recherche de l'intensité du champ ancien est une opération bien plus délicate que celle de la direction. La complication essentielle vient de ce que les valeurs des aimantations qui interviennent dans cette détermination dépendent considérablement de la composition minéralogique de la terre cuite. La difficulté ne peut être tournée qu'en cherchant, par des expériences d'aimantation thermorémanente provoquée, quelle est l'intensité du champ produisant un moment thermorémanent égal au moment ancien de chaque objet en essai. Mais, il est évident que le champ ainsi déterminé ne représente le champ originel que si la terre cuite que l'on refroidit aujourd'hui est strictement dans l'état où elle était à l'époque de son refroidissement initial. Cela impose deux conditions nouvelles, sévères : d'une part, que l'objet n'ait subi aucune modification de ses minéraux magnétiques au cours des temps; d'autre part, que le recuit (en principe à 670 °C), que nous devons nécessairement effectuer pour créer une thermorémanence totale, ne provoque pas non plus de changement minéralogique.

deux recuits à la même température exactement, mais pour deux positions inversées de l'objet dans le four. De l'une à l'autre de ces chauffes jumelles, le moment ancien restant est constant, le moment nouveau s'inverse; la demi-somme (vectorielle) des moments, mesurés à la température ordinaire, est égale au moment restant ancien et la demi-différence au moment nouveau. Connaissant ces moments pour quelques valeurs de t , on en déduit par différence les valeurs correspondant à des intervalles successifs, 100 à 200 °C, 200 à 300 °C... des moments anciens détruits et nouveaux créés, dont le rapport, égal au rapport des champs ancien et nouveau, doit rester constant. Il ne peut en être ainsi s'il y a évolution minéralogique. Pour ce qui concerne l'évolution par recuit, un contrôle plus direct est le suivant : à l'étape 300 °C le moment thermorémanent acquis dans le champ actuel de 300 à 20 °C a été mesuré. L'étape 400 °C étant effectuée, on reprend ensuite un recuit à 300 °C seulement pour déterminer à nouveau le moment actuel entre 300 et 20 °C. On ne retrouve la valeur antérieure que si l'élévation de température du recuit de 300 à 400 °C n'a rien modifié dans les minéraux magnétiques de la terre cuite. Ainsi grâce au fait du recuit progressif, il peut arriver que des objets soient utilisables dans les intervalles inférieurs de température alors qu'ils ne le seraient pas si l'on pratiquait dès le départ un recuit à 670 °C, c'est-à-dire si l'on utilisait d'entrée des A.T.R. totales.

Une telle opération constitue accessoirement une analyse thermique de la rémanence naturelle, qui révélerait un recuit accidentel; mais si l'on cherche seulement ce contrôle, il suffit de procéder à la destruction progressive de cette rémanence par recuits en champ magnétique compensé, comme cela a été indiqué précédemment. Faut-il ajouter que, dans les mesures d'intensité du champ, l'élimination des aimantations parasites, visqueuse ou de foudre, doit être faite avec plus de soin encore que dans celles portant sur la direction.

RÉSULTATS ARCHÉOMAGNÉTIQUES SUR LA DIRECTION.

Premiers résultats.

L'idée archéomagnétique n'est pas nouvelle; elle s'était imposée à la suite de quelques travaux italiens de la seconde moitié du XIX^e siècle et, au début du XX^e siècle, G. Folgheraiter étudiait des vases grecs et étrusques pour retrouver l'inclinaison magnétique de l'époque de leur cuisson. Malheureusement sa technique de mesure des rémanences était extrêmement sommaire, au moyen d'un simple déclinomètre, c'est-à-dire d'un aimant unique suspendu par un fil fin, près duquel le vase était amené dans diverses positions successives. Folgheraiter n'ignorait pas que de telles mesures, sur des objets de forme compliquée, n'avaient qu'une valeur indicative et il avait eu l'idée d'effectuer des corrections grâce à des mesures analogues sur des vases qu'il fabriquait et cuisait dans des champs dont il faisait varier l'inclinaison. Malgré cela ses résultats, dont il a présenté une synthèse en français dans le *Journal de Physique*, en 1905, ne peuvent être retenus, tout particulièrement cette idée, qui fut tenace ensuite, d'une inclinaison australe en Italie vers 800 avant J.-C. (inclinaison nulle vers 750 puis négative).

Ulérieurement des études de L. Mercanton (au déclinomètre encore, mais sur des objets de forme généralement plus simple) ont porté sur des terres cuites de différentes époques de la Préhistoire : vases divers et poids pyramidaux pour filets de pêche. L'imprécision des mesures, mais plus encore et de beaucoup, celle de la datation des objets, font que de ce travail étendu sur près d'un demi-siècle (1900 à 1950 environ) et pourtant plein d'idées heureuses, on ne peut retenir aucune indication numérique, de l'avis même de l'auteur qui écrit qu'il n'a pu « recueillir de leur examen (il s'agit de toutes ses terres cuites) autre chose que des indices sur le sens et la grandeur de l'inclinaison terrestre à l'époque de leur fabrication ».

On devrait placer ici le travail de R. Chevallier (1925), sur les laves de l'Etna, dont les conclusions, plutôt pessimistes aussi, ont été exposées comme illustration des difficultés rencontrées avec les rémanences volcaniques.

Recherches en France.

Ulérieurement, une étude étendue a été entreprise par l'auteur, à l'Institut de Physique du Globe de Paris, au moyen des techniques élaborées qui ont été évoquées et, exclusivement, sur des terres cuites. Ses premiers résultats, publiés en 1938, ont été la détermination de la variation de l'inclinaison magnétique à Paris de 1400 à nos jours, à partir de lots de briques provenant de monuments historiques français. Plus tard (1951), ont été donnés les résultats détaillés de mesures (déclinaison et inclinaison) effectuées à partir de quelques fours de potiers puniques et romains (Carthage et Forêt de Trèves), dans le dessein surtout de montrer les remarquables possibilités de la technique archéomagnétique actuelle. Rien d'autre, jusqu'ici, n'a été publié d'une masse énorme de données recueillies sur toutes sortes d'objets : tuiles, briques, poteries, foyers, fours à chaux et surtout fours de potiers au nombre d'une cinquantaine échantillonnés en France et dans les pays limitrophes.

Ce fait anormal d'une telle accumulation de données inédites, qui n'est pas négligence mais prudence, est intéressant par la difficulté qu'il dénonce, celle de l'incertitude de beaucoup de datations sujettes parfois à de capricieuses variations; de nouvelles fouilles aux nouvelles techniques

aidant, n'a-t-on pas vu un amphithéâtre romain rajeunir de 200 ans et les Thermes d'une grande capitale vieillir de 100 ans. Et que dire de l'époque du Moyen Age ! Bien entendu, les archéologues ne sont pour rien dans ces difficultés; il faut reconnaître que leur science est un art difficile et que la précision, à dix années près, qui équilibrerait celle des mesures magnétiques, est trop souvent inaccessible.

Les figures 13 et 14, relatives à l'inclinaison magnétique à Paris, donnent un aperçu de ce qu'on peut attendre d'une mise en ordre, actuellement en cours, de tout l'ensemble des mesures françaises. La première n'est que celle publiée en 1938 enrichie de quelques déterminations postérieures. Elle montre quelle a été la variation de I , à Paris, d'une part d'après les mesures directes faites à la boussole (un point tous les 10 ans), d'autre part d'après des mesures sur des briques d'âge connu (cercles dont le rayon est proportionnel au nombre des objets de la série). Comme on le voit, il est possible de tracer une courbe régulière à travers les points « archéomagnétiques » en prolongement de celle

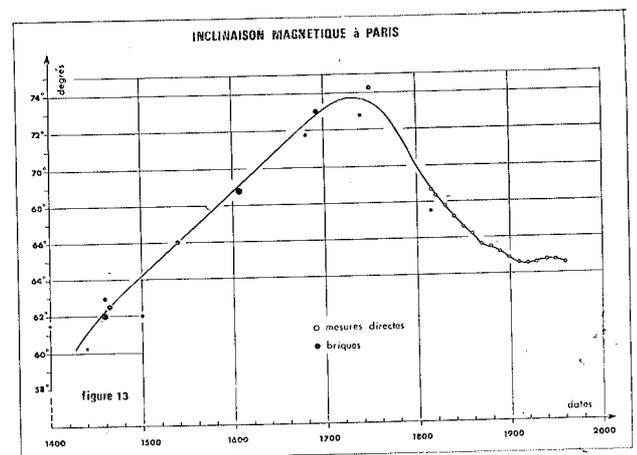


FIG. 13

correspondant aux mesures directes. Un de ces points (1815) chevauche convenablement la portion exacte de la courbe. Vers le milieu du XV^e siècle, trois points archéomagnétiques se trouvent correspondre sensiblement à la même date (1460); les briques qui les ont fournis proviennent du Palais Rihour à Lille, de la Maison de Tristan à Tours, et de l'aile Dunois du Château de Châteaudun. Leur accord est très rassurant mais il appelle une question : il s'agit de lieux différents et l'on sait bien que le champ terrestre, à une époque donnée, diffère suivant la position géographique de la station. C'est là un problème général et permanent en archéomagnétisme; pour tracer la variation dans le temps d'un élément du champ, on doit faire des corrections ramenant les mesures à ce qu'elles auraient été en un même lieu, Paris ici, que l'on a choisi arbitrairement. Une telle opération serait facile si le champ était dipôle et le restait tout en variant dans le temps; on sait qu'il n'en est pas ainsi et on pourrait discuter indéfiniment sur le procédé à adopter. Quel qu'il soit, la correction sera d'autant meilleure que les lieux, de mesure et de réduction, seront plus rapprochés, et les erreurs à craindre sont pratiquement insignifiantes pour des distances de quelques centaines de kilomètres.

La figure 14 est telle qu'elle avait été tracée, il y a près de huit ans, pour être présentée, à titre de première indication, dans une réunion de spécialistes. Les données accumulées depuis permettent de l'améliorer substantiellement et même de montrer qu'elle est probablement tout à fait fautive en ce qui concerne les premiers siècles de l'époque romaine ! De nouveaux fours de potiers, échantillonnés

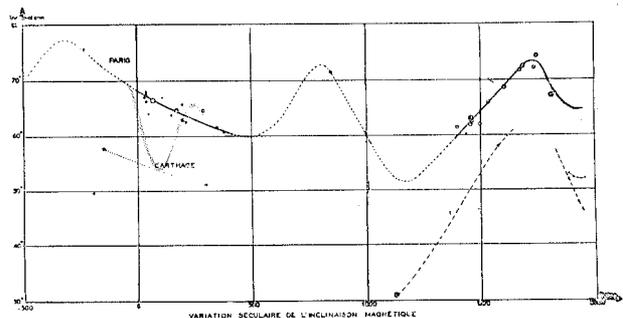


FIG. 14. — ETAT DES RECHERCHES FRANÇAISES SUR L'INCLINAISON IL Y A UNE DIZAINE D'ANNÉES.

On possède maintenant beaucoup d'autres déterminations mais non publiées jusqu'ici.

durant l'été 1964, mais sur lesquels des discussions subsistent sur les datations, conduisent à penser que l'inclinaison à Paris au tout début de notre ère a décliné plus vite qu'il n'est indiqué figure 14; partant de 70° environ vers 50 avant J.-C., pour atteindre un minimum de 54° environ vers 150 après J.-C., elle aurait augmenté rapidement jusque 67° vers l'an 250. Une telle variation, surprenante par sa rapidité, n'est cependant pas record; ainsi, en effet, on a observé dans l'île de l'Ascension une variation d'inclinaison magnétique de l'ordre de 35° entre 1750 et 1950. Au Moyen Age, si nous disposons maintenant d'un nombre plus considérable de points que n'en indique la figure, les datations restent si mauvaises (même au siècle près) que la courbe n'est toujours pas définie. Et c'est la raison pour laquelle les résultats français ne sont pas encore officiellement publiés, leurs auteurs pensant qu'il n'est pas bon de prendre date au moyen de résultats pas bien assurés, même en y apportant beaucoup de restrictions. Le lecteur de ce chapitre est ainsi prévenu; qu'il ne retienne de la figure 14 que les ordres de grandeur de l'ampleur et de la vitesse de variation séculaire dans nos régions durant les deux derniers millénaires: inclinaison toujours boréale, fluctuant d'une vingtaine de degrés au total, à un rythme, très probablement fortuit et en tout cas irrégulier, de l'ordre du millier d'années.

Pour ce qui concerne la déclinaison magnétique, fournie seulement par les terres cuites restées en place, on peut dire qu'elle est demeurée très faible à Paris pendant les premiers siècles de l'ère chrétienne, pour devenir ensuite relativement très à l'Est (jusque vers 20° à l'époque carolingienne). Mais sa variation durant tout le Moyen Age nous échappe encore, ce qui entrave la présentation de l'évolution de la direction du champ sous la forme de ces graphiques parlants (indiquant à la fois *D* et *I* à des dates successives portées sur la courbe), que l'on trouve dans tous les traités de géomagnétisme pour représenter le résultat des mesures directes. La figure 15, toujours relative à Paris, est de ce

type. Bien que les mesures directes d'inclinaison en France ne datent que de 1670, elle a pu être prolongée jusqu'en 1540, date des premières mesures de déclinaison, grâce aux résultats archéomagnétiques qui viennent d'être mentionnés. Quelques points aussi sont portés sur le graphique, relatifs à l'époque romaine pour laquelle de réels soucis de datation surgissent dès le III^e siècle; beaucoup d'autres, correspondant au Moyen Age, viendraient se placer très à droite et en haut du graphique. Au total donc, on dispose maintenant d'un grand nombre de points, précis en *D* et *I* mais malheureusement pas en date, et c'est encore une sorte de devinette de trouver le moyen de faire courir convenablement la courbe raccordant les époques 200 et 1400.

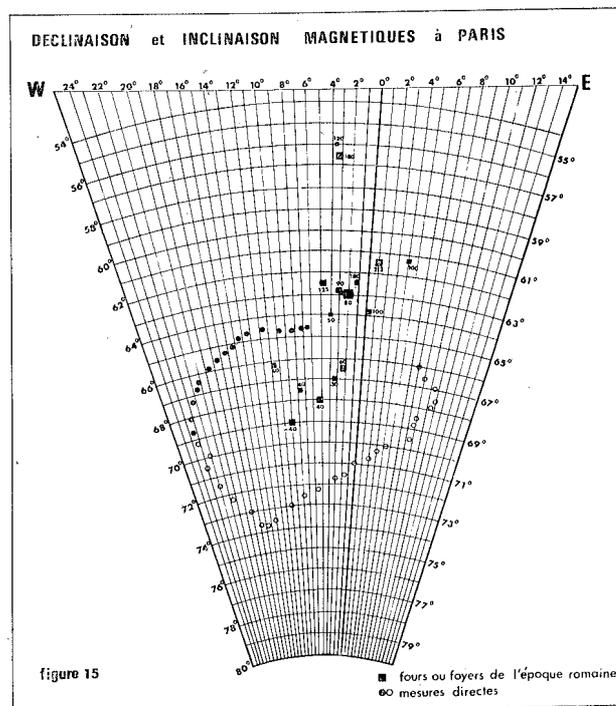


figure 15

FIG. 15.

Ce qu'il faut observer en tout cas c'est que, contrairement à une idée répandue de périodicité de la variation séculaire, cette courbe ne peut pas être une répétition de l'ovale, à la vérité remarquable, décrit durant les siècles récents dans les stations de l'Ouest de l'Europe; on peut affirmer dès maintenant que l'idée de variation séculaire périodique, née d'une extrapolation facile mais imprudente, idée que l'on trouve encore dans trop d'ouvrages, jusqu'aux manuels scolaires (avec d'ailleurs des valeurs très discordantes pour la « période »), est entièrement sans fondement.

Recherches à l'étranger.

Hors de France, les recherches archéomagnétiques se sont développées plus tardivement et moins activement que celles du paléomagnétisme. Elles ont pris de l'ampleur ces dernières années et, pour ce qui concerne la direction du champ, des résultats sont maintenant publiés en Angleterre, au Japon et en U.R.S.S.

En Angleterre, tant à Oxford qu'à Cambridge, les études portent essentiellement sur des terres cuites en place (fours et foyers) et les prélèvements sont effectués suivant la technique française au « plâtre de Paris ». A Oxford (Laboratory for archaeology and the history of art), les mesures sont aussi conduites, comme en France, au moyen d'un inductomètre et sur d'assez nombreux échantillons pour chaque site. De Cambridge (Museum for classical archaeology), beaucoup de fours ont été visités principalement en Grande-Bretagne et en Grèce, mais, souvent, le nombre réduit d'échantillons ne permet pas de contrôle et jusqu'ici les mesures étaient encore faites au magnétomètre. Dans plusieurs publications récentes, les deux équipes, indépendamment, ont tenté de mettre en ordre leurs résultats, en soulignant aussi l'insuffisance très dure des datations. La figure 16 représente la synthèse la plus récente de l'ensemble des mesures du groupe d'Oxford. En tenant compte de l'inversion du sens des ordonnées dans les courbes relatives à I , on observe des parentés évidentes avec les résultats présentés, sous de prudentes réserves, pour la région parisienne. Etant donné l'esprit d'amicale collaboration qui existe entre les équipes anglaise et française et les possibilités de « réduction » facile entre Londres et Paris, dont la distance est faible, on peut espérer que les résultats anglais et français parviendront bientôt à compléter leurs déficiences mutuelles; il faudrait bien pour cela, cependant, arriver à jeter encore dans cet ensemble un petit nombre de dates précises susceptibles de fournir quelques points d'appui solides.

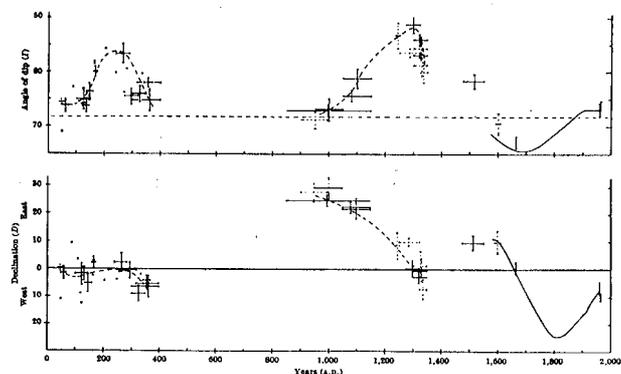


FIG. 16. — VARIATION DE LA DÉCLINAISON ET DE L'INCLINAISON MAGNÉTIQUES A LONDRES D'APRÈS M.J. AITKEN ET G.H. WEAVER, LABORATORY FOR ARCHAEOLOGY AND THE HISTORY OF ART, OXFORD.

Au Japon, des essais sur la variation séculaire de la déclinaison ont été tentés : variation depuis 1600 (Imamiti) à partir de mesures directes faites surtout avec des boussoles de navires, et depuis le milieu du IX^e siècle à partir de quelques coulées volcaniques datées (Kato et Nagata, Yukutake); le dernier auteur donne aussi des valeurs d'inclinaison. Etant donnée l'imprécision foncière des mesures sur les laves et le petit nombre de points retenus, on ne peut trouver là que des indications sur la divagation au Japon de la direction du champ, dont l'ampleur serait un peu plus faible qu'en Europe; par exemple, la déclinaison, qui est actuellement de l'ordre de 6° W à Tokyo, aurait atteint son élongation maximum vers l'Est, de

l'ordre de 6 ou 7°, dans la seconde moitié du XVII^e siècle. Une mise en garde doit être faite sur un autre travail japonais (N. Watanabe, 1959) beaucoup plus étendu et ayant comporté des mesures de rémanence d'échantillons de terres cuites prélevés sur près de 200 foyers ou fours divers dont les âges s'étaleraient jusque près de 6 000 ans avant nos jours. Ce travail peut faire illusion par son ampleur et par la fermeté apparente de ses conclusions : courbes de variation, d'ailleurs très régulières, de D et I sur près de 6 millénaires. En réalité, il ne s'agit pas d'un travail de géophysicien partant de terres cuites datées pour retrouver la variation du champ terrestre, mais, à l'inverse, d'un travail d'archéologue cherchant à dater à partir d'une connaissance de la variation séculaire qu'il doit évidemment se bâtir. Et, quand on démonte bien le mécanisme de sa vaste construction, on s'aperçoit que l'auteur le fait en traçant la variation de l'inclinaison durant la période historique (qui ne commence au Japon qu'au milieu du VI^e siècle) avec seulement quelques points archéomagnétiques (3 coulées de lave et 2 fours), et en extrapolant ensuite la courbe ainsi obtenue sur l'hypothèse tout à fait gratuite d'une variation périodique régulière.

Un U.R.S.S., une étude récente (Mme Burlatskaya) a porté sur la recherche de l'inclinaison à partir de briques et tuiles recueillies sur de nombreuses constructions dans la région du Caucase. Le nombre de points expérimentaux est important, en particulier entre les VI^e et XII^e siècle, époque de grande pénurie en Europe de l'Ouest. La courbe de la figure 17, qui n'est pas sans analogie avec celles de Paris et Londres, montre quelle ampleur exceptionnelle aurait eu la variation séculaire de l'inclinaison dans l'extrême Sud-Est de l'Europe. Fait assez piquant, l'auteur s'est laissé

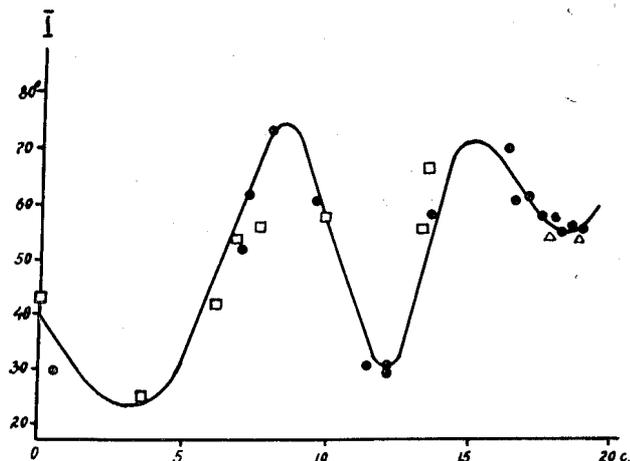


FIG. 17. — VARIATION DE L'INCLINAISON MAGNÉTIQUE DANS LA RÉGION DU CAUCASE D'APRÈS S.P. BURLATSKAYA (MOSCOU).

Les trois symboles utilisés correspondent à trois localités.

prendre à la régularité des résultats de N. Watanabe, et un peu de fantaisie aidant, elle n'a pas hésité à extrapoler sa courbe, manifestement irrégulière des deux derniers millénaires, en une variation quasi sinusoïdale jusque vers 6000 avant J.-C. Il est bien vrai que les mauvais exemples sont toujours contagieux !

Il resterait à ajouter à cet inventaire archéomagnétique relatif à la direction du champ : des mesures, déjà évoquées, sur des briques provenant des 7 temples d'Angkor (600 à 1000 environ); des mesures analogues faites par des archéologues autrichiens (A. Bammer) travaillant, en liaison avec le groupe de Paris, sur des briques recueillies sur différents monuments d'Ephèse; quelques essais déjà anciens sur des coulées historiques islandaises et, enfin, les mesures récentes (Cox and Doell) sur des coulées volcaniques historiques des Iles Hawaï dont l'intérêt est d'apporter une sérieuse confirmation à une idée tendant à se répandre d'une variation séculaire qui serait, depuis longtemps, de très faible amplitude dans toute la zone Pacifique.

RÉSULTATS ARCHÉOMAGNÉTIQUES RELATIFS A L'INTENSITÉ DU CHAMP TERRESTRE.

Jusqu'à ces toutes dernières années cette recherche, intéressante mais laborieuse, n'était pratiquée que par le groupe archéomagnétique de Paris et un mémoire étendu a été cité faisant le point des résultats acquis que l'on peut résumer ainsi. Pour la période historique, sept lots d'objets ont été traités et, dans leur énumération qui suit, F représente l'intensité ancienne, correspondant à la date et au lieu indiqué, et I est l'inclinaison magnétique dans les mêmes conditions.

- Carthage : 3 poteries puniques (vers - 600); $F = 0,76$ Oe; $I = 56^\circ$.
- Carthage : parois de four punique, 6 échantillons (- 146); $F = 0,71$ Oe; $I = 58^\circ$.
- Augst (près de Bâle) : tuiles romaines; 5 échantillons (+ 175); $F = 0,73$ Oe; $I = 63^\circ 1/2$.
- Amphithéâtre de Fréjus : tuiles romaines; 11 échantillons (+ 200); $F = 0,65$ Oe; $I = 60^\circ 1/2$.
- Paris (Thermes « de Julien ») : tuiles romaines; 6 échantillons (+ 200); $F = 0,70$ Oe; $I = 62^\circ$.
- Lille (Palais Rihour) : briques, 7 échantillons (+ 1460); $F = 0,56$ Oe; $I = 63^\circ$.
- Château de Versailles : briques, 17 échantillons (+ 1750); $F > 0,48$ Oe; $I = 74^\circ$.

De la discussion de ces longues séries de mesures ne retenons que deux points. Le premier est une difficulté relative à la série du Château de Versailles (1750). L'étude avait été faite à une époque où le recuit était conduit sans étapes, après « lavage thermique » effectué à 60°C seulement (au lieu de 100°C , température constamment adoptée depuis). Or, la comparaison des moments de chaque objet, initial et après réchauffement à 60°C , a montré que le mur d'où ces briques avaient été extraites avait subi un réchauffement accidentel, modéré certes, mais l'ayant porté au-dessus de 60°C ; ainsi, les moments anciens s'étaient trouvés systématiquement réduits, mais d'une façon indéterminée, et l'intensité trouvée ne représente qu'une limite inférieure de l'intensité réelle ancienne. Le second point est relatif à la correction de position géographique, l'intensité du champ à une époque donnée variant, en croissant, comme on l'a vu, des régions équatoriales aux régions polaires. L'inclinaison magnétique variant un peu de la même façon, il est apparu qu'il valait mieux essayer de ramener les valeurs de F à ce qu'elles auraient été, non en un même point, mais en des lieux (de la même région) où l'inclinaison avait, à l'époque, une valeur donnée pour laquelle on a choisi arbitrairement 65° , valeur ronde de l'inclinaison actuelle à Paris. Ce sont ces valeurs F_0 , ramenées en quelque

sorte à des points magnétiquement équivalents dans la répartition du champ sur le Globe, qui ont conduit au graphique de la figure 18.

La courbe ainsi obtenue, tracée à la fois avec les résultats des mesures directes (depuis un siècle) et ceux des déterminations archéomagnétiques, révèle une décroissance marquée de l'intensité du champ terrestre dans nos régions; en un peu plus de deux millénaires cette intensité aurait

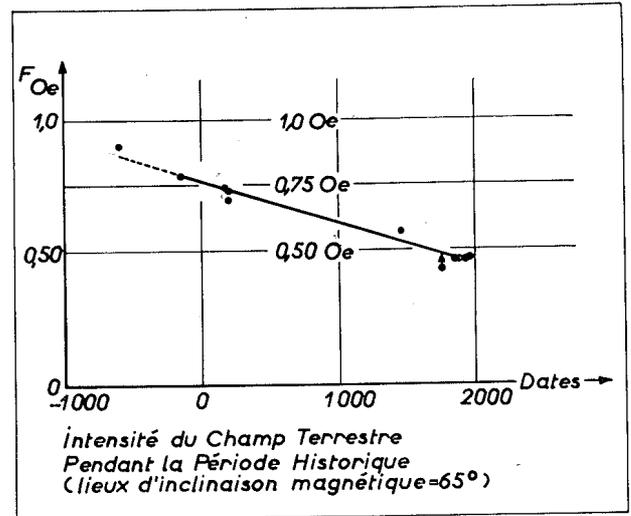


FIG. 18.

été réduite à environ la moitié de sa valeur initiale. Il faut remarquer que l'objection, presque réflexe, d'une diminution spontanée possible des rémanences anciennes au cours des siècles, n'est pas valable; les thermorémanences sont très solides mais si elles avaient subi une altération, cela ne ferait qu'entraîner des valeurs trop faibles des F mesurées et la réduction serait encore plus ample qu'il ne paraît.

La découverte d'une telle décroissance massive de l'intensité du champ terrestre a eu, comme on le verra, des conséquences inattendues en archéologie, mais elle intéresse aussi beaucoup les théoriciens de l'origine du champ terrestre, d'autant plus que la vitesse de diminution ainsi observée est à peu près celle que révèlent les analyses faites depuis Gauss pour le moment dipôle de la Terre. A leur question : « la variation est-elle vraiment linéaire ou plus ou moins fortement ondulée ? » il n'y a pas de réponse possible, jusqu'ici, étant donné le nombre très réduit des points (comportant chacun une évidente indétermination) avec lesquels la courbe est tracée. De nouvelles déterminations sont nécessaires, ne serait-ce que pour s'assurer que le phénomène est bien mondial et pas seulement une sorte d'accident, à la vérité très peu probable, propre à l'Ouest de l'Europe. Ces déterminations, en cours sur des matériaux variés comprenant des terres cuites d'Extrême-Orient, sont freinées, non par des difficultés techniques mais par celle consistant à trouver des objets remplissant bien les conditions sévères à exiger pour ne pas risquer un long travail sans résultats.

Le mémoire français de 1959 sur cette recherche de l'intensité a suscité un vif intérêt à l'étranger et plusieurs laboratoires géomagnétiques ou de physique archéologique, se sont engagés dans la même voie (U.R.S.S., Japon, Tchécoslovaquie, et, plus récemment plusieurs laboratoires aux U.S.A.). Avec une rapidité presque inquiétante, des résultats étendus ont été publiés : en U.R.S.S. à partir de mesures effectuées sur les briques et tuiles caucasiennes utilisées pour la recherche de la variation séculaire de l'inclinaison, au Japon sur des roches volcaniques de coulées historiques et sur des terres cuites, aux U.S.A. sur des roches volcaniques et des poteries.

La figure 19 présente les résultats des recherches soviétiques qui ont été poussées, mais avec un très petit nombre de mesures, jusque vers 3000 avant J.-C. (Mme Petrova et Mme Burlatskaya). Pour les deux derniers millénaires, l'accord avec les déterminations françaises (dont les résultats sont d'ailleurs reportés sur le graphique) serait excellent. Pour cette comparaison, il faut noter qu'il n'y a pas eu de réduction pour des régions à inclinaisons égales; les valeurs K en ordonnées sont, pour chaque lieu, le rapport entre les intensités ancienne et actuelle. Il en résulte, pour le début de l'ère chrétienne où le Caucase aurait été relativement très équatorial magnétiquement (I très faible, fig. 17), des valeurs anormalement faibles de F . La série entière des résultats portant sur 5 millénaires est interprétée par ses auteurs comme montrant que l'intensité du champ terrestre est passée par un maximum vers 500 avant J.-C., et, avec un peu de hardiesse, elles parlent même d'une variation cyclique de période 10 000 ans, sur laquelle il reste à faire, faut-il le préciser, les plus extrêmes réserves.

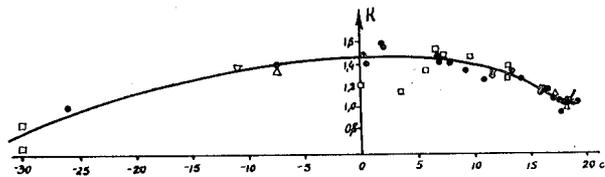


FIG. 19. — VARIATION SÉCULAIRE DE L'INTENSITÉ DU CHAMP TERRESTRE DANS LA RÉGION DU CAUCASE D'APRÈS S.P. BURLATSKAYA (MOSCOU).

Les ordonnées représentent le rapport entre les intensités, ancienne et actuelle, au même lieu.

Les déterminations japonaises (T. Nagata, Y. Arai et K. Momose), résumées par la figure 20, qui rassemble les valeurs de F , non réduites, observées au Japon, à Paris et à Tiflis, conduisent à des résultats comparables, en particulier à l'existence d'intensités élevées durant le millénaire antérieur à l'ère chrétienne. Elles posent un problème, qui reste à discuter, celui d'une forte diminution de F pendant plusieurs siècles au Moyen Âge.

Ces résultats récents, soviétiques et japonais, obtenus en des lieux de longitudes très différentes de celle de Paris, semblent au moins confirmer définitivement le caractère mondial de la décroissance de l'intensité du champ terrestre sur plus de deux millénaires.

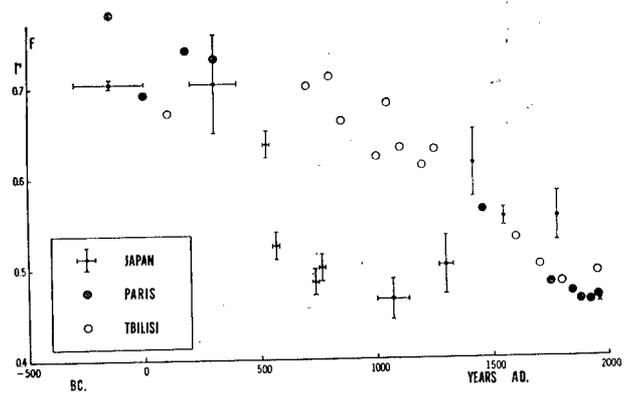


FIG. 20. — ESSAI DE COMPARAISON DES DIFFÉRENTES DÉTERMINATIONS (FRANÇAISES, SOVIÉTIQUES ET JAPONAISES) DE L'INTENSITÉ F (NON RÉDUITE) DU CHAMP TERRESTRE D'APRÈS T. NAGATA, Y. ARAI ET K. MOMOSE.

(*Journal of Geoph. Res.*, 1963).

APPLICATIONS ARCHÉOLOGIQUES.

Nous nous sommes placés jusqu'ici au strict point de vue du géophysicien cherchant à reconstituer la variation séculaire du champ magnétique terrestre à partir de matériaux datés fournis par les archéologues. Ne peut-on pas inverser les rôles et dater des terres cuites à partir de mesures d'aimantations ? La réponse est évidemment affirmative mais avec une restriction d'importance : le second problème, celui des archéologues, n'a de sens qu'à la condition que celui des géophysiciens soit d'abord résolu; il faut bien entendre, résolu expérimentalement, avec toutes les difficultés que cela implique, et non pas par une sorte d'acte de foi, en posant par exemple que la variation est périodique régulière comme il a été dit à propos d'un travail japonais. La variation séculaire du champ terrestre, de caractère régional marqué, n'obéit pas à des lois simples; il nous faut la prendre telle qu'elle est et non pas telle que nous la voudrions et, au prix d'un long travail, il nous faut d'abord la déterminer patiemment. Il y a là, entre archéologues et physiciens, un danger de malentendu qui se trouve entretenu par des maladroites. Par enthousiasme, mais aussi peut-être parce qu'au siècle de la publicité chacun tend à forcer la qualité de sa marchandise, des géophysiciens n'hésitent pas à parler trop complaisamment de « datation magnétique »; l'idée cheminant et s'enchevêtrant avec celle du miracle de la datation au carbone radioactif, des archéologues arrivent à penser qu'il suffit de faire passer un tessou de poterie dans un inductomètre pour en connaître l'âge !

Soyons raisonnables; la datation par mesures de rémanences ne pourra jamais s'appliquer vraiment à un objet isolé, mais seulement à des formations importantes susceptibles de fournir plusieurs échantillons indépendants; constructions comportant des briques ou des tuiles, fours divers, foyers, murs vitrifiés. Elle n'est simple que par mesures de direction (inclinaison et déclinaison) et on peut espérer atteindre ainsi, dans de bonnes conditions, une finesse à 10 ou 20 ans près. Les mesures d'intensité, beaucoup plus laborieuses, conduiraient à une marge d'incertitude plus grande; cependant elles peuvent être utiles pour lever des indéterminations portant sur des siècles. Mais tout ceci

reste un peu dans l'avenir; que peut-on actuellement ? La variation séculaire est maintenant assez bien connue dans nos régions à partir de 1300, et, dans ces limites, d'incontestables possibilités de datation existent. Effectivement, on a pu dater ainsi un certain nombre de fours à chaux en Languedoc allant du XV^e au XIX^e siècles. Mais nos possibilités actuelles s'arrêtent là, il suffit pour s'en rendre compte de se reporter à l'exposé des résultats archéomagnétiques pour le Moyen Age et même, jusqu'à un certain point, pour l'époque romaine. Un fait encourageant, pour l'avenir, mérite d'être signalé ici : la dispersion des points sur les graphiques de variation séculaire venant surtout des erreurs de datation, une courbe tracée à partir d'un grand nombre de points doit éliminer ces erreurs, dans la mesure où elles sont aléatoires, et permettre ainsi des datations ultérieures meilleures que les datations individuelles utilisées.

Dans les relations du magnétisme et de l'archéologie, la datation magnétique, qui vient d'être envisagée, reste jusqu'ici plus un espoir qu'un bienfait pour les archéologues. Mais les aimantations rémanentes leur offrent d'autres possibilités, plus positives, et déjà évoquées à propos de la « mémoire magnétique » des températures que possèdent les terres cuites. Le nombre des applications effectives est déjà important et on peut citer les suivantes : détermination de la position de cuisson « debout » ou de « champ » de briques ou tuiles et, pour les poteries, indication du sens, ouverture vers le haut ou vers le bas; affirmation d'une cuisson in situ ou non; affirmation qu'un monument a été foudroyé; détection d'un incendie dans une construction avec mesure de la température atteinte en un point donné; mesure de températures de recuits secondaires de vases portant des colorations obtenues à chaud; affirmation qu'une sole annexe d'un four (four romain à Carthage) n'appartenait pas à la chambre principale de chauffe; affirmation que des parois de foyers de thermes (Pompeï) n'ont pas été au contact direct des flammes; affirmation qu'une paroi de citerne médiévale est un ciment de brique pilée et non un enduit de terre cuit sur place. Un fait à souligner, dans toutes ces applications, c'est que les réponses ne sont pas des indications

d'une certaine probabilité, mais des affirmations de physicien, tout à fait catégoriques. Certaines sont d'une exécution facile; d'autres, qui nécessitent des recuits progressifs, entraînent un travail encore simple mais qui peut être assez long.

Tout ce qui précède, on l'a souligné, est relatif à la direction du champ. En ce qui concerne son intensité, les relations entre le magnétisme terrestre et l'archéologie ont pris un tour curieux sous forme d'un cri d'alarme sur une nouvelle possibilité d'erreur dans la datation au carbone 14. En effet, cette méthode repose sur l'hypothèse que le rayonnement cosmique responsable de la production d'atomes ¹⁴C dans l'atmosphère est constant, ce qui permet de poser que la teneur relative de départ, celui de la matière vivante, est à toute époque identique à la teneur actuelle que l'on peut mesurer. Or, les particules cosmiques étant chargées électriquement, leur impact sur la Terre est conditionné par le champ magnétique terrestre qui les dévie, tellement que l'intensité actuelle, mesurée, du rayonnement cosmique varie fortement sur le Globe suivant la latitude géomagnétique. L'hypothèse de base de la datation au carbone radioactif n'est donc valable que si sont constantes, non seulement les sources cosmiques mais aussi l'ensemble du champ magnétique terrestre qui forme une sorte d'ombrelle protégeant la Terre; en particulier, si le champ passé s'est trouvé plus intense que l'actuel, l'apport cosmique était plus réduit et par suite la teneur du réservoir atmosphère en atomes ¹⁴C était plus faible que l'actuelle; il en résulte que l'on date trop vieux. Depuis plusieurs années déjà on s'est ému, aux U.S.A., de cette possibilité d'erreurs, et des calculs, dont la prétention n'était que de fournir des ordres de grandeur, avaient montré que, le taux de variation de *F* trouvé en France étant supposé valable pour tout le Globe, du charbon vieux de 4 000 ans serait daté de 5 000 ans. Il ne faut voir là qu'une simple indication; une meilleure connaissance de la variation séculaire de l'intensité est nécessaire pour la reprise de ces calculs. C'est là une des raisons principales du vif intérêt actuel pour cette branche « intensité » de l'archéomagnétisme.

IV. — Recherches paléomagnétiques

LE POSTULAT DU PALÉOMAGNÉTISME.

La fossilisation du champ terrestre, à laquelle nous venons de nous intéresser pour les époques historique et préhistorique, a eu lieu aussi, évidemment, durant les temps géologiques. Les roches volcaniques de toutes les époques sont aimantées, qu'elles soient extrusives ou intrusives, ainsi que les sédiments qu'elles ont pu cuire, formations relativement rares mais intéressantes, constituant des sortes de terres cuites naturelles. Beaucoup de roches sédimentaires portent elles aussi des rémanences, avec cette différence qu'elles sont souvent d'intensité extrêmement faible ce qui a retardé leur étude jusque vers 1949 lorsque des appareils assez sensibles ont été utilisables.

Depuis longtemps, plus ou moins sporadiquement, des mesures sur la direction de l'aimantation rémanente avaient été effectuées sur des roches volcaniques anciennes. De prime abord, d'après ce que nous savons de la vitesse de la variation séculaire, il peut paraître bien inutile de saisir ainsi le champ terrestre d'un instant très bref dans l'échelle des temps géologiques. En effet, si une coulée s'était épanchée une centaine d'années plus tôt ou plus tard, c'est-à-dire à une époque strictement égale géologiquement, la direction fossilisée aurait pu différer d'une ou deux dizaines de degrés, dans un sens ou dans l'autre, du fait d'une variation séculaire dont nous ne savons rien mais qui peut avoir existé aussi ample que l'actuelle. Nous arrivons là à un virage brusque sur le chemin du passé magnétique du Globe. Changeant d'échelle de temps, nous allons nécessairement changer de point de vue; la variation de siècle en siècle dont on cherche à suivre le détail durant les temps historiques ne peut plus être, durant les temps géologiques, qu'un bruit de fond auquel il faut, au contraire, essayer d'échapper.

A la vérité, les mesures des rémanences très anciennes offrent tout de même un certain intérêt à un niveau en quelque sorte statistique. En effet, imaginons que, dans une région donnée, nous ayons pu mesurer un grand nombre de directions d'aimantations sur des coulées volcaniques

étagées tout au long d'une période géologique étudiée. Si, dans chacune de ces mesures, nous n'avons pris qu'une sorte d'instantané du champ entraîné dans son éventuelle divagation séculaire, leur ensemble fournit une famille de directions dont l'enveloppe mérite considération. Ainsi, si le champ terrestre s'était trouvé occuper peu à peu toutes les directions, que ce soit à l'échelle du siècle ou de la dizaine de milliers d'années, nous devrions observer une dispersion totale des directions de rémanence fossile; au contraire, si la divagation est restée limitée, toutes les directions se trouveront comprises dans un cône, régulier ou non, dont l'axe et l'ouverture constitueront des caractéristiques intéressantes du champ terrestre pour la région et l'époque géologique considérées. Qu'en est-il ?

Des études nombreuses, anciennes et très récentes, portant sur des roches volcaniques tertiaires et quaternaires de plusieurs continents, ont depuis longtemps donné une réponse qui, malgré le flou habituel des faits d'observation paléomagnétiques, ne manque ni de netteté, ni de piquant. A ces époques, relativement récentes, le champ terrestre aurait divagué à l'entour de sa direction actuelle, avec une ampleur qui ne dépasserait pas beaucoup celle, de 20 à 30°, que révèlent les mesures directes et archéomagnétiques; mais, fait plus inattendu, suivant ces directions relativement groupées, le champ terrestre aurait eu, alternativement, le sens actuel ou l'inverse, si l'on veut à la manière d'un marin qui, tout en s'y agitant, occuperait son hamac tantôt dans un sens tantôt dans l'autre. L'étude de cette « inversion du champ », toujours pensée comme valable pour tout le Globe à la fois, et observée à des époques plus anciennes, constitue le premier chapitre du paléomagnétisme.

On s'élève vers un horizon plus large en considérant, pour une région et une époque géologique données, la direction moyenne du champ obtenue en prenant la résultante de toutes les directions individuelles observées dans ces conditions sans s'inquiéter du sens, direct ou inverse, sur ces directions, ce sens étant alors considéré, lui aussi, comme une sorte de divagation à éliminer. Dès 1954,

L'utilisation des roches sédimentaires ayant considérablement élargi le champ des possibilités, on s'efforça (en Angleterre surtout au départ) de déterminer cet axe pour quelques époques, à partir de nombreux échantillons, volcaniques et sédimentaires indifféremment, aussi dispersés que possible dans l'épaisseur et l'étendue de quelques vastes formations géologiques. C'est que, à vrai dire au prix d'une idéalisation un peu osée des faits observés, une idée nouvelle était apparue, déclenchant cet engouement, qui persiste, pour le paléomagnétisme : la direction moyenne, à l'échelle des temps géologiques, du champ en un lieu aurait varié très fortement mais lentement et régulièrement. Dès lors, la tâche matérielle principale en paléomagnétisme fut d'effectuer un nombre énorme de prélèvements et de mesures pour définir ce « champ moyen géologique » à toutes les époques et dans toutes les grandes régions du Globe. Il s'en est suivi une abondante littérature paléomagnétique faite, pour une large part, de l'exposé détaillé de cette multitude de données.

Partant de l'idée ainsi avancée de lente dérive géologique de la direction du champ terrestre, des géophysiciens se sont élevés, avec une hardiesse frisant parfois l'inconscience, à des considérations qui reviennent à résoudre les problèmes les plus difficiles, relatifs à la croûte terrestre. Ils s'y sont évidemment trouvés encouragés par le fait qu'ils rejoignaient ainsi des idées, non moins hardies, énoncées sur des bases purement géologiques : dérive des pôles, dérive des continents, et, plus récemment, expansion de la Terre. Mais il faut bien voir qu'entre les observations et ces interprétations, il a fallu glisser un chaînon essentiel, l'hypothèse du champ dipôle axial, plus ou moins suggérée à la fois par la structure du champ actuel et par des considérations théoriques. Le champ terrestre, on l'a vu, peut être considéré comme résultant d'un champ dipôle très simple et relativement fixe (à l'échelle du siècle), et d'un champ non dipôle, plus compliqué, mobile et variable. Si nous passons à l'échelle des milliers ou millions d'années, n'est-il pas naturel de considérer que le champ non dipôle a tant circulé et varié que son effet est compensé, et que le champ moyen général du Globe doit se réduire au champ dipôle ? S'agit-il du dipôle actuel, incliné de 11° sur l'axe de rotation de la Terre ? Cette rotation semblant être la cause essentielle du champ terrestre, l'écart des deux axes doit s'apparenter aux irrégularités plus ou moins passagères d'où provient le champ non dipôle et il doit disparaître par moyenne sur un temps très long ; et, ainsi donc, le dipôle moyen doit être dirigé suivant l'axe de rotation de la Terre. Et c'est cela le postulat du paléomagnétisme, l'affirmation que le champ moyen « géologique » aurait été, à toute époque, celui d'un dipôle axial.

En réalité, les paléomagnéticiens engagés soutiennent qu'il n'y a pas postulat mais fait d'observation. En effet, les directions d'aimantation de toutes les roches (volcaniques) du quaternaire, ou de toutes celles du tertiaire supérieur, de tous les continents, correspondraient au champ d'un dipôle coïncidant avec l'axe géographique actuel. Remarquons que, même ainsi, cela ne prouve rien pour les époques antérieures s'étendant d'ailleurs sur des temps très longs par rapport à la durée des périodes considérées. Et puis, objectivement, reconnaissons qu'il faut vraiment les yeux de la foi pour tirer une telle conclusion de l'ensemble des faits observés.

L'hypothèse du dipôle axial étant admise, si aucun changement ne s'était produit sur la surface du Globe, la direction du champ moyen en une région donnée quelconque aurait dû demeurer constante ; l'expérience montrant qu'il

n'en est rien, il s'ensuit que la position relative du continent (par rapport auquel la direction se trouve définie) et de l'axe de rotation de la Terre a nécessairement varié. Or un champ de dipôle axial est si simple qu'il suffit de connaître sa direction en un point pour en déduire la position de l'axe ou, ce qui revient au même, celles des pôles : la déclinaison définit le grand cercle passant par la station et les pôles, et l'inclinaison permet de calculer l'angle de l'axe et du rayon passant par la station (colatitude du point). Bien entendu, il ne s'agit jamais, en paléomagnétisme, de la position de l'axe terrestre dans l'espace, mais de sa position par rapport au lieu considéré lié au continent dont il fait partie. Il faut bien souligner ici que, dans toute la littérature paléomagnétique, il est presque toujours sous-entendu que les continents sont des êtres plus ou moins invariants et autonomes dont on essaie seulement de décrire les déplacements. C'est cette description qui constitue le chapitre final et capital du paléomagnétisme.

LES MESURES EN PALÉOMAGNÉTISME.

A priori, le problème des mesures devrait se poser comme en archéomagnétisme : il faut prélever des échantillons de roches, mesurer la direction de leur aimantation rémanente et, enfin, tenter de s'assurer que cette direction représente bien celle du champ originel.

De fait, les méthodes de travail sont assez différentes dans les deux disciplines, tant dans les prélèvements que dans les mesures magnétiques ; une plus grande liberté est admise à ce sujet en paléomagnétisme où les erreurs sont grandes, a priori, dès la fossilisation du champ. En effet, comme on l'a vu, on ne sait pas bien quand et comment s'est fixée la rémanence des roches sédimentaires et, quant aux roches volcaniques, on est sûr que la direction figée dans une coulée est entachée d'une erreur aléatoire forte due à la divagation séculaire. En conséquence, il importe surtout de traiter un nombre considérable d'échantillons. Si l'on veut, l'archéomagnéticien est un gourmet, et le paléomagnéticien un gros mangeur, peu exigeant sur la qualité. Ainsi, les prélèvements sont souvent très simplifiés ; pour les roches dures, le procédé utilisé en France : poignée de plâtre mou dont la partie supérieure est aplatie en plan horizontal et tracé de l'ombre d'un fil à plomb pour l'orientation, est presque déjà un luxe. Les mesures paléomagnétiques, dont il faut reconnaître qu'elles portent souvent sur des rémanences très faibles, sont surtout effectuées au magnétomètre (du type de Blackett) sur des échantillons de petites dimensions, en forme de disques. Ces « spécimens » sont obtenus en recoupant des carottes, généralement découpées elles-mêmes au laboratoire dans de gros échantillons récoltés ; on réalise ainsi une multiplication des objets à mesurer, mais l'avantage sur la mesure par induction de l'échantillon global reste discutable. Il y a une tendance actuellement au prélèvement direct, sur le terrain, de carottes cylindriques orientées, au moyen d'appareils relativement légers comportant une foreuse entraînée par un moteur à essence ; on peut ainsi attaquer facilement des surfaces dures, continues, de toutes inclinaisons.

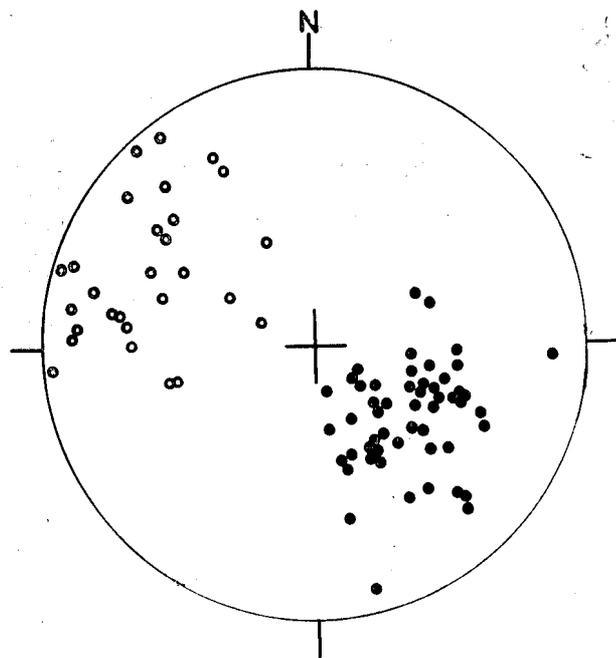
Toutes mesures étant faites, pour une formation géologique donnée, le paléomagnéticien va se trouver en présence de directions mesurées nombreuses et très dispersées ; un premier soin sera de les représenter graphiquement. Dans un système de coordonnées verticales, on matérialise chaque direction par une droite convenablement orientée, ayant pour origine le centre 0 du système et une longueur fixe choisie comme unité. Toutes les extrémités des vecteurs

représentatifs se trouvent ainsi sur une sphère de rayon unité; un point de la sphère définit une direction et réciproquement. Il est facile de voir que tout demi-grand cercle ayant pour diamètre l'axe vertical de coordonnées, est le lieu des points correspondant à des directions de même déclinaison magnétique, et tout cercle horizontal celui de points de même inclinaison; on pourrait graduer la sphère en y traçant les cercles correspondant à des valeurs régulièrement échelonnées de D et I . En réalité, ce graphique dans l'espace, s'il est très clair, n'est pas commode à représenter et on doit le projeter sur un plan qui est, le plus souvent, le plan horizontal. De fait, quatre types de projections sont utilisés: orthogonale, stéréographique, à projection d'arc, à projection de corde, la dernière, la plus courante, étant dite d'A. Schmidt ou à surfaces égales. Dans les quatre cas, les cercles verticaux se projettent exactement de la même façon en droites rayonnantes correspondant chacune à une valeur de D ; les cercles d'égale valeur de I se projettent en cercles concentriques, la seule différence portant sur l'espacement des cercles. Un mode de projection étant choisi, des grilles sont préparées pour des valeurs de D et de I de 10° en 10° généralement; le point central correspond à $I = 90^\circ$, le cercle extérieur à $I = 0$ et, d'après ce qui vient d'être dit, les cercles sont plus ou moins serrés vers le centre ou vers la périphérie, sauf pour le troisième type de projection où ils sont équidistants. Pratiquement, l'utilisateur peut employer ces grilles graduées sans s'inquiéter du mode de projection adopté, que les auteurs omettent d'ailleurs souvent d'indiquer. Par contre, une légende est nécessaire pour distinguer les inclinaisons boréales et australes; en effet, les points représentatifs de deux directions de même D mais à I boréal (point sur la sphère inférieure) ou austral (sphère supérieure) seraient confondus; il faut les distinguer, la convention la plus courante est de choisir deux signes différents indiquant si le point représentatif est sur la sphère inférieure ou supérieure (fig. 21). Un autre mode, plutôt américain, consiste à ne considérer que des vecteurs dans la demi-sphère inférieure en changeant pour cela le sens de ceux correspondant à I austral; on dit alors qu'on projette le pôle N de la direction dans le cas d'une inclinaison boréale et le pôle S dans le cas opposé, et deux signes différents indiquent les deux cas. Ce second mode de représentation a l'inconvénient d'inverser la déclinaison dans le cas austral, c'est-à-dire que les déclinaisons lues sur la grille pour les points S doivent être corrigées de 180° .

Des graphiques analogues à la figure 21 se trouvent en grand nombre dans les mémoires paléomagnétiques pour montrer la plus ou moins grande dispersion des directions mesurées. Généralement, on y indique aussi, avec d'autres signes conventionnels, les directions, au lieu considéré, du champ terrestre actuel et du champ géomagnétique (plutôt de celui qui résulterait d'un dipôle axial, ce qui entraîne une déclinaison nulle). La direction moyenne, résultante d'un ensemble de directions pourrait être appréciée sur les graphiques; le plus souvent elle est déterminée suivant des règles de calcul statistique spécialement étudiées par R. Fisher pour le cas de points fortement dispersés sur une sphère. Ce calcul donne les coordonnées les plus probables du point moyen et le rayon de son « cercle d'erreur », généralement à 95 % : c'est le rayon angulaire du cercle tracé sur la sphère avec le point calculé comme centre, tel que le point représentatif de la direction moyenne vraie ait 95 % de chances de se trouver à l'intérieur. Ce rayon, indice de dispersion de la série considérée, fournit donc une mesure de l'imprécision de la direction moyenne déterminée.

Mais on ne tient compte ainsi que des causes fortuites d'erreur dans les prélèvements et dans les mesures et, dans une certaine mesure, de celles dues à la foudre et aux mouvements tectoniques, à condition que les échantillons aient été prélevés sur une région assez vaste. Mais, parmi toutes les modifications possibles de l'aimantation originelle que nous avons étudiées, il en est de systématiques, ne serait-ce que l'aimantation visqueuse, l'aimantation cristalline et les effets de pression dont l'intervention est d'autant plus grave que les rémanences naturelles sont plus faibles, ce qui est le cas fréquent des roches sédimentaires. D'ailleurs, pour celles-ci que représente l'aimantation originelle? Cette question gênante, que nous nous sommes posée déjà, est le plus souvent éludée par les utilisateurs de roches sédimentaires qui, abandonnant maintenant plus ou moins l'idée détritique, admettent qu'il s'agit plutôt d'aimantation cristalline (sans effet de pression) « acquise peu de temps après le dépôt, dans l'échelle des temps géologiques ».

Les procédés d'analyse et de nettoyage des aimantations naturelles sont de plus en plus couramment utilisés par les paléomagnéticiens dont certains pensent encore qu'il s'agit de techniques tout à fait nouvelles. Mais ces procédés, souvent si clairs et efficaces en archéomagnétisme, le sont nettement moins dans le cas, beaucoup plus confus, de roches très anciennes, seraient-elles même des argiles métamorphiques. Ils ne peuvent rien contre les aimantations cristallines non originelles, les effets de pression et les erreurs propres au mécanisme même de l'aimantation détritique.



Directions of magnetization of Torridonian sandstones. Open circles = upward directions. Closed circles = downward directions.

FIG. 21. — EXEMPLE DE GRAPHIQUE RÉSUMANT UN ENSEMBLE DE MESURES MAGNÉTIQUES (S.K. RUNCORN, ENDEAVOUR 1955).

Pendant longtemps, la seule inquiétude des paléomagnéticiens avait été relative à des aimantations postérieures, mal définies; il s'agissait de savoir si l'aimantation originelle était vraiment stable ou, au contraire, susceptible de s'être modifiée par l'action lente, postérieure, du champ terrestre. Des « tests de terrain » souvent cités avaient été décrits : test « plissement » et test « galet ». L'idée du premier est la suivante : soit une formation aimantée à l'origine et ayant subi ultérieurement un plissement important; si la rémanence originelle est très douce ou d'intensité relativement faible, des rémanences nouvelles ont pu s'installer postérieurement au plissement et se trouver ainsi de directions à peu près parallèles dans toute la formation; si l'on s'agit au départ d'une aimantation dure et d'intensité raisonnable, elle s'est trouvée entraînée dans le plissement et on doit observer des directions d'aimantation variant avec la position du point dans un pli donné. Dans ce cas, on a souvent essayé de « déplisser » la formation, c'est-à-dire de montrer qu'en corrigeant chaque direction d'aimantation mesurée de la rotation due au plissement (correction très générale en paléomagnétisme et évidemment délicate) on retrouvait des directions plus cohérentes. L'idée du « test galet » est de juger les qualités d'une formation d'après des conglomérats qui, en quelques points de la contrée, peuvent résulter de sa destruction partielle. Le raisonnement est sensiblement le même : si l'aimantation de la roche n'a pas subi de modifications depuis l'origine, sa direction doit changer d'un galet à un autre au hasard; si l'aimantation originelle n'est pas dure ou d'intensité suffisante, elle peut être dominée par des aimantations plus récentes que l'on observera, plus ou moins parallèles d'un galet à un autre.

Un autre test de stabilité, pratiqué au laboratoire et de plus en plus répandu, consiste à observer d'éventuels changements de la direction d'aimantation sous l'effet du champ magnétique terrestre actuel. L'opération peut être avantageusement conduite comme nous l'avons décrite pour déterminer l'indice de viscosité de la roche, c'est-à-dire en observant des différences d'intensité d'aimantation plus claires que des changements de direction. Généralement les échantillons présentant des changements importants dans ces conditions sont déclarés « instables » et rejetés; les autres étant acceptés comme stables, même si les changements observés sont de plusieurs degrés en direction ou de plusieurs pour cent sur les intensités. L'instabilité ainsi définie provient de minéraux magnétiquement très doux pour lesquels les distinctions entre les différents types de rémanences deviennent confuses; elle est fréquente même dans les roches volcaniques des époques géologiques récentes; et il n'est pas rare que ce test élimine plus de la moitié des échantillons avec cette singularité que des échantillons voisins peuvent être les uns stables, les autres instables, suivant, admet-on, leur degré d'altération minéralogique, pas toujours visible d'ailleurs.

Tous ces contrôles que l'on effectue sont indiscutables quand ils éliminent, mais ils restent insuffisants quand ils conservent, et aucun ne peut garantir vraiment l'identité des rémanences, originelle et actuelle, des roches très anciennes.

L'INVERSION DU CHAMP MAGNÉTIQUE TERRESTRE.

Ce phénomène que nous avons décrit comme la première conquête du paléomagnétisme restera peut-être la plus claire et la plus sûre de ses acquisitions.

Dès le début du siècle actuel, des cas d'inversion étaient signalés sur des roches volcaniques, en Auvergne (Brunhes et David), puis en d'autres points du Globe (Mercanton). Un travail, souvent méconnu et pourtant important ne serait-ce que par son ampleur, fut celui de M. Matuyama en 1929. Ayant étudié près de 150 échantillons prélevés sur de nombreuses coulées volcaniques japonaises, tertiaires et quaternaires, l'auteur avait observé le fait essentiel que beaucoup de directions se trouvaient grossièrement parallèles au champ actuel, mais les unes suivant son sens et les autres à l'opposé. Faut-il ajouter qu'un nombre appréciable de directions montraient plus d'indépendance, sans qu'on sache si elles étaient représentatives ou résultaient de perturbations, par A.R.I. de foudre, par exemple. Une vingtaine d'années plus tard, des études systématiques sur l'inversion du champ étaient reprises sur des roches volcaniques, principalement en France, en Islande et en Inde, mais toujours avec les aléas de l'instabilité des rémanences et des perturbations par la foudre; elles avaient confirmé la généralité de l'inversion à caractère mondial avec, semble-t-il, des probabilités égales pour les deux sens, direct et inverse. L'effort a porté alors sur la cadence des inversions ou, mieux, sur la position des époques de champ direct et inverse dans la série stratigraphique, l'intérêt étant avivé par un fait qui s'était rapidement dégagé et que les mesures les plus récentes continuent à vérifier : la polarité magnétique qui aurait été inverse au début de l'ère quaternaire serait ensuite restée constamment directe.

Mais, entre temps, des événements curieux s'étaient déroulés. Les géophysiciens de la Carnegie Institution passant, comme nous l'avons dit, de l'étude des varves à celle de roches sédimentaires de plus en plus anciennes annonçaient, à chaque étape de leur progression à travers les époques secondaire puis primaire, que le champ magnétique terrestre avait toujours conservé « substantiellement » sa direction actuelle, sans jamais s'inverser en tout cas. C'était là une conclusion très conformiste car, suivant une théorie nouvelle, gyromagnétique, de P.M.S. Blackett (1947) le moment magnétique d'un astre aurait été lié directement à son moment cinétique, ce qui excluait évidemment toute idée d'inversion mondiale du champ terrestre. Cependant, les inversions d'aimantation dans les roches volcaniques n'étaient pas discutables. Cette opposition entre les résultats obtenus à partir des deux types de roches méritait examen. On aurait dû suspecter les rémanences sédimentaires, à l'origine douteuse; mais, probablement à cause du prestige de l'idée gyromagnétique, l'accusation se tourna plutôt vers les roches volcaniques. C'est à ce moment que L. Néel, portant son attention sur ce curieux problème, se mit à envisager la possibilité théorique d'auto-inversion de la thermorémanence dont il décrivit plusieurs mécanismes plausibles; presque en même temps, la réalité expérimentale du phénomène était démontrée au Japon (A.T.R. inversée) : des roches volcaniques pouvaient avoir reçu une rémanence inverse d'un champ direct. Mais, rapidement, la querelle rebondissait, car, en même temps que la théorie gyromagnétique se trouvait complètement infirmée, on reconnaissait la grande rareté des roches à auto-inversion, et, surtout, on observait des rémanences inverses dans des formations sédimentaires de plus en plus nombreuses; dès 1954, on pouvait admettre que les polarités directe et inverse étaient de même probabilité, aussi bien dans les roches sédimentaires que dans les volcaniques, et ainsi disparaissait l'argument majeur de la controverse. Il y a une leçon à méditer sur le danger des conclusions trop agréables : les faits paléomagnétiques sont toujours touffus, et, d'élégance en élégance, on risque souvent de se retrouver sur de trop belles avenues !

Ultérieurement, le renversement, mondial et répété, du champ terrestre au cours des temps a été reconnu indiscutable, et les théoriciens se sont décidés à s'en accommoder dans leurs difficiles essais d'explication de l'origine du champ. Il restait cependant quelques observations discordantes d'après lesquelles, dans certaines régions très anciennes, les roches à rémanences directe et inverse, présenteraient des différences lithologiques systématiques, surtout dans leurs minéraux porteurs des rémanences. Cette idée, loin de s'atténuer, tendrait plutôt à prendre vigueur ces tout derniers temps avec des travaux sur la minéralogie magnétique comparée de roches voisines, dans des successions avec inversion. Malgré tout, et leurs arguments sont nombreux, la plupart des géophysiciens continuent à croire à l'inversion réelle du champ terrestre. Il reste à débattre des modalités de ces alternances de polarité.

La première question est relative à leur cadence : les changements de sens ont-ils eu lieu à un rythme régulier au moins à certaines époques ? Une étude des successions de coulées constituant les trapps d'Islande avait fait impression il y a une dizaine d'années, enracinant l'idée d'une période courte et relativement régulière : changement de sens à la cadence de quelque 500 000 ans avec passage très rapide d'un sens à l'autre. Il est à craindre que ce résultat, obtenu d'ailleurs sur des aimantations non nettoyées, soit bien idéalisé par rapport à une réalité qui reste difficile à saisir. L'inversion unique du quaternaire paraît certaine. Au tertiaire, il y en aurait eu d'incontestables, mais peut-être en petit nombre d'après certains qui essaient patiemment de les situer aux différents étages de cette ère, dans leur propre région ; cela reste laborieux et il est évidemment bien plus difficile encore de les mettre en parallèle sur l'ensemble du Globe, ce qui serait d'un incontestable intérêt. Après ceux de A. Roche en France, de nombreux travaux sont relatifs à ce problème dont ceux très récents de Kramov en U.R.S.S. et de Doell et Cox aux Iles Hawaiï. Et, actuellement, pour la période la plus étudiée, miocène et pliocène, on ne sait toujours pas s'il y a eu ou non des inversions nombreuses à cadence régulière. La seule solution à ce problème est la datation radioactive des roches étudiées qui permettrait de faire des parallèles sur tout le Globe dans une échelle de temps unique et définie. Les chercheurs américains sont engagés dans cette voie (datation par la méthode potassium-argon) où il faut les suivre. La figure 22, de Doell et Cox, montre ce qui paraît être le résultat le plus sûr obtenu ainsi. On peut le trouver bien limité car il ne porte que sur les quelques derniers millions

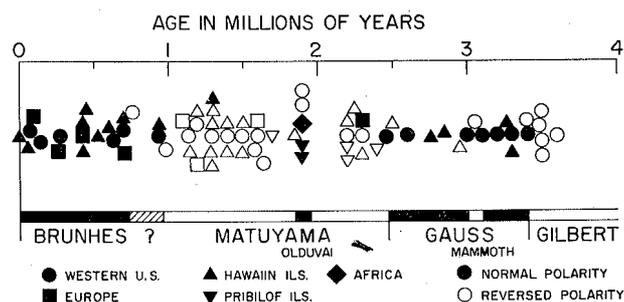


FIG. 22. — GRAPHIQUE DE A. COX ET R.R. DOELL SUR L'INVERSION, PRÉSENTÉ À UN SYMPOSIUM RÉCENT (PITTSBURGH, NOVEMBRE 1964).

Les auteurs y proposent des dénominations pour les dernières époques à sens direct ou inverse.

d'années, et encore il reste une incertitude sur de courtes phases de renversement à l'intérieur de périodes à sens constant relativement longues. Ceci illustre bien les difficultés des recherches objectives sur l'aimantation des roches.

Si le problème des inversions est loin d'être résolu pour le tertiaire, que dire des temps antérieurs ? Le secondaire avec toutes ses formations calcaires n'est pas toujours favorable au paléomagnétisme. Antérieurement, il y aurait eu aussi des inversions ; plusieurs ont été décrites au trias supérieur et moyen et, assez curieusement, toute l'époque permienne correspondrait à un champ inversé en permanence. Cette localisation encore si vague des inversions magnétiques, intéressante en soi, serait susceptible d'applications stratigraphiques. Evidemment, un tel caractère, le sens du champ qui n'est qu'à deux faces, ne peut pas dater mais ce peut être un élément utile s'ajoutant à d'autres purement géologiques.

Une autre question intéressante, mais encore très controversée, est celle du mécanisme du passage d'un sens à l'autre. Ce changement est-il brusque ou lent ? Se fait-il à direction à peu près constante, l'intensité du champ (au fond celle du moment magnétique du dipôle) passant par une valeur nulle puis changeant de sens ? Ou se fait-il plutôt à intensité plus ou moins constante, avec rotation allant jusqu'à 180° ? Beaucoup de tentatives ont été faites pour répondre à ces questions ; elles consistent évidemment à faire des prélèvements serrés d'échantillons entre des formations superposés, franchement directes et franchement inverses. L'opération paraît fort simple à première vue ; mais, d'une part les rémanences des roches présentent souvent de sérieuses complications, surtout s'il s'agit de roches sédimentaires ; d'autre part, au moins dans le cas des formations volcaniques même lorsqu'elles se présentent en nombreuses coulées, les intervalles de temps séparant les venues sont irréguliers et inconnus ; un renversement rapide peut avoir intéressé plusieurs coulées et, aussi bien, un renversement lent n'en avoir intéressé aucune. L'idée qui paraît actuellement la plus répandue est celle du passage assez rapide, les aimantations correspondantes présentant des valeurs anormalement basses. Mais, récemment, une étude japonaise (Momose) exposait un cas de passage très lent avec rotation continue ; s'il en était vraiment ainsi, vers quelles complications n'irions-nous pas avec l'hypothèse de champ dipôle axial qui forme la base du paléomagnétisme. Ces difficultés n'enlèvent rien à l'intérêt de l'étude fine du passage qui reste à poursuivre mais très attentivement, avec analyse des aimantations et prélèvements en différents lieux, du haut en bas d'une même formation, pour s'assurer que les phénomènes observés ne sont pas des accidents locaux.

DÉRIVE DES POLES ET DÉRIVE DES CONTINENTS.

Nous en arrivons au chapitre vedette du paléomagnétisme, dont nous avons préparé l'accès : définition du champ moyen géologique, hypothèse (ou fait) de son caractère dipôle axial sur tout le Globe, changements de position relative des continents et de ce dipôle confondu avec l'axe de rotation de la Terre.

La dérive des pôles.

De tous les changements possibles, le plus simple serait évidemment que l'ensemble de la croûte terrestre ait glissé progressivement sur le manteau supérieur, les continents gardant leurs positions relatives. Nous aurions ainsi un système de référence commode, dans la carte actuelle du

Globe, pour noter la position de l'axe aux différentes époques; le mouvement relatif de l'ensemble de la croûte par rapport à l'axe de rotation se traduisant simplement par le mouvement des pôles (et un seul suffit puisqu'ils sont antipodaux) sur le dessin actuel de la surface du Globe.

S'il s'agit bien de ce glissement d'ensemble de la croûte, le paléomagnétisme prétend pouvoir reconstituer la trajectoire fictive équivalente ou « dérive du pôle ». C'est même une opération idéalement simple en principe. En effet, à une époque donnée, la connaissance du champ moyen en un seul lieu permet de retrouver l'axe du dipôle; il nous suffit donc de connaître l'évolution de ce champ au cours des temps, en une région quelconque du Globe. Cette région fut la Grande-Bretagne vers 1953. A cette époque, la recherche paléomagnétique, de plus en plus délaissée aux Etats-Unis, prenait un essor rapide Outre-Manche. Plusieurs laboratoires s'engageaient dans l'étude de nombreuses formations géologiques, ce qui fournissait, comme il a été dit, des directions du champ moyen progressivement changeantes, aussitôt traduites en position de pôle. Et ainsi fut établie la courbe de dérive du pôle, « polar wandering », impressionnante à souhait : le pôle N, situé sur les Etats-Unis au précambrien lointain, aurait dérivé durant cette très longue période, venant au Sud de l'équateur, puis remontant en passant par le Sud du Japon au dévonien, vers Vladivostok au trias; il serait venu dès le tertiaire à sa position actuelle. On retrouvait là les mouvements relatifs de grande ampleur, postulés par les géologues, tels Milankovitch, et l'on pouvait reprendre des essais de confrontation avec les faits paléoclimatiques.

Mais un contrôle s'impose : vérifier qu'on retrouve la même dérive des pôles avec des rémanences de régions très éloignées de la Grande-Bretagne. Cet essai fut fait rapidement sur des roches d'Amérique du Nord hâtivement étudiées, surtout par des chercheurs anglais. Le résultat fut, comme l'était la vie pour Candide, ni bon ni mauvais mais passable : la trajectoire du pôle avait bien l'allure et l'ampleur de celle obtenue pour la Grande-Bretagne, mais sans qu'il y ait bonne coïncidence, sauf évidemment pour les époques récentes. Du décalage observé, des conclusions furent tirées, assez discutées, sur un déplacement relatif de l'Europe et de l'Amérique; mais bientôt de telles considérations perdirent tout intérêt. En effet, des essais analogues conduits sur des roches de continents plus lointains, sur lesquels les chercheurs anglais avaient essayé (Inde, Australie, Afrique du Sud), conduisirent à un complet désaccord avec les précédents; les pôles calculés pour une époque donnée n'avaient plus rien à voir avec ceux qu'on attendait : l'hypothèse d'une simple dérive de l'ensemble de la croûte n'était plus soutenable. Deux voies s'ouvraient alors, ou bien remettre en cause les principes de base, ou bien admettre la « dérive des continents » : chaque entité continent ayant circulé pour son propre compte au cours des temps géologiques.

La dérive des continents.

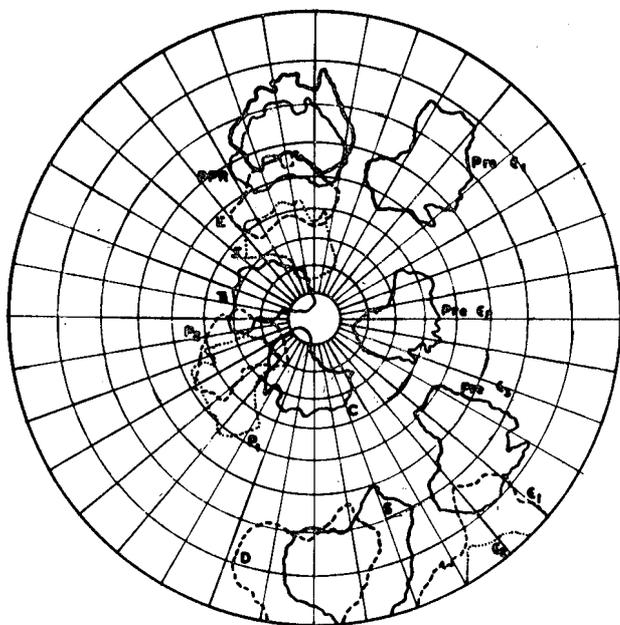
Là aussi l'idée n'était pas nouvelle; des géologues comme Wegener l'avaient préférée à la dérive des pôles dans des reconstitutions hardies, bien connues, de l'histoire climatique du Globe. Pour soutenir la réalité de ces courses des continents, les géologues doivent rechercher toutes sortes d'arguments : emboîtement des formes, crêtes océaniques, nature lithologique des formations... Les paléomagnétiques, eux, sont en principe très à l'aise puisque, pour retrouver les positions du pôle par rapport à un continent donné, il leur suffit de mesurer les aimantations des formations de

tous âges, en des régions quelconques du continent considéré. Mais les continents dérivant, par hypothèse, nous perdons de ce fait notre système de référence que constituait la carte actuelle du Globe dans le cas simple de dérivé des pôles; ce point mérite attention. Considérons un continent, soit l'Australie, ayant par hypothèse divagué par rapport à tout le Globe non superficiel et à son axe de rotation. Dès l'origine des temps géologiques, lions rigidement au bloc Australie un système de référence constitué par une surface sphérique (en papier) de rayon égal à celui de la Terre, sur laquelle nous aurons dessiné un lacis arbitraire de traits. Mais, arbitraire pour arbitraire, choisissons un dessin familier, celui de la surface actuelle du Globe. Au cours des temps, cette surface sphérique entraînée par le continent va glisser par rapport au corps de la Terre, l'axe terrestre la rencontrant en deux points diamétraux variables. Saisissons le continent à une époque géologique donnée, soit le trias (durant laquelle nous négligerons son déplacement); les roches qui s'y forment s'aimantent suivant le champ terrestre; en un lieu donné, l'aimantation (moyenne pour tout le trias, donc résultant d'un champ dipôle axial) a pour orientation celle du méridien, à la fois magnétique et géographique, et une certaine inclinaison I dépendant seulement de la colatitude θ du lieu ($\text{tg } I = 2 \cot \theta$). C'est-à-dire, qu'à cette époque, si nous avançons suivant la direction de l'aimantation (dans le sens où nous rencontrerons des inclinaisons de plus en plus grandes en valeur absolue) d'une distance correspondant à un arc de θ degrés, nous arrivons au pôle magnétique, confondu avec le pôle géographique, que nous pouvons pointer sur notre dessin. Supposons que ce pôle se place par hasard dans la région de Paris; cela signifie-t-il que Paris était, au trias, en position tout à fait polaire? En aucune façon; la coïncidence a lieu avec le point Paris de la sphère de papier et pas du tout avec Paris sur la Terre au trias, point solidaire d'un autre continent qui menait sa vie dérivante indépendamment de l'Australie. Au long des temps géologiques, nous allons pouvoir reporter les positions successives du pôle sur la sphère de référence (à supposer évidemment que nous ayons les aimantations fossiles nécessaires) et nous obtiendrons une sorte de trajectoire du pôle se terminant au pôle actuel. Ce dessin, strictement relatif à l'Australie, nous indique quelle était à chaque époque la position du continent par rapport à l'axe terrestre, en latitude et en attitude (orientation de la figure par rapport à des demi-grands cercles passant par cet axe). Mais quelle information avons-nous sur la position du continent transversalement, en longitude si l'on veut? N'en attendons pas trop, car de deux données, déclinaison et inclinaison fossiles, nous avons déduit déjà deux éléments de position; de fait, nous ne pouvons rien de plus, ce dont on peut se convaincre facilement en reprenant le raisonnement qui a été fait pour l'Australie, au trias, et en lui supposant différentes positions en longitude; le point trouvé comme pôle ne change pas.

Nous n'avons considéré jusqu'ici qu'un seul continent; bien entendu la même opération peut être répétée pour les autres, et pour chacun nous obtiendrons une trajectoire de pôle, dessinée sur un même canevas. Mais il faut bien voir que ces trajectoires relatives chacune à leur continent n'ont pas de relation, les sphères de référence, seulement identiques par leur dessin, ayant suivi chacune leur continent.

On obtient une représentation plus parlante des mouvements relatifs en prenant comme système de référence une sphère, percée par une tige diamétrale représentant l'axe de rotation terrestre, et sur laquelle sont dessinés des cercles de latitude et des grands cercles, anonymes, passant par

l'axe. Pour un continent donné, disons encore l'Australie, et pour chaque époque, un dessin à l'échelle du continent est placé en latitude (valeur de θ dérivée de I) et en attitude (le dessin est orienté de façon que l'aimantation soit dirigée suivant les cercles méridiens de la sphère, ce qui revient à tourner le dessin de $-D$ par rapport à la position actuelle du continent par rapport aux cercles méridiens). Dans la plupart des laboratoires paléomagnétiques, il existe de telles sphères avec une collection de continents à l'échelle, moulés en matière plastique pour qu'ils épousent la forme de la sphère; les « continents », retenus par un fil raide s'attachant à l'axe de rotation matérialisé par la tige, sont placés sur la sphère en latitude et attitude. On peut ainsi représenter les positions successives du continent au cours des temps, comme le montre la figure 23 relative à l'Australie, ou les positions, à une époque donnée, de tous les continents, qui restent totalement libres en longitude, à condition tout de même de ne pas se superposer.



Stereographic projection showing position of Australia relative to the pole. (PPR) Pliocene, Pleistocene, and Recent (newer volcanics of Victoria); (E) Lower Tertiary, probably Eocene (older volcanics of Victoria); (J) Mesozoic, probably Jurassic (Dolerite sills of Tasmania); (T₂) Triassic, probably lower Triassic (Brisbane tuff); (P₂) Permian, Upper Marine Series (volcanics of Illawarra coast); (P₁) Permian, Lower Marine Series (volcanics of Hunter Valley); (C) Upper Carboniferous (Kuttung red varvoid sediments and Kuttung lavas); (D) Devonian, probably Lower Devonian (Ainslie volcanics); (S) Upper Silurian (Mugga porphyry); (s₁) Middle Cambrian (Elder Mountain sandstone); (s₂) Lower Cambrian (Antrim plateau basalts); (Pre-s₂) Top of Upper Proterozoic (Buldiva quartzite); (Pre-s₁) Upper Proterozoic (Mallagine lavas); (Pre-s₁) lower part of Upper Proterozoic (Edith River volcanics).

FIG. 23. — EXEMPLE D'UN GRAPHIQUE DE DÉRIVE D'UN CONTINENT (S.K. RUNCORN, SCIENCE, 1959).

Le continent sur lequel nous avons constamment raisonné était relativement limité. On peut se demander si des difficultés ne doivent pas surgir dans le cas de très vastes continents, par exemple l'Eurasie, de l'Espagne à la Corée. Il n'en est rien si cet ensemble constitue un tout immuable et si, bien entendu, nous admettons les dogmes paléomagnétiques; D et I fossiles d'une époque donnée, mesurés en différentes stations, nous conduisent partant de chacune, à la même position du pôle sur la sphère de référence; il y aurait même là une possibilité de contrôle assez sédui-

sante si les faits paléomagnétiques n'étaient pas aussi touffus. Si le continent s'est déformé, la coïncidence générale disparaît et ceux, qui ont vraiment la foi paléomagnétique, peuvent trouver là un moyen de suivre ces déformations. C'est ainsi qu'on a pu annoncer (Kawai, Ito et Kume) que la forme actuelle, angulaire, du Japon résultait d'une cassure de 40° d'un Japon tout droit, cassure qui se serait produite vers le début du tertiaire.

Expansion du Globe.

Des géologues ont émis l'idée que la Terre devait être en état d'expansion continue. Les paléomagnéticiens ont aussitôt réagi, prêts à mesurer la variation du rayon terrestre au cours des âges géologiques. L'idée générale de cette mesure est la suivante : soit un continent qui, à l'époque E_0 , se trouvant à la surface d'une Terre de rayon R_0 , a acquis de l'aimantation fossile dont nous mesurons maintenant la direction en différentes stations. Si le rayon est demeuré constant, ce que nous avons supposé jusqu'ici, l'opération indiquée précédemment à propos d'un continent un peu vaste doit nous conduire au même pôle à partir des différentes stations. Mais supposons maintenant que la Terre est en expansion et que le continent a été soulevé sans changement de dimensions. Notre détermination s'est faite sur une Terre de rayon R supérieur à R_0 ancien; les verticales ayant changé en se resserrant, les inclinaisons mesurées ne sont plus celles qui ont été fossilisées et les différences de colatitudes et de longitudes entre des couples de points ont diminué. Sans entrer dans le détail des calculs, on comprend que les pôles déterminés sur la sphère actuelle ne peuvent plus coïncider, et le calcul, conduit différemment suivant les auteurs, revient à chercher quelle est la valeur de R_0 qui peut donner la cohérence maximum aux observations. Tout cela évidemment est bien théorique; il faut supposer une précision des mesures paléomagnétiques dont on est très loin, et puis, comment évaluer la déformation du continent quand il passe sur une surface de courbure de plus en plus faible ?

Des calculs récents effectués grâce à des mesures paléomagnétiques soviétiques en Extrême-Orient, ont permis de considérer une très longue base Europe-Sibérie. Contrairement à des travaux antérieurs conduisant à une forte expansion, ils ont donné un résultat sans doute encore peu significatif mais correspondant à un rapport des rayons pratiquement égal à l'unité entre les époques permienne et actuelle. Sans doute ne faut-il voir là, jusqu'ici, qu'un jeu de l'esprit montrant jusqu'à quelles extrémités on peut pousser les principes du paléomagnétisme en admettant qu'ils sont, non des idéalizations d'une réalité fluide, mais des faits solidement établis.

INVENTAIRES PALÉOMAGNÉTIQUES.

Dans tout ce qui précède, nous avons exposé les fondements du paléomagnétisme : les principes, les méthodes de travail, les raisonnements; c'est-à-dire beaucoup plus des idées de travail que des faits et leurs conclusions. Les faits, ce sont les mesures d'aimantation que chacun, chercheur isolé ou équipe, s'efforce d'obtenir, sur le plus grand nombre possible d'échantillons, bien choisis (qualité lithologique et dispersion stratigraphique), bien datés, puis bien nettoyés magnétiquement et mesurés avec soin. Ces chercheurs paléomagnéticiens sont particulièrement nombreux en Grande-Bretagne et dans tous les pays du Commonwealth, et maintenant aussi en U.R.S.S. Il en est encore aux U.S.A., au Japon, en France et dans quelques autres pays.

Les publications exposant des résultats de mesures, relatives parfois à une seule région et une seule époque géologique, sont extrêmement nombreuses. Chaque auteur essaie d'en déduire des points de la trajectoire du pôle du continent étudié. Satisfait si le point vient bien là où on l'attend d'après les publications antérieures qui ont établi une sorte de jurisprudence un peu dangereuse, il essaie d'expliquer le désaccord dans le cas contraire. Toutes ces études sont, faut-il le dire, très inégales surtout à cause des difficultés rencontrées, soit du fait de la nature des roches, soit à cause d'indéterminations géologiques dans la datation et dans la connaissance des pendages nécessaire pour les corrections de déviation des directions des rémanences dues aux plissements.

Des groupes de chercheurs ont tenté à plusieurs reprises de rassembler toutes les données paléomagnétiques mondiales en une large synthèse (Runcorn, Irving, Blackett, Cox and Doell). De tels inventaires, fruits d'un énorme travail matériel, sont des outils précieux pour toute recherche paléomagnétique sur documents ou pour tout projet d'étude nouvelle sur le terrain; certains sont aussi intéressants par les discussions qu'ils contiennent et par la présentation de résultats généraux, en particulier sur la dérive des continents. Ainsi, aux U.S.A., A. Cox et R.R. Doell, chercheurs californiens de l'U.S. Geological Survey, ont donné les résultats de leur patient travail en deux études : la première (Bull. Geol. Soc. of America, 71, 1960, pp. 645-768) est surtout un inventaire, la seconde (Advances in Geophysics, vol. 8, 1961, pp. 221-313) comporte en plus des discussions étendues. On y trouvera d'intéressantes considérations sur les principes paléomagnétiques et les opérations qu'ils permettent, et sur ce qu'il advient si l'un des principes est abandonné, par exemple si le champ s'était trouvé être dipôle mais non axial et, situation plus grave évidemment, s'il n'était pas dipôle même par moyenne sur de longues périodes.

Nous nous arrêtons sur le travail de l'Ecole anglaise de P.M.S. Blackett (Pro. Roy. Soc., A, 256, 1960, pp. 291-322) qui fournit une synthèse du plus haut intérêt. Incontestablement les auteurs se sont interrogés sur la validité générale du paléomagnétisme et ils ont hésité avant de conclure, positivement mais non sans avoir effectué une importante ablation. Ils considèrent comme impossible la conservation de la rémanence originelle de roches très anciennes entièrement métamorphosées et, pour adopter une règle simple, ils décident d'abandonner toutes les formations plus vieilles que 500 millions d'années (c'est 600 millions dans la nouvelle échelle de Holmes qu'ils ont ensuite adoptée), c'est-à-dire tout ce qui est antérieur au Cambrien. Or jusqu'ici les roches antécambriennes ont été très étudiées et une portion importante des nombreuses trajectoires de pôles publiées appartient à ces périodes très anciennes ainsi sacrifiées. Certes toute amputation est douloureuse, mais il en est de salutaires et il paraît difficile de discuter celle-ci. Les auteurs font observer ensuite que les grandes régions du Globe ont été considérées avec des attentions très différentes et ils n'en retiennent que quatre : l'Europe, l'Amérique du Nord, l'Australie et l'Inde, qu'ils étudient indépendamment après avoir choisi sur chacune un point repère auquel, par des corrections acceptables, ils ramènent toutes les mesures faites sur le continent. Pour l'Europe, le choix est aimable, le point guide étant Paris.

Pour les quatre villes retenues, les auteurs reportent sur des graphiques analogues à celui de la figure 24 relative à Paris, toutes les valeurs obtenues pour D et I en fonction de l'âge géologique. Bien que la dispersion sur ces graphiques

soit malheureusement énorme, les auteurs ont cru pouvoir tracer des courbes lisses ajustées au mieux à travers les nuages de points. Ces courbes étant admises, on peut alors en extraire les valeurs de D et I , par exemple de 50 en

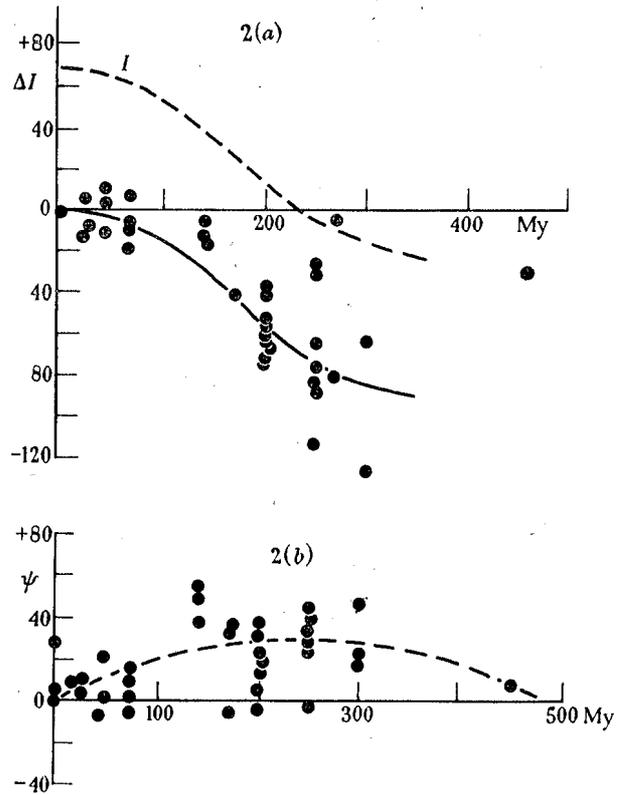
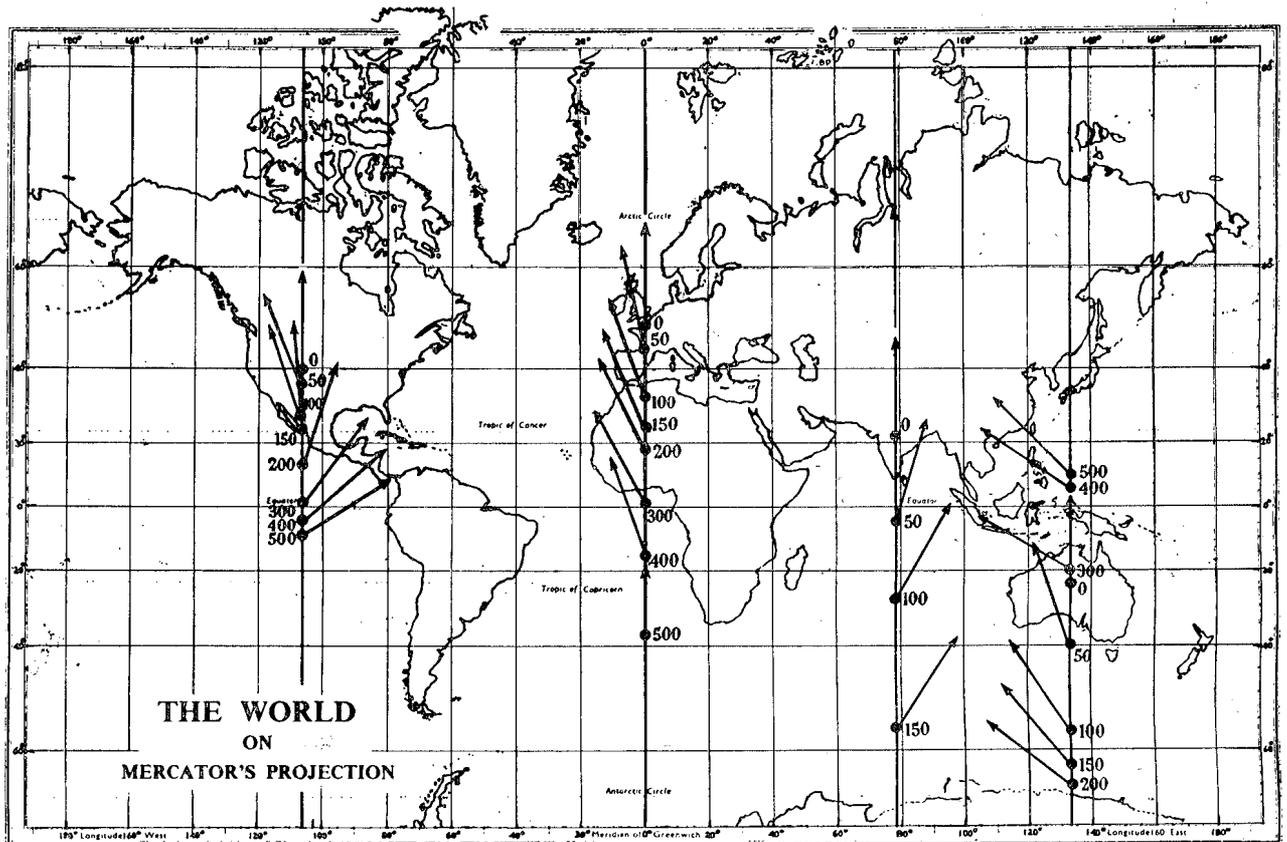


FIG. 24. — GRAPHIQUE DE P.M.S. BLACKETT ET SES COLLABORATEURS, RELATIF A L'EUROPE REPRÉSENTÉE PAR PARIS.

Sur la figure 2 (a) les points et la courbe en trait plein tracée parmi eux, correspondent à la différence ΔI entre l'inclinaison paléomagnétique mesurée et l'inclinaison actuelle à Paris ($66^{\circ} 1/2$) d'un champ qui serait dipôle axial. La courbe en tireté représente I paléomagnétique par translation verticale de $66^{\circ} 1/2$ de la courbe précédente. Sur la courbe 2 (b), ψ correspond à D paléomagnétique. L'échelle de temps est celle de Holmes ancienne.

50 millions d'années, et calculer les positions correspondantes du pôle par rapport au continent portant la ville considérée ou, réciproquement, la position du continent par rapport au pôle. La figure 25 extraite aussi du mémoire résume ces mouvements pour les quatre continents. On voit ainsi comment le continent européen entraînant Paris se serait déplacé par rapport au pôle, en latitude et en attitude, les flèches indiquant la position, aux différentes époques, du méridien actuel de Paris supposé gravé sur le sol français. Les auteurs espèrent que les grandes lignes de cette évolution, bien qu'idéalisées à partir d'un magma de faits imprécis et confus, ont quelque chance d'être réelles. Il ne faudrait pas s'imaginer que le moment est venu de s'en servir, en sens inverse, pour dater en stratigraphie. Pour s'en convaincre il suffit de retourner aux graphiques analogues à



The number against each point indicates its age in millions of years.

FIG. 25. — DÉRIVE DES CONTINENTS, D'APRÈS P.M.S. BLAKETT ET SES COLLABORATEURS : POSITION EN LATITUDE DES QUATRE VILLES TÉMOINS AUX DATES INDICUÉES EN MILLION D'ANNÉES, ET ORIENTATION DE LEUR MÉRIDIEN GÉOGRAPHIQUE ACTUEL.

ceux de la figure 24 où l'on peut voir qu'un point individuel (correspondant à toute une région et toute une époque) n'y est pas « exact » à une ère géologique près. C'est là, pour les géologues, une dure mais indiscutable vérité.

NOUVELLES IDÉES; NOUVELLES HARDIESSES DU PALÉOMAGNÉTISME.

Elles reviennent au fond à assembler les idées de « dérive des pôles » (mouvement de l'ensemble des continents) et de « dérive des continents » (mouvements individuels des continents) que nous avons considérées comme deux termes d'une alternative dont le premier d'ailleurs se trouvait éliminé par les faits observés. La tendance actuelle, comme on va le voir, est de considérer que les deux états se sont succédés.

Cette idée qu'il a pu exister de longues périodes de dérive d'une configuration fixe de continents était déjà à la base de certains essais difficiles à suivre et, a priori, troublants, de reconstitution de positions relatives de continents en longitude. Si l'on suppose que deux continents, qui ont pu ultérieurement se déplacer l'un par rapport à l'autre,

avaient pendant un long temps dérivé en formant une figure invariable, on peut, en principe, par des raisonnements purement géométriques mais en s'aidant cependant d'une hypothèse supplémentaire de mouvement minimum (Irving), fixer la position relative des deux masses pendant ce temps. Une autre idée peut être exploitée s'appuyant sur celle, purement géologique, de la reconstitution des positions relatives de continents à partir d'emboîtements possibles de formes, comme celles, par exemple, de l'Amérique du Sud et de l'Afrique. Nous savons que, par voie paléomagnétique, et toujours en principe, nous pouvons à une époque donnée reconstituer la position en latitude et l'orientation de chacune des deux masses, mais avec indétermination complète en longitude. Cependant, imaginons que, par un déplacement en longitude, les deux masses ainsi situées et orientées, soient susceptibles de s'emboîter convenablement, il paraît assez naturel de penser qu'elles se trouvaient ainsi placées au contact l'une de l'autre à l'époque considérée. Cela se produirait dans le cas cité de l'Afrique et de l'Amérique du Sud pendant plus de 100 millions d'années, mais à condition de s'élever bien haut au-dessus du détail des mesures de rémanences qui sont justement fragmentaires et vagues pour ces continents.

C'est sur de telles idées que, très récemment, les plus hardis des paléomagnéticiens, ayant renié un peu leurs courbes antérieures de dérive des pôles ou des continents et s'appuyant sur de nouvelles données et aussi sur de nouvelles interprétations des mesures d'aimantation, maintenant soumises au nettoyage magnétique, tentent, dans un nouvel accès d'enthousiasme confiant dans les rémanences des roches anciennes, de nous amener au schéma suivant (K.M. Creer). Au début des temps primaires, sur une Terre encore petite (de rayon sensiblement moitié de l'actuel) les continents auraient formé une croûte à peu près continue, susceptible d'ailleurs de dériver par rapport à l'axe de rotation terrestre (pure dérive des pôles). Par expansion de la Terre, il y aurait eu vers le Cambrien soit il y a environ 450 millions d'années, une séparation en deux masses laissant entre elles une cuvette océanique : le bloc Gondwana avec les continents Afrique, Amérique du Sud, Australie, Antarctique, Inde, et le bloc Laurasia avec l'Amérique du Nord et l'Eurasie. Pour chacun de ces blocs pris indépendamment, il n'y aurait eu que cette « dérive des pôles » que l'on suppose (et que l'on croit démontrer plus ou moins par certains accords entre les faits), une « dérive des continents » s'opérant entre les deux blocs. Vers le Permien inférieur, soit il y a 250 millions d'années environ, les deux grands blocs se seraient disloqués en unités correspondant aux continents actuels qui auraient alors dérivé chacun indépendamment (pure dérive des continents).

Comme il y a dix ans, les idées courent vite et très loin au devant des faits. Dans leur ensemble, ou partiellement, elles sont séduisantes; mais, faut-il le répéter, elles s'appuient sur un complexe expérimental très touffu et sur des hypothèses dont des auteurs n'hésitent pas à écrire qu'elles sont justifiées par la fécondité et la portée de leurs conséquences; mais ce n'est là qu'une autre hypothèse.

Pour ceux qui aiment les idées hardies, il en est une, vieille à peine de deux ans mais qui risque de faire son chemin, relative à l'inversion du champ terrestre. Si cette inversion se fait par passage à zéro de l'intensité du champ, la Terre se trouve alors magnétiquement nue contre les arrivées de corpuscules électriques externes. Le rayonnement cosmique atteignant l'atmosphère est alors plus intense mais aussi le rayonnement particulaire solaire (la magnétosphère et ses zones de Van Allen ont disparu). Il peut en résulter chez les êtres vivants des mutations plus nombreuses capables de modifier les races si l'on admet que l'effet mutant des cosmiques est important. Ainsi les périodes de champ nul pourraient être en relation avec les périodes de variation rapide de certaines espèces que révèlent les études paléontologiques.

CONCLUSIONS ET PROGRAMME.

On peut être très pessimiste et penser que les efforts considérables déployés pour l'étude de l'aimantation des roches anciennes ne mèneront à rien. On peut l'être moins et penser que les conclusions générales du paléomagnétisme sont valables. On peut être enfin optimiste (et l'on est alors en nombreuse compagnie jusqu'ici !) et penser que tout l'édifice est solide et qu'il y a encore beaucoup à faire et à apprendre dans la confrontation des roches et des magnétomètres. Le programme que l'on peut alors envisager dans la suite comporte par exemple :

1° Encore et beaucoup de prélèvements pour compléter l'enquête qui ne couvre pas toutes les époques et qui ne porte que sur les régions continentales du Globe. Il y aurait évidemment le plus grand intérêt à étudier aussi les séries

couvertes par l'immensité des océans mais les carottages océaniques n'ont été jusqu'ici ni nombreux, ni vraiment profonds.

Même limitée aux continents, cette étude n'est pas si facile; indépendamment des difficultés matérielles inhérentes à beaucoup de régions, il y a celles venant des problèmes de datation et des qualités magnétiques des roches. Beaucoup de roches sédimentaires ne sont pas utilisables parce qu'insuffisamment aimantées et il ne faut pas oublier que la moitié des résultats paléomagnétiques viennent de grès rouges dont on ne sait toujours pas quand et comment ils se sont aimantés. Et puis beaucoup de roches ont des rémanences décourageantes soit par leurs qualités révélées au laboratoire, soit par l'imbroglio de leur répartition sur le terrain.

2° Un autre champ d'action est la confrontation des résultats paléomagnétiques et paléoclimatiques susceptibles de se valoriser mutuellement. Les discussions entre les chercheurs des deux spécialités se multiplient heureusement; si dans certains cas l'accord paraît excellent, par exemple quand le géologue trouve de grandes formations glaciaires pour une région que le magnétisme place vers le pôle à l'époque considérée, il y a souvent désaccord ou indétermination. La paléoclimatologie est une science difficile et beaucoup de ses résultats sont peut-être à reprendre; la comparaison avec les conclusions magnétiques est d'ailleurs loin d'être directe : des glaciers ne signifient pas nécessairement régions polaires, des déserts s'étendent largement de part et d'autre des tropiques, la zone des coraux elle aussi ne correspond pas à des latitudes définies; tout, en climatologie, dépend, comme on peut en juger sur le Globe actuel, de la répartition des océans et des continents, des courants marins, des reliefs. D'ailleurs les paléoclimatologistes ont une liberté que n'ont pas les magnéticiens rivaux au Globe terrestre, celle d'incliner plus ou moins l'axe de rotation de la Terre par rapport à l'écliptique. Signalons au passage une branche nouvelle d'études, ouverte en paléoclimatologie par les géomagnéticiens, celle des vents dominants retracés d'après les dunes fossiles (Runcorn); mais on voit bien là combien est tortueux le chemin conduisant du terrain aux conclusions : les directions de vents étant supposées retracées en de nombreux points pour une époque, encore faut-il pour les traduire en latitudes passer par un schéma de la circulation générale de l'atmosphère à cette époque.

3° Enfin il reste un champ de confrontation, presque illimité mais difficile, des faits paléomagnétiques très généraux avec ceux de la géologie dynamique, de la physique de l'intérieur du Globe, ne serait-ce qu'avec les idées récentes de convection dans le manteau terrestre, et aussi avec les théories de l'origine du champ magnétique terrestre.

Le géomagnétisme est un hôte d'honneur dans tous les chapitres de la géophysique tout particulièrement dans ceux, récents, relatifs à la haute atmosphère et à l'exosphère. En ce qui concerne la variation séculaire, qui vient de retenir notre attention, elle lui a créé des liens avec l'archéologie et, si nous nous refusons encore à parler de datation magnétique, bien des applications sont maintenant effectives. La variation à l'échelle des temps géologiques a renouvelé l'intérêt des considérations paléoclimatiques en relançant avec une assurance jusqu'alors inconnue la notion de mouvements dans la croûte. Quoi qu'il en soit de son avenir, le paléomagnétisme, remueur d'idées, aura provoqué dans plusieurs domaines des réflexions et des travaux qui garderont leur intérêt même si leurs résultats devaient conduire un jour à le condamner.