

Etude archéomagnétique

J.J. HUS, R. GEERAERTS

1. Introduction

Au cours des fouilles de la Place Saint-Lambert à Liège, nous avons eu l'occasion en 1977, 1978, 1980 et 1981 de prélever « in situ » des échantillons orientés de terre cuite dans quatre niveaux brûlés et dans la partie sud du praefurnium d'une villa romaine (fig. 146).

Les échantillons ont été étudiés au Centre de Physique du Globe de l'I.R.M. à Dourbes dans le but de proposer des dates archéomagnétiques possibles pour leur cuisson en se basant sur les connaissances actuelles de la variation séculaire du champ magnétique terrestre (CMT) durant les deux derniers millénaires dans nos régions. L'application de cette méthode doit permettre de contrôler la chronologie archéologique proposée, les datations absolues éventuelles, et notamment de vérifier si les niveaux brûlés correspondent bien à des incendies mentionnés par les chroniques historiques. Certaines de ces dates étant connues avec précision, cette étude peut améliorer notre connaissance de la direction du CMT dans le passé.

Les bases physiques de la méthode archéomagnétique ont été exposées dans des publications qui font autorité (Thellier, 1981 ; Aitken, 1974). Nous nous limiterons à rappeler que les terres cuites portées à haute température acquièrent au cours de leur refroidissement une aimantation thermorémanente (ATR) dont la direction est celle du CMT ambiant et dont l'intensité est proportionnelle à la valeur de ce champ. Cette ATR est une ATR totale quand la température atteinte dépasse le point de Curie des minéraux magnétiques présents (environ 580° pour la magnétite et 675° pour l'hématite). Cette aimantation, véritable « mémoire » du CMT ancien est très stable vis-à-vis des actions physiques comme les champs alternatifs ou continus, le temps et les variations de température.

2. Méthodologie

a) PRELEVEMENT ET PREPARATION DES ECHANTILLONS

A la Place Saint-Lambert, nous avons utilisé plusieurs techniques de prélèvement suivant la dureté des terres cuites. Les plus tendres d'entre elles ont été découpées au couteau de manière à pouvoir les entourer d'un cadre en aluminium muni de deux nivelles à bulle d'air. Ce cadre, servant de moule, a été rempli de plâtre dont la surface supérieure horizontale a été lissée. Pour les échantillons plus durs, notamment les pierres brûlées et les morceaux de tuiles, une disqueuse nous a permis de découper des blocs volumineux qui ont été enrobés dans du plâtre. Avant qu'il ne soit tout à fait dur, nous y avons

enfoncé un disque en aluminium pourvu de deux nivelles pour obtenir une surface plane horizontale.

Un théodolite a permis de déterminer l'azimut géographique du soleil à un instant donné par la méthode de la distance zénithale et de tracer sur la surface horizontale une direction repère d'azimut géographique connu. Ce n'est qu'après leur orientation que les échantillons sont détachés du site. Parvenus au laboratoire, ils sont réenrobés avec du plâtre, directement, ou, pour les blocs plus volumineux, après avoir été découpés à la scie diamantée. On obtient ainsi des cubes (spécimens) de 9 cm de côté dont l'orientation est connue à moins d'un degré d'arc près. On trouve dans le tableau 1 un résumé des prélèvements : le nom, l'année du prélèvement, le nombre d'échantillons, la nature de la structure et le nombre de spécimens finalement obtenus.

b) MESURE DE L'AIMANTATION REMANENTE ET TEST DE STABILITE

L'aimantation rémanente des spécimens a été obtenue en mesurant les composantes du moment magnétique (M_{x_i} , M_{y_i} , M_{z_i}) suivant 3 axes orthogonaux coïncidant avec les arêtes du cube à l'aide d'un « spinner » magnétomètre SERCEL décrit par THELLIER (1981). Après une transformation simple des coordonnées, on trouve les composantes du moment magnétique (M_{x_i} , M_{y_i} , M_{z_i}) suivant trois axes dirigés respectivement vers le Nord vrai (X), l'Est (Y) et le Nadir (Z). On obtient finalement la direction de l'aimantation déterminée par sa déclinaison (D_i) et son inclinaison (I_i) ainsi que la valeur du moment magnétique (M_{T_i}) en appliquant les formules suivantes :

$$D_i = \arctg M_{y_i}/M_{x_i}$$

$$I_i = \arctg \frac{M_{z_i}}{[M_{x_i}^2 + M_{y_i}^2]^{1/2}}$$

$$M_{T_i} = [M_{x_i}^2 + M_{y_i}^2 + M_{z_i}^2]^{1/2}$$

où I_i est l'angle que forme l'aimantation avec le plan horizontal et D_i l'angle dans le plan horizontal entre la direction de l'aimantation et le nord géographique.

Après la mesure de l'aimantation rémanente naturelle (ARN), les échantillons ont été retournés de 180° autour d'un axe horizontal perpendiculaire au méridien magnétique et restent dans cette position environ un mois, en présence du CMT régnant dans le laboratoire. Ils sont alors mesurés une nouvelle fois. Ce test de retournement nous permet d'estimer l'aimantation rémanente visqueuse (ARV) qui apparaît spontanément dans l'échantillon par activation thermique à température ambiante

sous l'action d'un champ magnétique faible continu. En effet, la demi-différence des deux mesures nous fournit l'ARV apparue après un mois et la demi-somme, l'ARN corrigée pour cette même viscosité. Expérimentalement, on trouve que cette ARV croît linéairement avec le logarithme du temps t , c'est-à-dire que l'ARV acquise par exemple entre $t = 1$ minute et $t = 1$ mois est aussi importante que celle apparue entre $t = 1$ mois et $t = 3500$ ans. La stabilité d'une ARV augmente légèrement avec l'âge mais la contribution d'une ARV « dure » ancienne restera relativement faible comparée à l'ARV « douce » acquise durant les dernières années.

Plusieurs échantillons pilotes ont été désaimantés progressivement dans des champs magnétiques alternatifs croissants en vue d'identifier les différentes composantes d'aimantation rémanente présentes, de déterminer leur stabilité et d'isoler la composante la plus stable. Ce traitement permet généralement d'éliminer l'ARV acquise par les échantillons « in situ » depuis leur dernière cuisson jusqu'au moment du prélèvement. Pendant la désaimantation par champ alternatif, les domaines magnétiques ayant une force coercitive inférieure au champ alternatif maximal appliqué sont distribués suivant des directions considérées comme réparties d'une manière aléatoire. Un grand désavantage est que plusieurs températures de blocage peuvent correspondre avec une seule valeur de la force coercitive, ce qui fait qu'une grande partie de l'aimantation thermo-rémanente (ATR) est détruite au cas où un champ alternatif important s'avère nécessaire pour éliminer complètement l'ARV. La présence d'aimantations de directions différentes est clairement mise en évidence par des rotations du vecteur aimantation résultant dans les diagrammes de Zijdeveld (voir fig. 143a) où chaque point représente la projection orthogonale de l'extrémité nord du vecteur sur deux sous-espaces, c'est-à-dire sur le plan horizontal du lieu d'échantillonnage et le plan vertical passant par le méridien géographique.

c) CALCUL DE LA DIRECTION MOYENNE

Les directions de l'aimantation diffèrent d'un échantillon à l'autre par suite d'un grand nombre de causes d'erreur d'origine tant interne qu'externe, ce qui justifie l'application de la statistique de Fisher qui est en fait une simulation de la statistique normale de Gauss valable pour des directions dans l'espace.

La direction moyenne (fixée par \bar{I} et \bar{D}), meilleure estimation de la direction vraie est la direction résultante de la somme vectorielle des vecteurs unitaires des directions individuelles de l'aimantation.

La meilleure approximation K du facteur de précision κ , une mesure de la dispersion des directions individuelles autour de la direction moyenne est obtenue par :

$$K \doteq \kappa = \frac{N-1}{N-\bar{R}}$$

où \bar{R} est la longueur de la résultante des vecteurs unitaires

et N le nombre total des échantillons (FISCHER, 1953).

Le rayon du cercle de confiance α_{95} ou incertitude angulaire est obtenu d'après FISCHER pour $K > 3$, avec la formule suivante :

$$\cos \alpha_{95} = 1 - \frac{N-R}{R} (20^{\frac{1}{N-1}} - 1)$$

Les erreurs correspondantes $\Delta\bar{I}$ et $\Delta\bar{D}$ en \bar{I} et en \bar{D} sont données par $\Delta\bar{I} = \alpha_{95}$, $\Delta\bar{D} = \Delta\bar{I}/\cos I$.

Il s'ensuit que pour nos latitudes l'incertitude en \bar{D} sera nettement plus importante que l'erreur en \bar{I} .

3. Résultats et discussion

La figure 1a présente sous forme de diagrammes de Zijdeveld les résultats des tests de stabilité de quelques-uns des 19 échantillons désaimantés progressivement dans des champs alternatifs croissants. Lorsque, ayant atteint des valeurs suffisamment élevées du champ alternatif appliqué, l'aimantation décroît linéairement vers l'origine, on a, avec grande probabilité, isolé la composante ayant la plus grande stabilité. Les rotations du vecteur dans des champs alternatifs faibles sont dues à la présence d'autres composantes moins stables, ici d'origine visqueuse. Le début des courbes de décroissance de l'intensité d'aimantation en fonction du champ alternatif appliqué (fig. 143b), convexe vers l'axe des champs, indique la présence d'une aimantation stable sans doute d'origine thermique. La stabilité de l'ARN se traduit par la valeur du champ alternatif nécessaire pour réduire son intensité initiale de 50 %, appelé « median destructive field » (M.D.F.). Ce paramètre varie largement pour les 19 échantillons examinés, de 81 Oe à plus de 1000 Oe, sa valeur moyenne étant de 175 Oe si l'on ne tient pas compte des 2 échantillons LGA4E08 et LGA1E01 où le MDF dépasse 1000 Oe. Les plus grandes valeurs sont trouvées dans les morceaux de tuiles et les terres cuites de LGA1. Le taux de viscosité obtenu après retournement des échantillons dans le champ ambiant pendant une période allant de 18 à 105 jours est inférieur à 10 %, sauf pour LGA4 où le taux moyen est de 17 %. L'analyse des diagrammes de Zijdeveld a permis de choisir la valeur du champ alternatif à appliquer pour éliminer les composantes d'origine visqueuse : 250 Oe pour tous les échantillons, sauf pour LGA3 où un champ de 300 Oe a été choisi. Après ce « nettoyage », les valeurs moyennes de l'inclinaison et de la déclinaison de chaque site ont été calculées au moyen de formules citées plus haut (2) en donnant le même poids statistique à chaque échantillon prélevé sur le terrain. Certains échantillons, dont les résultats s'écartaient trop de la moyenne ont été éliminés, puis une nouvelle moyenne a de nouveau été calculée. Le nombre d'échantillons retenus, les valeurs moyennes de l'inclinaison et de la déclinaison, l'erreur probable sur celles-ci, le facteur de dispersion sont repris dans le tableau 1. Les directions obtenues sont représentées dans les diagrammes de Bauer (fig. 144) après réduction à Londres et à Paris.

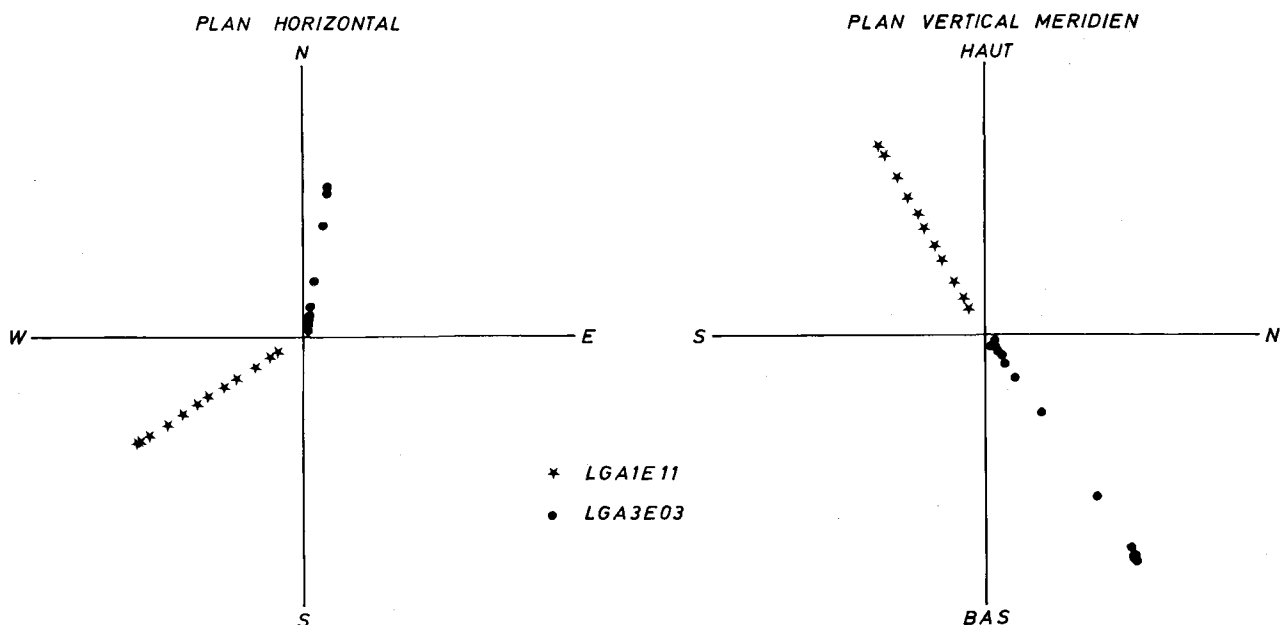


Fig. 143a
Evolution des directions d'aimantation pendant deux désaimantations.

Le diagramme reproduit par Clark, de la variation séculaire durant les deux derniers millénaires à Londres (fig. 144a) est basé sur les mesures paléomagnétiques faites par Aitken et Weaver dans des sites répartis sur le territoire de la Grande-Bretagne, toutes les directions trouvées étant réduites à ce qu'elles auraient été à Londres. Le diagramme pour Paris est quant à lui basé sur les résultats des mesures exécutées par Thellier, principalement sur des terres cuites provenant de la France, les valeurs étant ici ramenées à Paris. La distance entre Londres et Paris n'est que de 336 km, on doit donc s'attendre à ce que les graphiques manifestent les mêmes tendances. Pour la période allant du XVII^e siècle à nos jours, les courbes sont basées sur des mesures directes et elles présentent en effet une grande similitude. Par contre, des différences importantes sont notées pour les périodes antérieures, où les données proviennent uniquement des mesures archéomagnétiques indirectes. Pendant la période « post-romaine », les deux courbes décrivent principalement une boucle parcourue dans le sens antihorlogique, situées dans la partie orientale du diagramme. Dans les deux cas, le maximum d'inclinaison se produit au VIII^e siècle, alors que le minimum est atteint au cours du XIV^e siècle. Une différence notable se constate entre 1200 et 1500 : on observe dans la courbe de Londres une boucle fermée, notamment avec des déclinaisons occidentales qui n'apparaît nullement à Paris. De plus, vers l'an 1000, la déclinaison est nettement plus orientale à Londres qu'à Paris, tandis que le contraire est vrai entre 1300 et 1400. Pendant la période romaine, la courbe de Londres parcourt une épingle à cheveux très étroite et ouverte, la courbe de Paris présentant une boucle fermée. Dans les deux cas, la déclinaison est faible ; le minimum d'inclinaison se marque vers 200 à Paris et vers 250 à Londres.

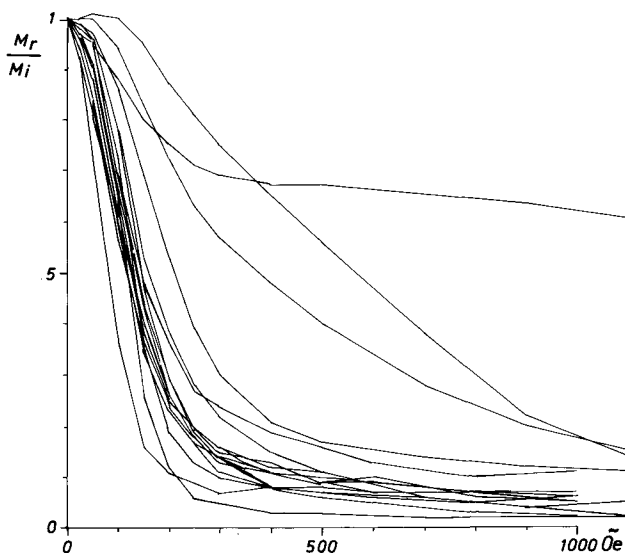


Fig. 143b
Evolution de l'intensité au cours des désaimantations.

La précision de ces courbes n'est qu'apparente et exagérée : elles ont été tracées à la main par leurs auteurs qui ont appliqué un lissage visuel subjectif, y introduisant ainsi un biais. Si l'on examine de près les données brutes publiées, on observe une large dispersion des mesures individuelles ; certaines d'entre elles sont entâchées de limites d'erreurs probables importantes dues principalement aux imprécisions de la chronologie archéologique. Une méthode plus objective de traitement des données s'impose. C'est ce à quoi ont commencé à s'attacher Hedley et d'autres (1982, 1984). Ils ont ajusté séparément aux valeurs de I et D de l'Europe de l'Ouest une fonction spline cubique de lissage par la méthode des moindres carrés, qui fournit d'une manière objective une courbe donnant les variations du champ les plus probables. Pour l'époque romaine, ils trouvent ainsi une boucle ouverte pour Paris et une boucle fermée au III^e siècle pour Londres.

Les remarques qui précèdent font apparaître qu'une datation archéomagnétique précise n'est pas encore possible. La chronologie magnétique qui va être proposée ici doit donc être considérée comme indicative, avec les réserves qui s'imposent et elle devra être confrontée avec les datations obtenues par d'autres méthodes. La datation archéomagnétique à partir de la direction de l'aimantation des terres cuites n'est pas une méthode de datation absolue dans le sens strict car elle nécessite la connaissance de la variation séculaire du CMT dans le passé et donc de l'établissement des courbes de référence, telles celles de Londres et Paris, donnant la variation $I(t)$ et $D(t)$ en fonction du temps pour la région étudiée. La précision d'une datation magnétique dépend de :

- la précision avec laquelle les courbes de référence ont été établies et comme l'échelle du temps de ces courbes est basée principalement sur une chronologie archéologique, finalement de la précision de cette dernière.

- de la distance entre le lieu de prélèvement et la zone où les courbes de référence sont obtenues. Ces dernières sont le résultat des mesures dans plusieurs sites répartis dans une aire dont le rayon est de l'ordre de grandeur de 500 km.

- du nombre total d'échantillons mesurés.

- du taux ou vitesse de variation de la direction du CMT.

- de la récurrence dans le temps des mêmes valeurs I et D donnant lieu à des points de croisement dans le diagramme de Bauer (fig. 144) où le choix d'une solution unique est rendu impossible. Notons que les courbes deviennent indistinctes quand les zones d'erreurs se chevauchent.

- des erreurs systématiques causées par un déplacement des structures notamment par bioturbation, cryoturbation, glissement, affaissement, tassement, etc..

- l'anisotropie des structures analysées et la réfraction magnétique.

- de la latitude de l'endroit comme exposé dans le paragraphe 2.

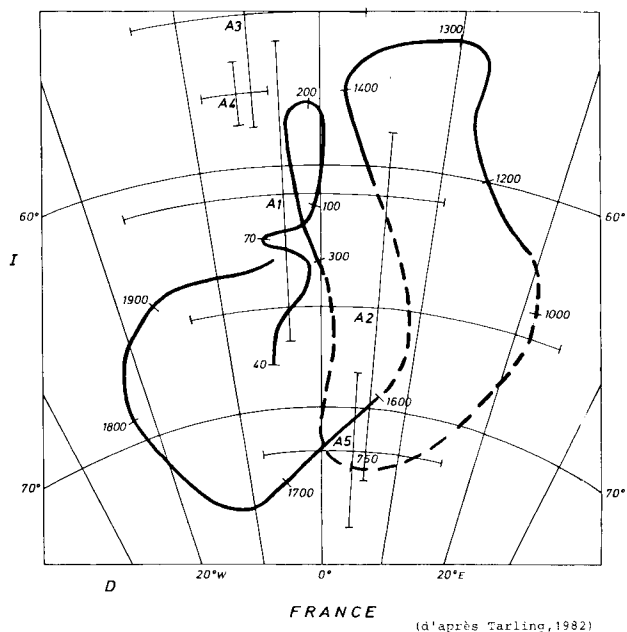
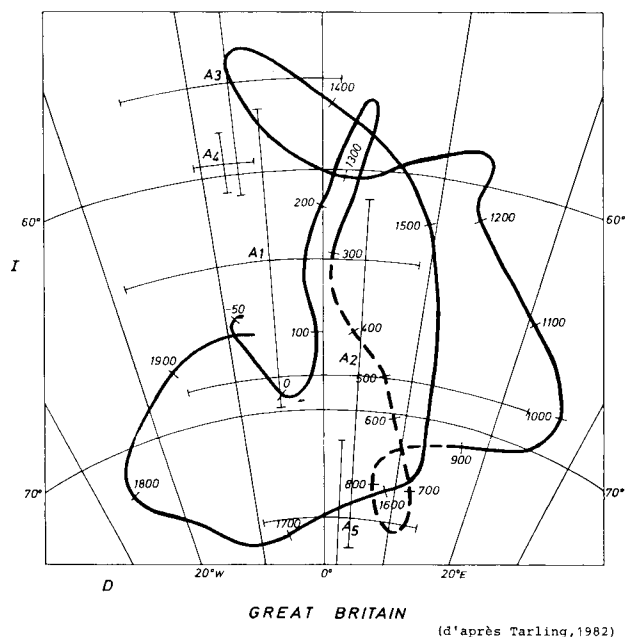


Fig. 144
Variation de l'inclinaison (I) et de la déclinaison (D) depuis l'époque romaine, et valeurs I et D des échantillons de la Place Saint-Lambert, réduites à Londres (a) et à Paris (b).

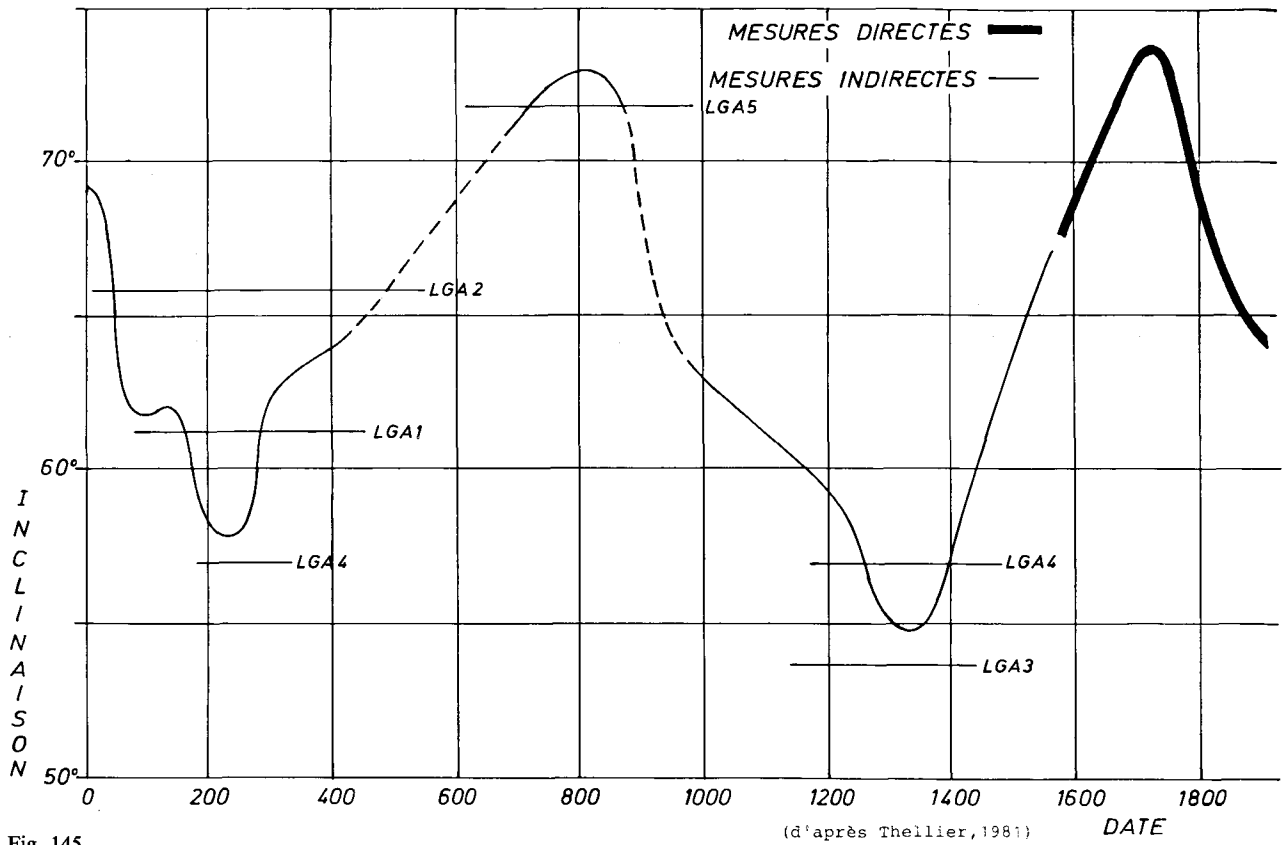


Fig. 145
 Variation de l'inclinaison (I) depuis l'époque romaine à Paris et les inclinaisons (traits horizontaux) des échantillons (traits horizontaux) des échantillons de la Place Saint-Lambert, réduites à Paris.

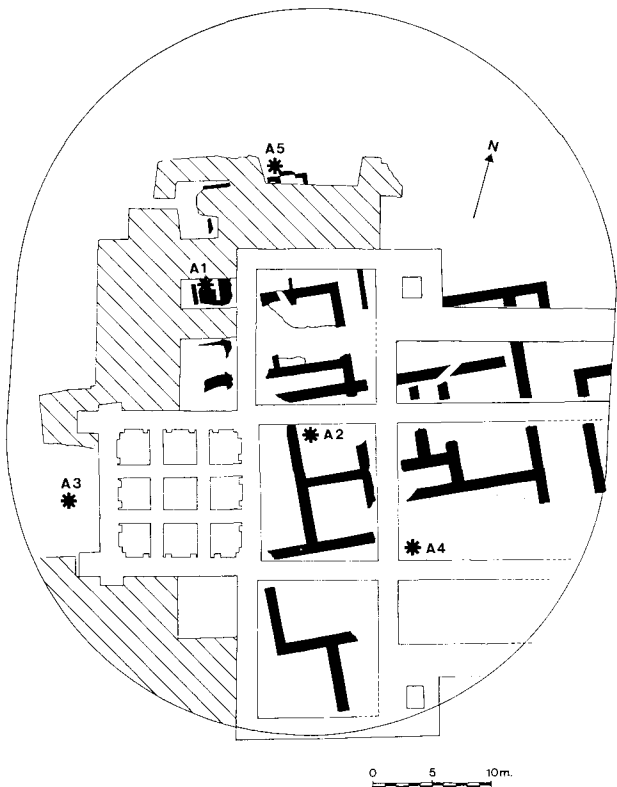


Fig. 146
 Localisation des prélèvements d'échantillons orientés pour l'étude archéomagnétique.

L'inclinaison étant l'élément le moins affecté par les déplacements postérieurs à la dernière cuisson et le moins entaché d'erreurs vu la latitude de l'endroit, nous avons comparé I avec la variation I à Paris donnée dans la figure 145.

Parlons immédiatement de LGA1 : chaque échantillon porte une aimantation stable, mais on trouve des inclinaisons aussi bien positives que négatives et une grande dispersion des déclinaisons, ce qui signifierait que les échantillons ont été déplacés après leur cuisson. Ceci est clair car, lors de la désaimantation, la direction ne change guère. Ce résultat n'est pas étonnant puisque le prélèvement s'est fait en bordure de la structure pour permettre la conservation de celle-ci. Si l'on admet que l'aimantation a été acquise au cours de la période romaine, seuls quatre des échantillons pourraient, avec bien des réserves, être représentatifs du champ de l'époque. Pour les autres prélèvements, on peut proposer des âges possibles à partir des courbes de la variation séculaire du champ géomagnétique établies pour Londres et Paris.

LGA2 : l'incertitude en déclinaison est grande, plusieurs périodes sont « magnétiquement » acceptables : soit vers la moitié du I^{er} siècle, soit au V^e siècle (ce qui paraît le plus probable), soit encore vers la moitié du XVI^e siècle.

LGA3 et LGA4 : les résultats obtenus par ces deux niveaux incendiés tombent en dehors de la courbe de

Paris, mais se trouvent entre 1300 et 1400 sur la courbe de Londres. Les terres cuites de LGA4 pourraient aussi avoir acquis leur aimantation au début ou au milieu du III^e siècle, bien que leur déclinaison soit nettement à l'ouest. Le comportement magnétique de ces deux sites est différent, notamment le taux de viscosité, ce qui n'exclut pas qu'ils puissent être contemporains : ce ne sont pas les mêmes matériaux qui ont été cuits.

LGA5 : la période trouvée se situe depuis la fin du VII^e siècle jusqu'à la fin du IX^e siècle.

Remarquons qu'aucune des couches d'incendie étudiées ne peut être rattachée archéomagnétiquement à l'incendie de 1185.

Bibliographie

- AITKEN, M.J. (1974), *Physics and Archaeology*, Clarendon Press, 291 p.
- FISCHER, R. (1953), Dispersion on a sphere, *Proc. R. Soc. Lond.* 217A, 295-305.
- HEDLEY, I.G. and WAGNER, J.J. (1982), A comparative study of archaeomagnetic secular variation data for Western Europe, *Proceedings of the 22nd symposium on archaeometry*, University of Bradford, Bradford, U.K., march 30th - april 3rd 1982, p. 122-129.
- HEDLEY, I.G., VUAGNAT, P. and WAGNER, J.J. (1984), A cubic smoothing spline fit to Western European archaeomagnetic data, *Terra Cognita. The Journal of the European Union of Geosciences*, Vol. 4, n° 3, p. 361.
- THELLIER, E. (1981), Sur la direction du champ magnétique terrestre, en France, durant les deux derniers millénaires, *Phys. Earth Planet. Inter.* 24, 89-132.

TABLEAU 1

Prélèvement					Résultats					
Nom	Année	Ech.	Nature	Sp.	N	\bar{I}	\bar{D}	k	$\alpha_{95} = \Delta I$	ΔD
LGA1	1977	14	Terre cuite et tuiles	14	(4)	63°00'	-2°00'	221	6,2°	13,7°
LGA2	1978	8	Terre cuite	8	6	67°45'	6°50'	87	7,2°	19,1°
LGA3	1978	8	Terre cuite et pierres	8	7	55°35'	-3°55'	175	4,6°	8,1°
LGA4	1980	19	Terre cuite	30	15	58°50'	-5°05'	906	1,3°	2,5°
LGA5	1981	27	Terre cuite et pierres	27	18	73°45'	5°15'	117	3,2°	11,5°

Ech. : nombre de blocs sur le terrain (« échantillons »)

Sp. : nombre de cubes obtenus

N : nombre d'échantillons retenus