Étude archéomagnétique au Puy d'Issolud Fontaine de Loulié

par Agnès Genevey et Yves Gallet (*)

(*) Institut de Physique du Globe de Paris, laboratoire de paléomagnétisme.

En juin 1999, nous avons échantillonné trois structures (2 sols en argile cuite et un site de pierres calcaire ayant subies l'action du feu) provenant du site archéologique du Puy d'Issolud (commune de Saint Denis-lès-Martel; Lot) connu comme étant l'un des emplacements présumés de la bataille d'Uxellodunum (en 51 avant J.C.). Après une introduction sur les principes de la méthode, nous présentons ici les résultats archéomagnétiques que nous avons obtenus.

Qu'est ce que l'archéomagnétisme?

faire appel aux mesures archéomagnétiques.

Le champ magnétique terrestre (CMT) ressenti en tout point de la Terre est en première approximation de géométrie simple : il est composé à 80% d'un champ dipolaire d'origine interne et est équivalent au champ que créerait un barreau magnétique situé au centre de la terre, incliné d'un angle d'environ 11,5° par rapport à l'axe de rotation de la Terre. En chaque point de la surface de la Terre, ce vecteur champ est décrit complètement par son intensité et par deux angles l'inclinaison (angle entre le vecteur champ et sa projection orthogonale dans le plan horizontal) et la déclinaison (angle entre la projection orthogonale dans le plan horizontal et la direction du nord géographique).

constantes de temps très différentes depuis la seconde jusqu'à la centaine de millions d'années; les variations les plus rapides étant liées aux sources externes du CMT (variations provoquées par l'activité solaire), les variations plus lentes (durée supérieure à l'année) étant d'origine interne. Les variations du champ magnétique observables sur des périodes de temps de l'ordre de quelques dizaines d'années à quelques millénaires constituent la variation séculaire. C'est un phénomène global à l'échelle de la Terre qui dépend du site d'observation. Les variations directionnelles du CMT sont connues pour les siècles récents à Paris, à Londres et à Rome grâce à des mesures directes effectuées dans des observatoires. Pour les périodes plus anciennes, il est nécessaire de

Le champ magnétique présente des variations en direction et en intensité ayant des

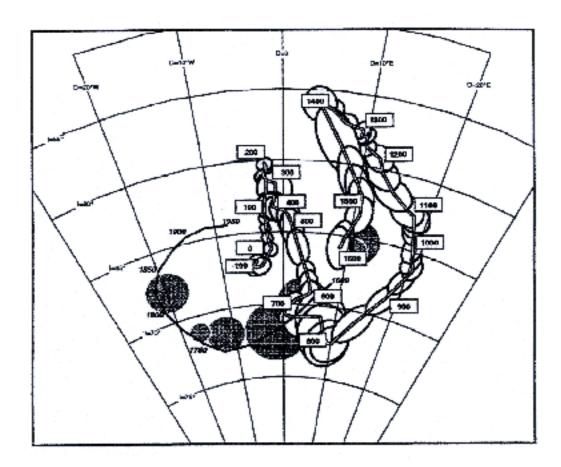
L'archéomagnétisme est une discipline relativement récente (Thellier, 1938) qui repose essentiellement sur l'étude de matériaux archéologiques datés ou non ayant subi au cours de leur histoire une cuisson. En se refroidissant, ces matériaux ont acquis une aimantation dite thermorémanente (ATR) de même direction que celle du champ ancien et d'intensité

proportionnelle à l'intensité de ce même champ. Cette ATR est due à la présence en plus ou moins grande quantité de petits grains magnétiques dans la matrice amagnétique des matériaux. Ces grains s'orientent comme de petits aimants suivant la direction du champ environnant lorsque la température devient inférieure à une température critique dite température de Curie (Tcurie) caractéristique du minéral magnétique considéré. Ces minéraux sont des oxydes de Fer tels que la magnétite Fe_3O_4 (Tcurie = 580^{0} C) ou l'hématite Fe_2O_3 (Tcurie = 680^{0} C). L'ATR acquise ainsi est une aimantation forte et stable sur de longues périodes de temps.

L'étude de structures archéologiques dites "en place" comme les foyers, les fours de potiers ou encore les sols brûlés est susceptible de nous apporter une description complète du champ, c'est à dire à la fois en direction et en intensité. Les structures dites "déplacées" comme par exemple les tessons de poterie ne permettent d'obtenir qu'une information sur l'intensité du CMT puisque l'on ne connaît pas la position dans laquelle ces poteries ont été cuites. Les briques cuites permettent d'accéder la plupart du temps à une information supplémentaire qui est l'inclinaison du CMT (Lanos, 1987).

En étudiant plusieurs structures datées archéologiquement et/ou par des méthodes analytiques (C 14, dendrochronologie, etc...) réparties dans une même région géographique à l'échelle par exemple de la France, il est possible de construire une courbe de variation séculaire du CMT valide pour cette partie du globe. En France, nous disposons grâce à l'ensemble des travaux de Thellier (1981) et de Bucur (1994) d'une courbe des variations directionnelles bien détaillée depuis le 1er siècle avant J.C jusqu'en 1800 (cf. figure 1). Pour les périodes plus anciennes, les données sont actuellement très peu nombreuses. Nous effectuons actuellement des études de sites protohistoriques afin de compléter notre connaissance des variations du CMT en France.

La courbe française qui est certainement la plus précise au monde, peut être utilisée comme un outil de datation pour la pratique archéologique. Dans le cas d'une structure cuite non datée, il est en effet possible de proposer un ou plusieurs intervalles d'âge pour lesquels la direction de l'ATR enregistrée par la structure étudiée est compatible avec un ou plusieurs segments de la courbe de référence. Certaines périodes de l'histoire pour lesquelles les variations directionnelles du CMT en France sont importantes et bien caractéristiques sont plus favorables pour obtenir une datation archéomagnétique précise, c'est le cas notamment du Moyen Age. A l'inverse, certaines périodes se révèlent peu propices comme la période gallo-romaine.



<u>Figure 1</u>: Direction du CMT en France au cours des deux derniers millénaires, données réduites à Paris (Bucur, 1994). Ovales et double ligne, courbe de variation séculaire établie à partir des données archéomagnétiques (1000 avant J.C. - 1600 après J.C.). Ligne simple, courbe de variation séculaire établie à partir des mesures directes (1600 -1900). Cercles gris, cercles de confiance à 95% pour les directions individuelles obtenues sur des structures archéologiques datées entre 1600 et 1900.

Prélèvements au site du Puy d'Issolud et procédure expérimentale

Les 3 structures échantillonnées au site du Puy d'Issolud, appelées UX0l, UX02 et UX03, appartiennent à la butte référencée BU10.

- Les 19 échantillons du site UX0l ont été prélevés dans une couche en argile cuite correspondant à un niveau d'incendie (structure sous l'éboulis nord).
- Le site UX02 est associé à l'éboulis sud constitué de roches calcaires altérées par le feu. Vingt-deux pierres ont ainsi été dégagées.



1999 - Butte BU10, prélèvements pour datation par archéomagnétisme par Yves Galet et Agnès Genevey. UX01, sol gaulois de bataille rubéfié, carré C3

- Le site UX03 correspond au sol gaulois constitué de terre rubéfiée (structure sous l'éboulis nord). Nous avons prélevé 22 échantillons.

Les prélèvements ont été effectués en utilisant la méthode classique dite du « chapeau de plâtre » (par exemple Thellier, 1981). Chaque échantillon a ensuite été préparé au laboratoire afin de pouvoir mesurer leur aimantation rémanente sur l'inductomètre à rotation de Saint Maur adapté à la grande dimension des échantillons.

L'aimantation que l'on cherche à déterminer correspond à l'aimantation thermorémanente acquise lors de la dernière chauffe de la structure étudiée. A cette aimantation primaire est susceptible de s'ajouter une aimantation rémanente parasite d'origine visqueuse (ARV). L'ARV est due à la présence de certains grains magnétiques qui à température ambiante ont tendance à s'aligner progressivement suivant la direction du champ magnétique environnant. L'aimantation rémanente naturelle (ARN) des échantillons est alors la somme vectorielle de l'ATR et de l'ARV acquise depuis la fin de la dernière chauffe. Pour mesurer l'importance relative de l'ARV, on utilise le processus expérimental suivant. Les échantillons sont d'abord placés au laboratoire pendant 15 jours dans la même position que celle qu'ils avaient sur le terrain (il s'agit d'une position dite directe). L'ARN mesurée après ce laps de temps (notée ARN_d) est la somme de l'ATR et de l'ARV acquise pendant 15 jours. Cette ARV est sensée correspondre à l'ARV enregistrée depuis la dernière chauffe subie par les échantillons. Dans un deuxième temps, les échantillons sont retournés puis laissés pendant 15 jours dans cette nouvelle position dite inverse. Au bout de ce nouveau laps de temps, leur ARN est mesurée à nouveau (notée ARN_i) et correspond donc cette fois-ci à la superposition de l'ATR et de l'ARV acquise en position inverse pendant 15 jours. Le calcul du coefficient de traînage v défini pour chaque échantillon par :

 $v=ARN_d-ARN_i/ARN_d+ARN_i$,

permet alors d'estimer dans quelle mesure l'ARV acquise depuis la dernière chauffe a été compensée par l'ARV acquise au laboratoire en position inverse. Lorsque ce paramètre est faible (on se fixe généralement une limite v≤10%), on peut alors retrouver l'ATR suivant :

$ATR = (ARN_d - ARN_i)/2$

Pour traiter l'ensemble des directions obtenues pour un site, on utilise la statistique de Fisher qui est l'adaptation de la statistique gaussienne pour une population de vecteurs distribués sur une sphère. On obtient alors une direction moyenne définie par une déclinaison et une inclinaison. On associe à cette direction une limite de confiance à 95% représentée par l'angle a₉₅% dont la signification est que la direction « vraie » a 95% de chance de se trouver à l'intérieur d'un cône d'angle d'ouverture à 95% définie autour de la direction moyenne calculée.

Résultats obtenus :

Site UX01

Les échantillons de ce site présentent des taux de viscosité faibles (de l'ordre de 2%), aucun échantillon n'est donc éliminé pour le calcul de la moyenne en raison d'une proportion trop importante d'ARV par rapport à l'ATR primaire.

Parmi les 19 échantillons étudiés, 2 échantillons (n° 6 et n°12) ont une direction sensiblement déviante par rapport aux autres directions (cf. figure 2) et sont donc écartées du calcul de la direction moyenne.

Au total 17 échantillons sont ainsi conservés pour le calcul de la direction moyenne. Nous obtenons après réduction à Paris :

Déclinaison = -0.1° Inclinaison = 68.8° $a_{95\%} = 1.6^{\circ}$

Site UX02

Parmi les 20 pierres prélevées, 5 ont une ATR dont la direction est éloignée de celle des autres échantillons (n° 12, 17, 18. 19 et 20 ; cf. figure 3) et sont donc exclues du calcul de la moyenne. Il est à noter que comme pour le site UX0l, aucun échantillon n'est écarté en raison d'un taux de viscosité élevé.

La direction moyenne calculée à Paris avec les 15 échantillons conservés est :

Déclinaison = 7.0° Inclinaison = 64.9° $a_{95\%} = 1.8^{\circ}$

Site UX03

L'ensemble des échantillons est ici conservé. En effet chaque échantillon présente un taux de viscosité inférieur à 10% et les directions des 22 blocs sont bien groupées (cf. figure 4).

La direction moyenne réduite à Paris calculée partir des 22 échantillons est la suivante:

Déclinaison = -1.6° Inclinaison = 67.1° a $_{95}\%$ = 0.8°

Discussion

Comparaison des 3 directions moyennes obtenues

Les 3 structures échantillonnées au site du Puy d'Issolud sont sensées avoir subi l'action du feu au même moment. Leurs directions archéomagnétiques doivent donc être identiques et correspondre à la direction du CMT existant au moment de leur refroidissement. Nous remarquons tout d'abord que les directions moyennes obtenues pour les sites d'argile cuite, soit UX01 et UX03, sont très proches l'une de l'autre. Un test statistique nous permet de conclure qu'à 95% les deux populations de directions individuelles partagent la même direction moyenne. La direction archéomagnétique moyenne obtenue pour le site UX02 est par contre éloignée des deux directions précédentes (cf. figure 5). Cette différence peut s'interpréter de 2 façons différentes : soit

la structure UX02 n'a pas chauffé en même temps que les ensembles UX01 et UX03 (autrement dit les 3 structures ne seraient pas contemporaines), soit cette structure a bougé après son refroidissement. Cette deuxième explication nous semble ici justifiée. Nous remarquons en effet que la distribution des directions individuelles obtenues sur les pierres est très sensiblement allongée (cf. figure 3). Par ailleurs, certaines directions individuelles sont proches de la direction archéomagnétique moyenne des sites UX01 et UX03. Ces observations semblent indiquer que certaines des pierres échantillonnées sont bien restées en place après leur refroidissement tandis que d'autres ont été légèrement basculés après ou durant leur refroidissement. La direction moyenne calculée pour l'ensemble des directions n'a donc que peu d'intérêt. A cause de ces difficultés, aucune datation archéomagnétique ne peut être proposée pour la structure UX02.

Comparaison de directions moyennes des sites UX01 et UX03 avec la courbe de référence française

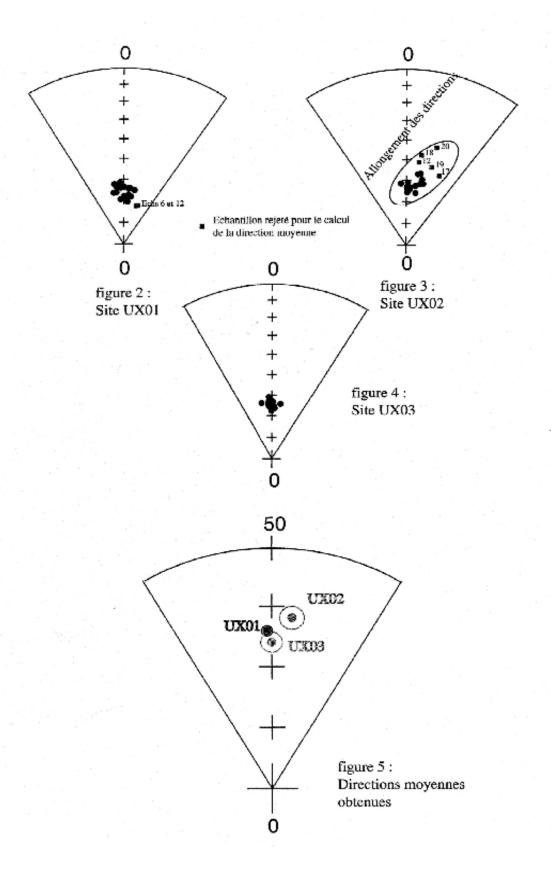
Pour les sites UX0l et UX03, nous avons comparé les 2 directions moyennes obtenues avec la courbe des variations en direction du CMT en France définie jusqu'au premier siècle avant J.C. Cette comparaison est faite en calculant en chaque point de la courbe de référence (tous les points sont espacés de 25 ans) la distance angulaire entre la direction de la courbe en ce point et la direction moyenne du site considéré. Lorsque cette distance angulaire est inférieure à une distance critique, on considère que les 2 directions sont identiques avec un seuil de confiance à 95% (méthode développée par Mc Fadden et Mc Elhinny, 1990). Dans ce cas, l'âge associé au point de la courbe de référence est un âge archéomagnétique pour la structure étudiée.

Les intervalles d'ages possibles pour les sites UX01 et UX03 sont les suivants (cf. figures 6 et 7):

```
UX01 \Rightarrow [-100; -5]; [530; 785]; [1615; 1740]; [1770; 1795]

UX03 \Rightarrow [-100; 10]; [530; 555]
```

Si l'on exclut les solutions tardives, c'est à dire aussi récentes que le sixième siècle, nous pouvons affirmer que les structures UX01 et UX03 présentent des directions archéomagnétiques cohérentes avec le GMT observé en France pendant le premier siècle avant J.C.. il s'agit d'une date « terminale » car nous ne disposons que de très peu d'informations sur la variation séculaire du CMT en Europe de l'ouest pour les périodes plus anciennes. Les quelques données actuellement disponibles en France, en Angleterre et en Italie pour les périodes protohistoriques semblent cependant indiquer des variations directionnelles du CMT de faible amplitude durant les cinq derniers siècle du premier millénaire avant J.-C.. ce qui irait à l'encontre d'une datation archéomagnétique restreinte au premier siècle avant J.C.



INSTITUT DE PHYSIQUE DU GLOBE DE PARIS Laboratoire de Paléomagnétisme et Géodynamique

Site: UX0l - figure 6

-> Type de la structure analysée : couche en argile cuite

-> Jour du prélèvement : 16 juin 1999

-> Nb échantillons prélevés : 19

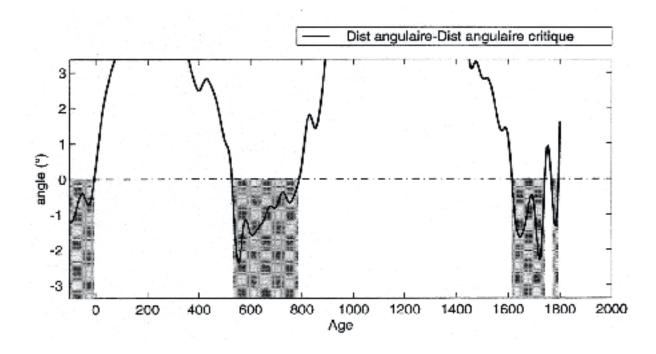
17 échantillons conservés pour le calcul de la moyenne

Moyenne à Paris : Dec = -0.1 Inc = 68.8

Paramètres de FISIIER k = 461.0 95=1.6

INTERVALLE(S) D'AGE POSSIBLE(S): [-100; -5

[530 ; 785 [1615 ; 1740] [1770 ; 1795]

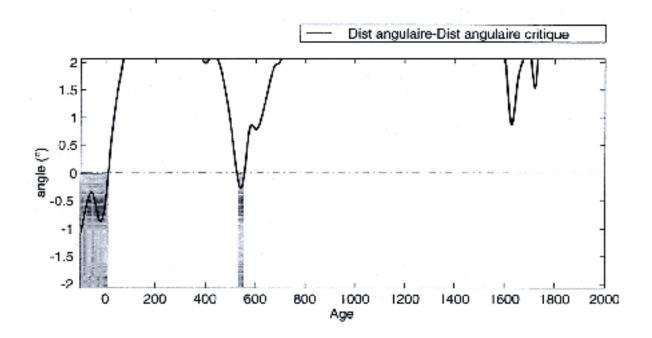


INSTITUT DE PHYSIQUE DU GLOBE DE PARIS Laboratoire de Paléomagnétisme et Géodynamique

Site: UXO3 - figure 7

- -> Type de la structure analysée : sol gaulois constitué de terre rubéfiée
- -> Jour du prélèvement:17 juin 1999
- -> Nb échantillons prélevés : 22
- 22 échantillons conservés pour le calcul de la moyenne

Moyenne à Paris : Dec = -1.6 Inc = 67.1 Paramètres de FISHER k = 1289.0 90=0.



INTERVALLE(S) D'AGE POSSIBLE(S): [-100; 10 [530; 555

Les résultats obtenus au Puy d'Issolud indiquent que l'âge des structures UX01 et UX03 obtenu par archéomagnétisme ne peut pas dépasser le tout début de l'ère chrétienne et est donc compatible avec un incendie dans le contexte de la bataille d'Uxellodunum en 51 av. J.-C.

Références

- I. Bucur, The direction of the terrestrial magnetic fied in France during the last 21 centuries, Phys. Earth Planet. Inter., 87, 95-109, 1994.
- P. Lanos, Archéomagnétisme des matériaux déplacés; application à la datation des matériaux de construction d'argile cuite en archéologie, Thèse, Université de Rennes 1, 317 pp., 1987.
- P. McFadden and M. McElhmnny, classification of the reversal test in paleomagnetism, Geophys. J. Int., 725-729, 1990.
- E. Thellier, Sur l'aimantation des terres cuites et ses applications géophysiques, Thèse de doctorat, Paris, 1938.
- E. Thellier, Sur la direction du champ magnétique terrestre en France durant les deux derniers millénaires, Phys. Earth Planet. Inter., 24:89-132, 1981.