EXEMPLES DE CHRONOLOGIE ARCHÉOMAGNÉTIQUE À MARI/TELL HARIRI

Yves Gallet, Agnès Genevey, Jean-Claude Margueron, Maxime Le Goff, Erwan Thébault, Paolo Matthiae, Pascal Butterlin, Michel Al Maqdissi [1]

Introduction

Cet article, qui fait suite au colloque « Mari, ni Est ni Ouest ? 75 ans de découvertes archéologiques à Tell Hariri » (19-21 octobre 2010, Damas), est l'occasion de faire un bilan encore partiel des recherches en archéomagnétisme que nous effectuons en Syrie depuis près de 10 ans, grâce en particulier au soutien constant de la Délégation Générale des Antiquités et des Musées. Considérant l'aspect historique évoqué par le titre de ce colloque, nous soulignons tout d'abord un parallèle, il est vrai purement anecdotique, entre les recherches archéologiques effectuées à Mari/Tell Hariri et nos études qui relèvent du domaine de l'archéomagnétisme. Les archéologues travaillant au Proche-Orient savent bien que 1933 est une date importante pour Mari, avec la découverte de la première statue et l'implantation des premières fouilles en décembre de cette même année par A. Parrot. L'année 1933 est également marquée par la publication d'un premier article d'E. Thellier [2] dans lequel il est montré que les terres cuites archéologiques peuvent être considérées comme de véritables fossiles du champ magnétique ancien puisque celles-ci gardent en mémoire les caractéristiques du champ magnétique au lieu et au moment de leur (dernière) cuisson. Quatre ans plus tard, E. Thellier publiera un autre article fondamental dans lequel il expose une méthode permettant de retrouver l'intensité du champ magnétique ancien à partir de ces mêmes terres cuites [3]. Cette première méthode sera par la suite affinée progressivement [4]. Nos études en Syrie, qui portent sur les variations de l'intensité du champ magnétique terrestre au Proche-Orient durant les derniers millénaires, découlent donc directement de ces travaux pionniers.

L'archéomagnétisme est une discipline des sciences physiques de la Terre qui permet de retracer, grâce à l'archéologie, l'évolution du champ magnétique durant les périodes archéologiques ou historiques. Elle repose sur l'analyse, au laboratoire, des propriétés magnétiques des terres cuites archéologiques. Les oxydes de fer contenus dans les argiles, comme la magnétite, sont en effet susceptibles

1. Ce projet a été initié et est toujours placé dans le cadre de la Mission Archéologique de Mari. Nous remercions la direction de la DGAM pour sa bienveillance et son soutien constant. Nous sommes également reconnaissants à V. Courtillot et F. Perrier pour leur lecture critique de cet article. Nos travaux ont été financés par l'Institut National des Sciences de l'Univers du CNRS (programmes « Intérieur de la Terre », « Eclipse », « Structure, Evolution et Dynamique de l'Intérieur de la Terre » et « Système Terre : processus et couplage ») et par l'IPGP. Publication de l'IPGP n° 3143.

2. Thellier 1933. Emile Thellier (1904-1987) est considéré aujourd'hui comme l'un des pères fondateurs du paléomagnétisme et de l'archéomagnétisme en particulier. Il a été directeur de l'IPGP (1954-1967). Il a travaillé avec A. Parrot et J. Nougayrol sur la position de cuisson de clous sumériens de terre cuite conservés au Louvre.

3. Thellier 1937.

4. Thellier & Thellier 1959.

d'acquérir une aimantation sous l'action de la chaleur. Cette aimantation, stable dans le temps, est dite « thermorémanente » ; c'est elle qui se comporte comme un témoin du champ magnétique ancien et dont E. Thellier a défini les grandes propriétés d'acquisition [5]. Les objets d'études en archéomagnétisme se rangent en deux grandes catégories : ceux trouvés *in situ* sur le lieu même de leur dernière cuisson, comme les parois de fours (potiers, domestiques, tuiliers, etc.), les foyers ou les sols brûlés, et ceux au contraire déplacés du lieu de leur cuisson originelle, comme les poteries et les terres cuites architecturales (briques ou tuiles). Ils permettent dans le premier cas de retrouver une information portant à la fois sur la direction, définie par une déclinaison et une inclinaison, et l'intensité du champ magnétique, alors que dans le second cas, seule une information sur l'intensité du champ ancien peut être obtenue car la position de cuisson des objets dans le four est généralement inconnue. En Syrie, nous avons focalisé nos recherches sur des objets « déplacés », principalement les briques et les céramiques, trouvés en abondance sur les différents chantiers de fouilles archéologiques ; nous nous intéressons donc aux seules variations de l'intensité du champ magnétique terrestre. Bien que partiel, ce signal géomagnétique apporte néanmoins des indications très importantes sur la dynamique du processus « géodynamo » créé dans le noyau métallique et liquide de la Terre qui génère le champ magnétique observé partout à la surface de notre planète [6]. Dans cet article, nous présenterons l'état de notre connaissance des variations des intensités géomagnétiques en Syrie et plus généralement au Proche-Orient durant les quatre millénaires précédant l'ère chrétienne. Mais, outre l'aspect géophysique, l'objectif de cet article est surtout de souligner que l'histoire du champ magnétique peut d'ores et déjà être utile aux archéologues du Proche-Orient ancien. Les variations de l'intensité du champ magnétique peuvent en effet apporter des éléments originaux de chronologie archéologique dont nous présenterons plusieurs exemples à partir de lots de fragments échantillonnés sur le site de Mari/Tell Hariri.

Mesurer l'intensité du champ magnétique du passé

Le principe des mesures de laboratoire nécessaires à la détermination d'une valeur de l'intensité du champ magnétique ancien est à la fois simple en théorie, mais beaucoup plus compliqué d'un point de vue pratique. Lors de leur fabrication, leur cuisson en l'occurrence, les objets de terre cuite ont acquis une aimantation thermo rémanente dite « naturelle » (ou ARN) et cette aimantation, que l'on mesure au laboratoire, est proportionnelle à l'intensité du champ magnétique ambiant au moment de leur refroidissement. Le but des expériences au laboratoire est ici de détruire progressivement cette aimantation d'origine et de la remplacer par une nouvelle aimantation thermo rémanente acquise dans des conditions de champ connu et contrôlé. Cette aimantation, dite « ATR », est également proportionnelle à l'intensité du champ de laboratoire appliqué. Si le rapport de proportionnalité entre aimantation et intensité reste inchangé, il devient simple d'accéder à l'intensité du champ ancien par la relation suivante :

$$H_{Ancien} = H_{Laboratoire} \cdot M_{ARN}/M_{ATR} \qquad (1)$$

où H_{Ancien} est l'intensité du champ ancien que l'on cherche à déterminer, $H_{Laboratoire}$ le champ de laboratoire appliqué pour remplacer l'aimantation ancienne, M_{ARN} le moment de l'aimantation thermo rémanente d'origine et M_{ATR} le moment de la nouvelle aimantation thermo rémanente acquise au laboratoire. Les travaux d'E. Thellier ont permis de démontrer que cette relation s'appliquait aux aimantations (ARN et ATR) acquises sur une même gamme de températures, qu'elles soient partielles ou totales.

En pratique, la démarche expérimentale est souvent compliquée car chauffer les échantillons pour remplacer l'aimantation ancienne par une nouvelle aimantation de laboratoire peut induire une altération de leur minéralogie magnétique, modifiant ainsi le facteur de proportionnalité entre aimantation et intensité du champ et invalidant de fait la relation (1). Le travail de l'archéomagnéticien est donc de

5. Thellier 1938.
6. Pour une synthèse récente, voir par exemple : Hulot, Finlay, Constable, Olsen & Mandea 2010.

vérifier constamment que les échantillons ne se soient pas altérés lors des expériences de laboratoire. Jusqu'à présent, les mesures de l'intensité du champ magnétique étaient très longues et fastidieuses avec au final beaucoup d'échecs, au pire des résultats très incertains. Pour cette raison, nous avons développé au laboratoire de Paléomagnétisme de l'IPGP un nouveau protocole expérimental qui rend ce type de mesures beaucoup plus simple et plus rapide tout en conservant un excellent contrôle de la qualité des mesures [7]. Ce protocole repose sur l'utilisation d'un nouveau magnétomètre construit au laboratoire, que nous avons appelé Triaxe, et qui intègre à la fois un jeu de bobines de détection (le capteur), un four placé à l'intérieur du capteur, et un ensemble de bobines d'Helmholtz autour de ce capteur. Le Triaxe est un magnétomètre triaxial à échantillon vibrant qui présente l'originalité de mesurer directement à chaud l'aimantation rémanente d'un petit échantillon (1 cm de longueur pour 1 cm de diamètre) de terre cuite ou volcanique. Cette fonction permet ainsi d'effectuer en continu entre deux températures fixées un cycle de mesures comprenant la désaimantation de l'ARN, l'acquisition d'une nouvelle ATR en champ contrôlé et la désaimantation de cette dernière. Très sommairement, notre nouveau protocole expérimental revient à suivre en continu l'évolution de la relation (1) en fonction de la température. La gamme des températures d'analyses est choisie la plus large possible pour impliquer l'essentiel de l'aimantation portée par un échantillon, tout en cherchant à éviter une altération possible à trop haute température. Elle est généralement comprise entre une basse température de l'ordre de 150° C (communément appelée T_1) et une haute température d'environ 500° C (appelée T_2) proche des températures de blocage (ou déblocage) des minéraux magnétiques présents dans les argiles. Si aucune altération minéralogique ne se produit lors du traitement thermique de l'échantillon, on doit logiquement obtenir un ensemble de données à différentes températures entre T_1 et T_2 définissant une constante qui est la valeur du champ ancien fossilisée par l'échantillon [8]. Notons que cette valeur est donnée en micro Tesla (μT).

Dans le cadre de nos études archéomagnétiques en Syrie, nous avons adopté une stratégie d'échantillonnage certes contraignante mais que nous pensons être la plus adaptée pour obtenir des résultats d'intensité géomagnétique (nous parlerons plus loin de résultats ou valeurs « d'archéo-intensité ») fiables. Nous travaillons sur des lots de fragments, généralement une dizaine par lot, pris dans des ensembles archéologiques aussi homogènes que possible. Cet échantillonnage concerne des fragments de différentes briques cuites, provenant notamment de dallages ou de canalisations comme majoritairement à Mari/Tell Hariri ou des tessons de différentes céramiques, comme à Ebla/Tell Mardikh ou encore à Qatna/Tell Mishirfeh. Une valeur d'archéo-intensité est déterminée au laboratoire pour chacun des fragments permettant ensuite de calculer une valeur moyenne d'intensité caractéristique d'un lot, auquel on attribue l'âge donné au contexte en question par les archéologues. Il est à noter que l'homogénéité temporelle des fragments constituant un même lot est ici un paramètre important que l'on peut tester *a posteriori* à partir de la cohérence des valeurs d'intensité individuelles obtenues sur cet ensemble. Si cette hypothèse d'homogénéité est assurément valable pour la plupart des lots de fragments de briques, elle apparaît plus fragile dans le cas de tessons de céramiques dont la forme ou le type n'est pas diagnostique et qui peuvent avoir été déplacés stratigraphiquement, autrement dit « dans le temps », sans que les archéologues puissent l'attester [9]. Notre définition d'un site archéomagnétique prend alors tout son intérêt et une valeur moyenne d'archéo-intensité obtenue à l'échelle d'un lot qui sera définie avec une incertitude trop large (une déviation standard de plus de 10 % de la valeur moyenne associée) sera éliminée. Précisons que dans notre étude la plus récente menée sur des fragments de Qatna/Tell Mishirfeh [10], nous avons effectué des analyses sur plusieurs échantillons pris d'un même fragment afin de déterminer une valeur moyenne d'intensité à l'échelle de ce fragment avant de calculer une « super »

7. Le Goff & Gallet 2004.

8. Le lecteur trouvera une description plus détaillée de la méthode expérimentale utilisée dans les références indiquées aux n. 6 et 9.

9. Voir par exemple une discussion Margueron 1995.

10. Gallet & Al Maqdissi 2010.

moyenne à l'échelle d'un lot de plusieurs fragments. Cette approche optimale, mais lourde, revient donc à tester dans un premier temps la capacité d'un fragment du fait de ses propriétés magnétiques, sans oublier celle du protocole expérimental utilisé, à restituer une valeur cohérente d'intensité puis, dans un deuxième temps, à tester l'homogénéité, notamment temporelle, d'un lot de fragments. Nos multiples analyses nous montrent cependant que munis de critères de sélection qui nous permettent d'éliminer des fragments non adaptés à nos mesures archéomagnétiques [11], les incertitudes dites « expérimentales » de nos valeurs d'archéo-intensité sont le plus souvent dominées par ce deuxième aspect.

Nous avons reporté sur la figure 1 des exemples de résultats d'archéo-intensité obtenus à partir de deux lots échantillonnés à Mari/Tell Hariri [12] (**fig. 1**). Dans les deux cas, chacune des courbes individuelles représente les valeurs d'intensité obtenues pour un fragment au travers d'une large gamme de températures de près de 300° C avec un pas d'analyse d'environ 5° C. Nous pouvons voir que ces points restent similaires sur l'ensemble des températures d'analyse, ce qui témoigne d'une bonne stabilité à la chauffe de la minéralogie magnétique des fragments étudiés. Les données de chaque courbe sont tout d'abord moyennées pour déterminer une valeur d'intensité pour chacun des fragments (*cf.* les valeurs correspondantes en dessous des graphes), permettant ensuite de calculer une valeur moyenne avec sa déviation standard caractéristique des lots. Ce mode de représentation permet ainsi de juger, d'un seul regard à la fois la cohérence des valeurs d'intensité pour chacun des fragments, indicateur en quelque sorte de leur qualité magnétique, et la cohérence du lot analysé.

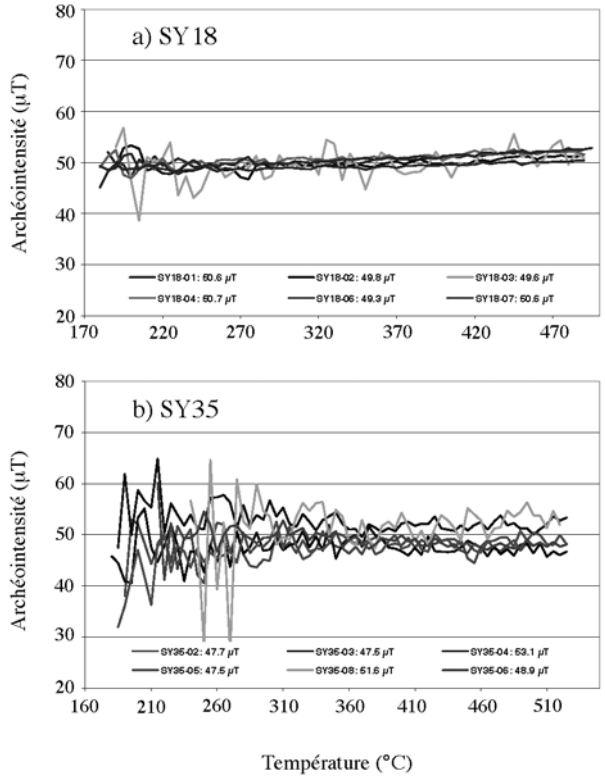

Figure 1. Exemples de résultats d'archéo-intensité obtenus sur deux lots de fragments échantillonnés à Mari/Tell Hariri. Ces résultats ont été déterminés en utilisant le magnétomètre Triaxe développé au laboratoire de Paléomagnétisme de l'IPGP. Chaque courbe représente les données d'intensité obtenues pour un fragment sur une large gamme de température. La dispersion qui apparaît dans certains cas, notamment vers les plus basses températures, vient d'un rapport « signal sur bruit » moins favorable. Ces données sont tout d'abord moyennées afin de calculer une valeur d'intensité caractéristique de chaque fragment (valeur reportée en dessous de chaque diagramme) permettant ensuite de déterminer une valeur moyenne d'intensité pour un ensemble des fragments. (d'après GALLET *et al.* 2008).

11. Voir par exemple GENEVEY, GALLET, ROSEN & LE GOFF 2009.
12. GALLET, LE GOFF, GENEVEY, MARGUERON & MATTHIAE 2008.

LES VARIATIONS DE L'INTENSITÉ DU CHAMP MAGNÉTIQUE TERRESTRE EN SYRIE DURANT LES QUATRE DERNIERS MILLÉNAIRES AVANT J.-C.

Au cours des dernières années, nous avons échantillonné en Syrie plus d'une cinquantaine de lots de fragments datés des quatre derniers millénaires avant J.-C., soit principalement des périodes du Bronze et du Fer. Les sites archéologiques d'où proviennent les lots, ainsi que les archéologues impliqués, sont les suivants : Mari/Tell Hariri (J.-Cl. Margueron, P. Butterlin), Ebla/Tell Mardikh (P. Matthiae, F. Pinnock), Qatna/Tell Mishirfeh (M. Al-Maqdissi, Y. Kanhouch, C. Chabo), Tell Masaikh, Terqa, Tell Mashtale (O. Rouault, M.-G. Masetti-Rouault), Tell Afis (S. Mazzoni, B. Chiti), Mashnaqa (D. Beyer) et Tell Sheikh Hamad (H. Kühne, F. J. Kreppner). Les résultats d'archéo-intensité que nous présentons sur la figure 2 à l'échelle des lots ont pour la plupart déjà fait l'objet de publications [13] (**fig. 2**) mais d'autres résultats plus récents le feront prochainement. Chaque valeur d'archéo-intensité est reportée en considérant la datation archéologique relative fournie par les archéologues en fonction du contexte de fouilles. Le plus généralement, la précision de la datation des lots étudiés est de l'ordre du siècle, parfois moins quand le lot est directement rattaché à un événement historique identifié, par exemple la destruction de Qatna par les troupes de Sargon II d'Assyrie ou la destruction du Palais G d'Ebla par les Akkadiens. Les datations absolues sont ensuite déduites de la chronologie Mésopotamienne dite « moyenne » [14]. Sans ignorer le débat qui existe autour des chronologies haute, moyenne et basse proposées [15], nous soulignons que les incertitudes qui persistent dans ce domaine ne sont pas de nature à modifier sensiblement l'allure de la courbe de variation des intensités géomagnétiques compte tenu de sa résolution temporelle actuelle.

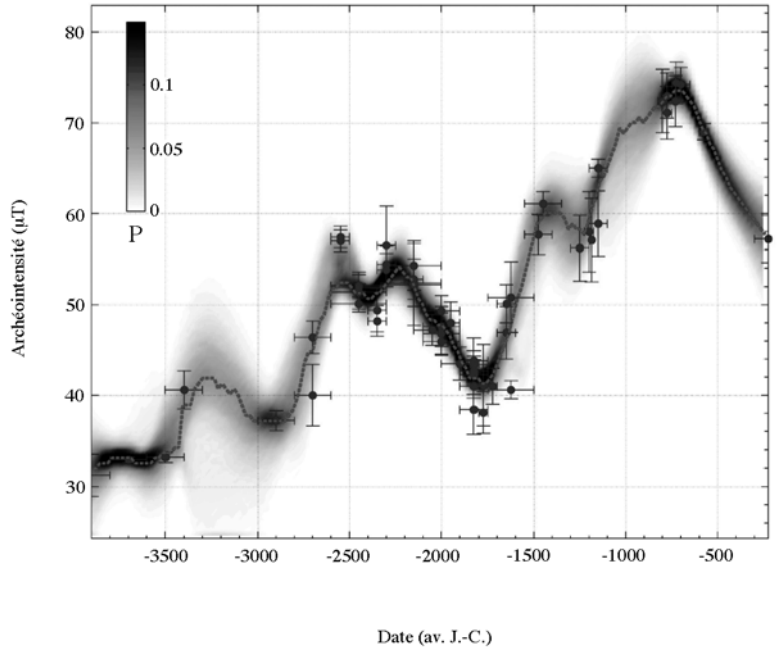

Figure 2. Evolution de l'intensité du champ magnétique terrestre au Proche-Orient au travers des quatre derniers millénaires av. J.-C. Toutes les données, avec leurs barres d'erreur, ont été obtenues en Syrie à partir de l'analyse archéomagnétique de lots de fragments datés par les archéologues (toutes les valeurs ont été transférées à la latitude de Mari/Tell Hariri). Les grisés représentent les densités de probabilité calculées à partir des données d'archéo-intensité selon la méthode développée par THÉBAULT & GALLET 2010 : plus la teinte est sombre, plus l'intensité du champ magnétique est probable à la valeur correspondante. La courbe en pointillés indiquent les maxima de probabilité en fonction du temps.

13. Voir en particulier GENEVEY, GALLET & MARGUERON 2003 ; GALLET, GENEVEY, LE GOFF, FLUTEAU & ESHRAGHI 2006.
14. BRINKMAN 1997.
15. Voir par exemple GASCHE 2003.

Afin de synthétiser ces résultats, nous avons récemment développé un algorithme qui, brièvement, permet grâce à un procédé d'échantillonnage aléatoire des données de représenter de manière probabiliste l'état réel de notre connaissance des variations de l'intensité géomagnétique dans une région donnée [16]. Cette représentation tient compte des incertitudes à la fois temporelles et expérimentales attachées aux données disponibles et permet dans une certaine mesure de minimiser l'effet que pourraient avoir certaines données insuffisamment bien ou mal datées et/ou déterminées. Les résultats de cette méthode sont également reportés sur la figure 2. Les densités de probabilité sont indiquées suivant un code de grisés : plus la teinte est sombre, plus l'intensité du champ magnétique est probable à la valeur correspondante (et inversement) ; les pointillés roses indiquent les maxima de probabilité en fonction du temps.

La figure 2 illustre la variabilité temporelle permanente et importante du champ géomagnétique dans une région donnée. Elle révèle des fluctuations amples de l'intensité magnétique en Syrie, avec les valeurs les plus faibles (~35 μT) vers la première moitié du IV^e^ millénaire av. J.-C. et les plus hautes (~75 μT) au début du I^er^ millénaire av. J.-C., soit une variabilité de plus d'un facteur 2 dans un laps de temps assez court. Il s'agit sans doute de la courbe la mieux documentée au monde, avec un jeu de données homogènes, pour ces périodes anciennes. Malgré les progrès réalisés ces dernières années, sa résolution temporelle reste cependant variable dans le temps avec, en particulier, une information parcellaire au IV^e^ millénaire av. J.-C. La densité de probabilité qui en résulte est faible et étalée, surtout durant la seconde moitié de ce millénaire. La résolution est également faible à la fin du II^e^ millénaire et au I^er^ millénaire av. J.-C. Les données disponibles sont en effet peu réparties dans le temps, étant principalement regroupées dans l'intervalle 750-700 av. J.-C. Il est intéressant de remarquer la très bonne cohérence, vers 70-75 μT, de ces valeurs obtenues à Qatna/Tell Mishirfeh, Tell Afis et Tell Masaikh, ce qui souligne la fiabilité de ces déterminations. On peut par ailleurs noter qu'à la période du Fer II, l'intensité du champ géomagnétique était beaucoup plus élevée que maintenant, celle-ci étant aujourd'hui de ~46 μT à Mari/Tell Hariri, c'est-à-dire environ 40 % moindre. Au travers de l'intervalle de temps étudié, les fluctuations obtenues montrent principalement deux maxima d'intensité, le premier vers le début de la seconde moitié du II^e^ millénaire av. J.-C. et le second au début du I^er^ millénaire av. J.-C. Les données disponibles provenant de Mari/Tell Hariri (Ville II) et d'Ebla/Tell Mardikh pourraient cependant indiquer que le III^e^ millénaire av. J.-C. est en fait marqué par un premier pic d'intensité vers 2500 av. J.-C. et un second vers 2200-2300 av. J.-C. De nouvelles données obtenues à Qatna/Tell Mishirfeh et Ebla/Tell Mardikh suggèrent également la présence d'un autre pic d'intensité de faible amplitude vers le milieu du II^e^ millénaire av. J.-C. [17] Ces variations que l'on peut qualifier de secondaires devront être confirmées par l'acquisition de données additionnelles.

Nous devons mentionner que les grandes lignes des variations décrites ci-dessous se retrouvent dans des enregistrements archéomagnétiques obtenus en Asie centrale et plus récemment dans la région du Levant Sud [18]. Jusqu'à présent, néanmoins, seules nos données permettent de retracer le détail des variations centennales de plus faibles amplitudes, sauf à certaines époques critiques où nos données d'archéo-intensité sont encore trop peu nombreuses. Ce détail est extrêmement important pour au moins deux types d'application : d'une part, pour que la courbe des variations d'intensité géomagnétique puisse être utilisée en archéologie comme outil chronologique, éventuellement de datation et, d'autre part, pour mieux tester l'hypothèse que nous avons émise d'une relation possible entre le comportement du champ magnétique terrestre, sa variation séculaire, et les fluctuations climatiques observées durant l'Holocène [19].

16. Thébault & Gallet 2010.

17. Voir la référence donnée à la n. 9.

18. Nachasova & Burakov 2000 ; Ben-Yosef, Ron, Tauxe, Agnon, Genevey, Levy, Avner & Najjar 2008. ; Ben-Yosef, Tauxe, Levy, Shaar, Ron & Najjar 2009.

19. Voir par exemple Gallet, Genevey & Fluteau 2005 ; Gallet, Genevey, Le Goff, Warmé, Gran-Aymerich & Lefèvre 2009.

DÉROULER LE FIL MAGNÉTIQUE DE L'HISTOIRE : CHRONOLOGIE ARCHÉOMAGNÉTIQUE EN SYRIE

Les archéologues qui fouillent en France font appel de plus en plus fréquemment à l'archéomagnetisme pour dater des restes de fours ou de foyers. Le développement continu de cette méthode de datation vient de la « tradition française » en archéomagnétisme héritée des travaux d'E. Thellier qui nous permet aujourd'hui de disposer d'une courbe de référence précise et datée des variations directionnelles du champ géomagnétique en France au travers des deux derniers millénaires [20]. La corrélation établie selon des critères statistiques d'une direction d'âge inconnu à cette courbe de référence est à la base de toute datation archéomagnétique [21]. Pour les intensités géomagnétiques, l'exercice de datation serait identique si nous disposions également d'une courbe de référence pour ces variations ; ce n'est pas encore le cas malgré des efforts et des progrès récents.

Comme en France, il faudrait certainement plusieurs dizaines d'années d'échantillonnage de fours bien datés et d'analyses archéomagnétiques pour que les variations directionnelles du champ géomagnétique en Syrie deviennent un outil de datation efficace à la disposition des archéologues. A l'inverse, nos travaux permettent désormais d'avoir une bonne idée des fluctuations de l'intensité géomagnétique durant les périodes du Bronze et du Fer. Ces variations peuvent-elles être dès à présent utiles aux archéologues du Proche-Orient ancien ? Pour illustrer ce propos, nous avons choisi de montrer que, grâce à l'archéomagnétisme, l'histoire de la ville d'Ebla telle qu'elle est documentée par ses vestiges de terre cuite pouvait apporter de nouvelles contraintes chronologiques sur l'évolution du Grand Palais Royal (GPR) de la Ville III de Mari.

Nous avons pu échantillonner à Ebla une succession de lots de fragments de céramiques s'échelonnant depuis la destruction de la ville par les troupes Akkadiennes du roi Sargon vers 2300 av. J.-C. (Bronze ancien IVA), jusqu'au Bronze récent, vers 1500 av. J.-C., peu de temps après la destruction d'Ebla par les Hittites du roi Mursuli 1er (vers 1600 av. J.-C.) [22]. Au total, nous avons pu déterminer des valeurs d'archéo-intensité à partir de quatorze lots qui décrivent près de 1 000 ans de l'évolution du champ géomagnétique régional (**fig. 3**). Cette évolution est marquée par une courbe très caractéristique en forme de « V », avec un minimum d'intensité vers 1800-1700 av. J.-C. au Bronze moyen II. Précisons que ce creux est défini par des tessons pris des fameuses tombes dites « de la Princesse et du Seigneur aux capridés ». Entre environ 2300 et 1700 av. J.-C. se produit une décroissance de l'intensité du champ géomagnétique de ~55 μT à ~40 μT, soit une décroissance de ~2.5 μT par siècle. C'est cette évolution que nous allons utiliser ci-dessous pour établir et/ou tester des chronologies archéologiques à Mari puisque la Ville III de Mari/Tell Hariri a existé durant cet intervalle de temps. Le procédé est simple : ceux des lots provenant de la Ville III de Mari qui auraient des valeurs d'intensité les plus élevées seraient plus anciens que ceux qui donneraient des valeurs d'intensité plus faibles. Le Grand Palais Royal fouillé par A. Parrot et J.-Cl. Margueron [23], où nous avons échantillonné plusieurs lots de fragments de briques cuites, se prête tout particulièrement bien à l'application de ce test.

Comme premier exemple, nous considérons un contexte constitué de deux coffres de crapaudine situés de part et d'autre d'une canalisation d'axe nord-sud (**fig. 4a**) [24]. Ces trois ensembles sont en briques cuites. Les deux coffres de crapaudine sont nécessairement plus anciens que la canalisation, cette dernière rendant impossible l'utilisation d'une porte à cet endroit. Pour J.-Cl. Margueron, ils appartiennent à un palais « fantôme », toujours Ville III, qui aurait été presque totalement arasé lors de la construction du GPR. Les valeurs d'archéo-intensité obtenues pour les deux coffres de crapaudine sont statistiquement identiques vers 50 μT, ce qui souligne leur contemporanéité, et ces valeurs

20. Bucur 1996.
21. Le Goff, Gallet, Genevey & Warmé 2002. ; Lanos 2004.
22. Pour une synthèse grand public, Matthiae 1996.
23. Parrot 1958 ; Margueron 2004.
24. Tous les contextes du Grand Palais Royal décrits dans cette partie sont présentés dans Margueron 2004 ; voir n. 21.

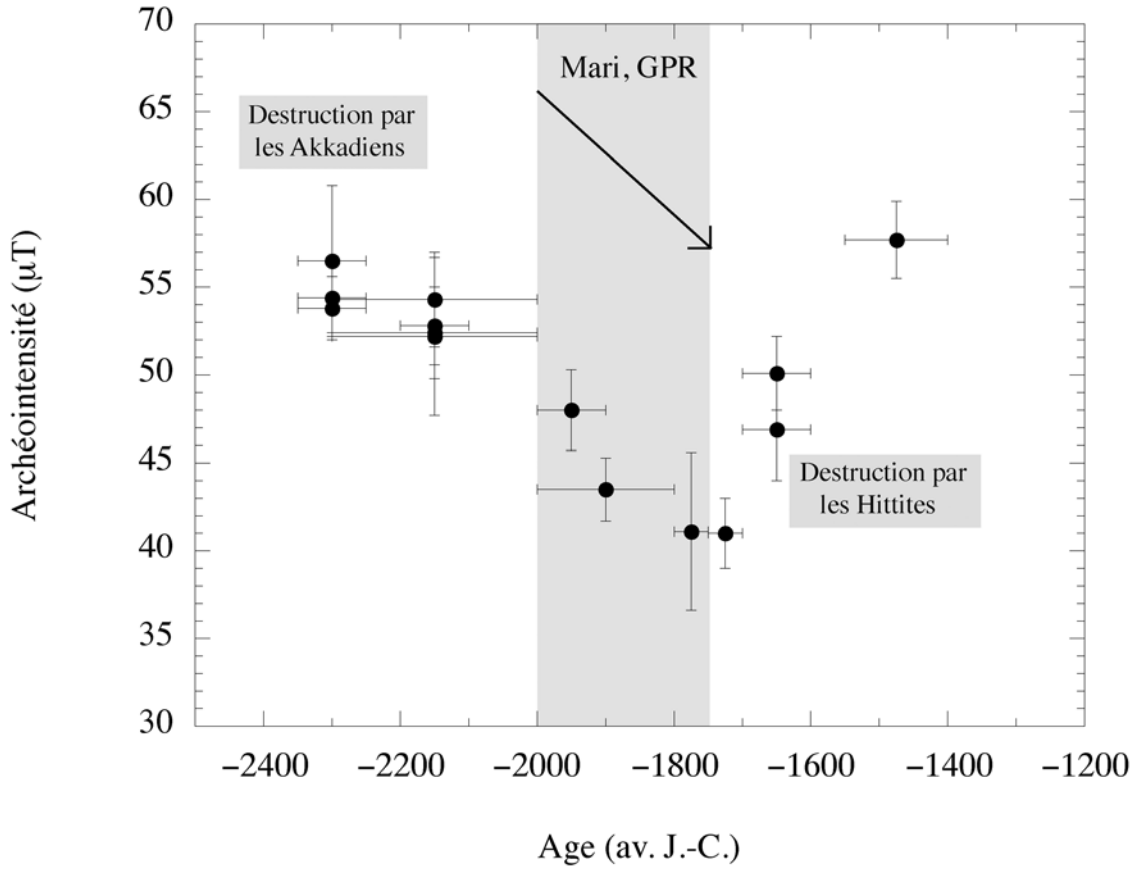

Figure 3. Données d'archéo-intensité obtenues à Ebla. Elles définissent, entre ~2300 et ~1500 av. J.-C., une évolution des intensités géomagnétique très caractéristique avec une forme de « V ». Cette évolution indique que la Ville III de Mari/Tell Hariri a existé pendant une période de décroissance sensible de l'intensité du champ géomagnétique, entre ~50 μT vers 2000 av. J.-C. et ~40 μT vers 1750 av. J.-C.

sont distinctement plus élevées que celle obtenue pour la canalisation (~45 μT). D'un point de vue archéomagnétique seul, les deux coffres de crapaudine sont donc bien sensiblement plus anciens que la canalisation, en plein accord avec les données archéologiques et stratigraphiques. Cette dernière valeur d'intensité proche de 45 μT se retrouve assez fréquemment dans le GPR. Nous présentons deux autres ensembles : une canalisation d'axe Est-Ouest échantillonnée à proximité de la cour 106 (**fig. 5a** et **b**) qui est raccordée à un puisard situé dans le quart nord-est de cette même cour dite « du palmier » et un second ensemble constitué de carreaux de dallage situés à l'ouest de l'entrée de la cour 106 (**fig. 5c**). Nous trouvons des valeurs similaires proches de 45 μT (**fig. 5c**) qui tendent à montrer que les éléments de canalisation et de dallage de la cour 106 ont le même âge, de même que la canalisation précédente située quelques 15 m plus à l'est. Une observation intéressante est que le dallage en briques cuites de la cour 106 ne constitue pas le sol final de cette même cour car il est surmonté d'un niveau plâtré. Une question est donc de savoir si l'on peut trouver, dans le GPR, des valeurs d'intensité sensiblement plus faibles que 45 μT, ce qui témoignerait d'ensembles plus récents, probablement de la phase amorite du palais.

Ce « test dans le test » est effectué grâce à un contexte qui, à lui seul, synthétise l'évolution du champ magnétique durant l'existence du GPR. Cet exemple est constitué de trois ensembles : un coffre de crapaudine comme précédemment accolé et rendu inutilisable par l'implantation de la grande canalisation d'axe nord-sud et une branche est de la canalisation venant se greffer à l'axe nord-sud (**fig. 6a** et **b**). Pour ces trois ensembles, nous trouvons des valeurs d'archéo-intensité bien distinctes (**fig. 6c**) : la valeur la plus élevée (~50 μT) est obtenue sans surprise pour le coffre de crapaudine, ensuite

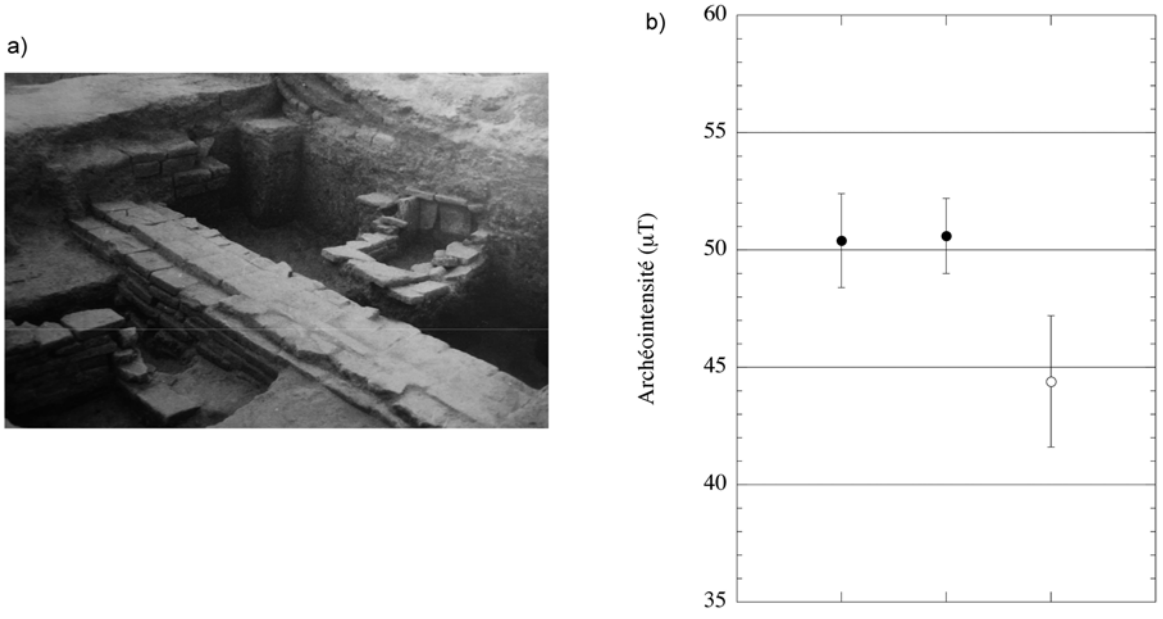

Figure 4. Valeurs d'archéo-intensité obtenues à Mari-Ville III sur deux coffres de crapaudine du Palais Fantôme (fig. 4a, ronds noirs fig. 5b) et pour un segment de canalisation du Grand Palais Royal implanté entre ces coffres (fig. 4a, rond blanc fig. 4b). Sur la base de l'évolution des intensités géomagnétiques présentée en fig. 3, les deux valeurs plus élevées vers 50 μT déterminées pour les coffres de crapaudine indiquent qu'ils sont plus anciens que la canalisation pour laquelle une valeur plus faible (~45 μT) est trouvée. Cette chronologie archéomagnétique est compatible avec les données archéologiques (d'après MARGUERON 2004).

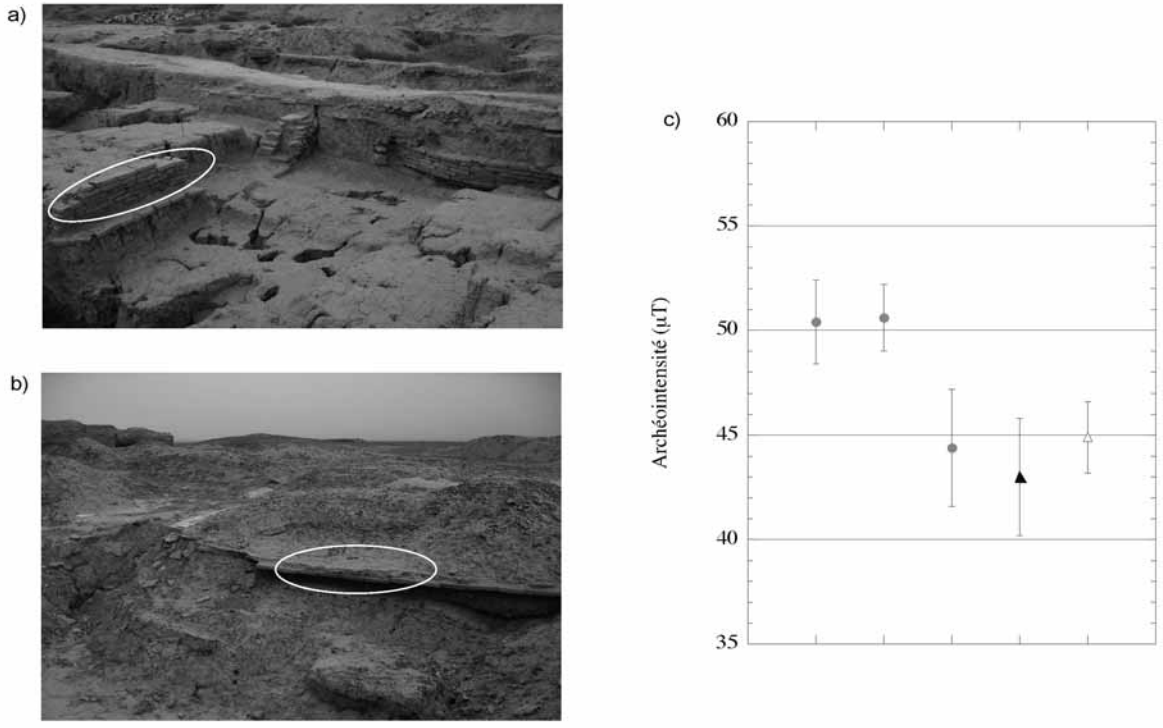

Figure 5. Valeurs d'archéo-intensité obtenues à Mari-Ville III pour un segment de canalisation orienté est-ouest et situé à proximité du quart nord-est de la cour 106 (fig. 5a, triangle noir fig. 5c) et pour des carreaux de dallage encore en place à gauche de l'entrée de cette même cour (fig. 5b, triangle blanc fig. 5c). Les deux valeurs proches de 45 μT sont très similaires. Les deux valeurs reportées sur la fig. 4 sont également indiquées pour comparaison (ronds gris).

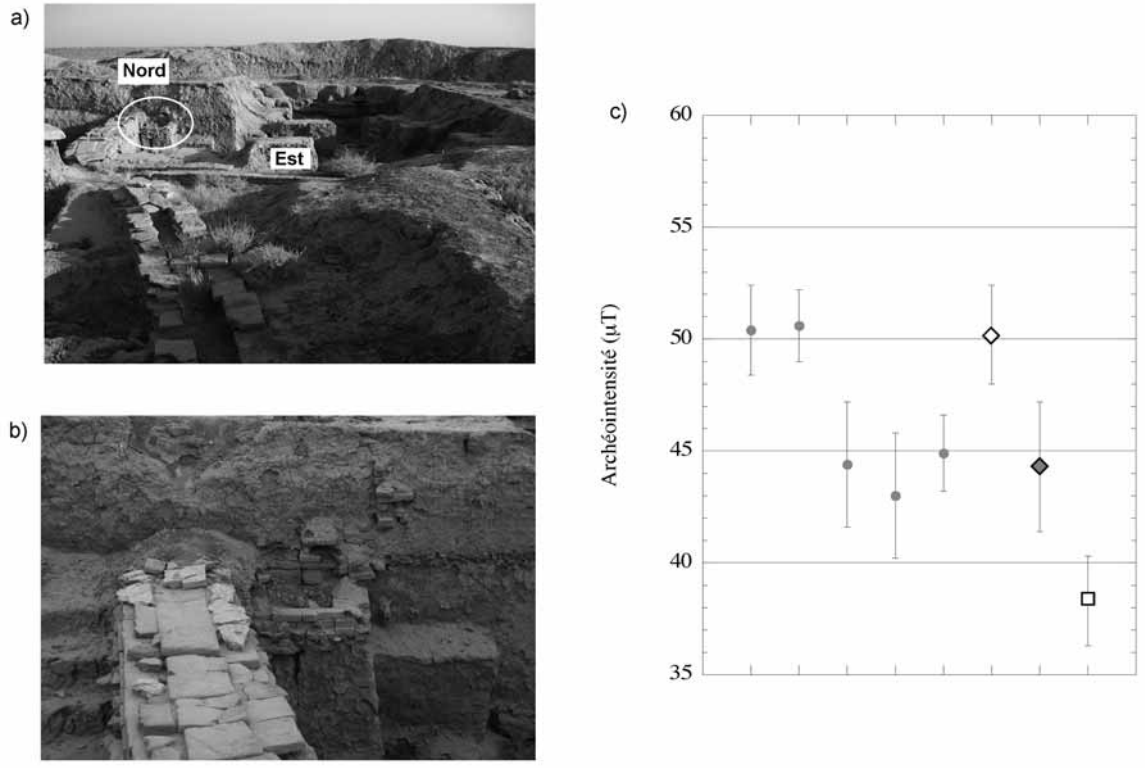

Figure 6. Valeurs d'archéo-intensité obtenues à Mari-Ville III pour un contexte de trois ensembles : un coffre de crapaudine accolé à la branche nord-sud d'une canalisation (fig. 6a et b, losange blanc fig. 6c), la branche nord-sud de la canalisation elle-même (fig. 6a et b, losange gris fig. 6c) et une branche est venant se greffer à la canalisation précédente (fig. 6a, carré blanc fig. 6c). Les trois valeurs sont distinctes et s'échelonnent entre ~50 μT et ~40 μT. Grâce à la tendance de décroissance des intensités géomagnétiques déduite des données obtenues à Ebla (fig. 3), nous pouvons montrer que la branche est de la canalisation est l'élément le plus récent de ce contexte, certainement de la phase amorite de la Ville III, alors que le coffre de crapaudine est l'élément de plus ancien, daté probablement de la phase initiale du Grand Palais Royal. Les valeurs d'archéo-intensité présentées sur les fig. 4 et 5 sont également indiquées (ronds gris).

une valeur intermédiaire, à nouveau proche de 45 μT, déterminée pour l'axe nord-sud de la canalisation et finalement une valeur plus faible, d'environ 40 μT, pour la branche est du système de canalisation. Cette branche est appartiendrait donc à la phase la plus tardive de l'histoire du GPR et de Mari. La figure 6 souligne ainsi trois niveaux d'intensité géomagnétique (au moins) qui sont autant de phases temporelles distinctes dans l'évolution du GPR. L'archéologue demandera sans doute une estimation plus quantitative des âges en question mais si l'exercice est en effet possible, le résultat n'a malheureusement pas la précision espérée. La méthode de datation proprement dite consiste à rechercher les intersections entre les valeurs d'intensité à dater et une courbe de référence, en l'occurrence celle établie à partir des seules données d'Ebla/Tell Mardikh (**fig. 7**). Elle revient à calculer des probabilités conditionnelles dont les maxima indiquent les âges les plus probables compte tenu d'une certaine courbe de référence donnée par une suite temporelle de densités de probabilité, réduite ici entre 2300 et 1700 av. J.-C. Au sens strict, nous obtenons une date la plus probable vers 2000 av. J.-C. pour le coffre de crapaudine, ~1900 pour la canalisation d'axe nord-sud et ~1800 pour la branche est de la canalisation. Si ces dates apparaissent très raisonnables au vu des connaissances archéologiques et historiques sur Mari, l'étalement des probabilités attachées à chaque datation fait que d'autres datations proches sont également possibles. Il est à noter que la datation la plus récente est la mieux contrainte, avec un pic de probabilité plus marqué.

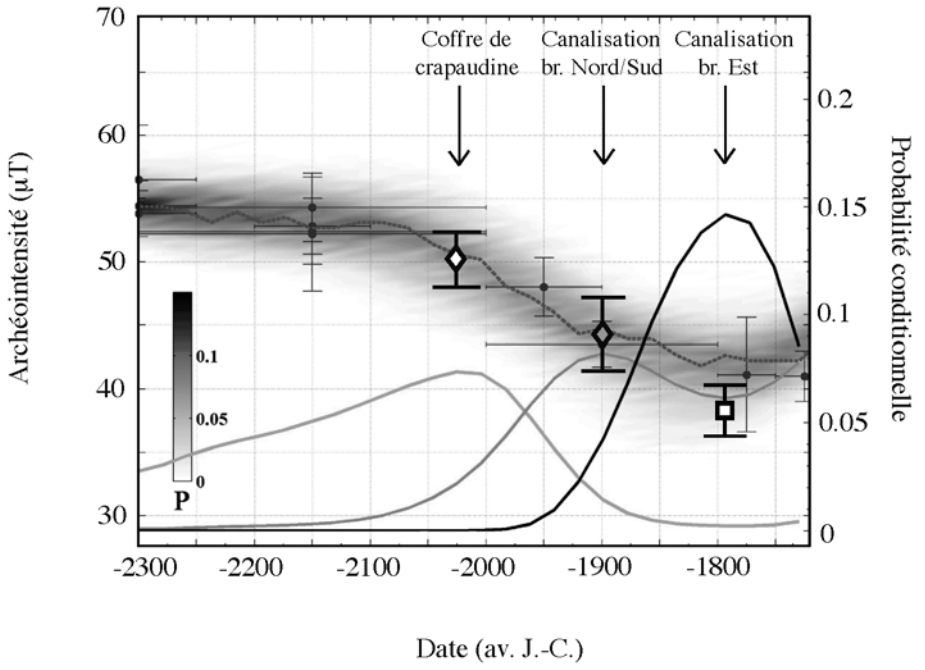

Figure 7. Datation archéomagnétique des trois ensembles présentés sur la fig. 6 (mêmes symboles). Cette datation est faite en comparant les trois valeurs d'archéo-intensité en question à la courbe de référence des variations d'intensité géomagnétique déduite des seules données obtenues à Ebla (fig. 3). La courbe est présentée sous la forme d'une distribution de densités de probabilité en fonction du temps (code de grisés). Nous calculons des probabilités conditionnelles (courbes avec leurs graduations indiquées à droite du diagramme) dont les maxima indiquent les datations les plus probables compte tenu de la courbe de référence utilisée. Ces maxima sont vers 2000 av. J.-C. pour le coffre de crapaudine, vers 1900 av. J.-C. pour la canalisation d'axe nord-sud et vers 1800 av. J.C. pour la branche est de la canalisation. L'étalement des probabilités montre cependant que ces datations sont entachées d'une grande imprécision.

Nous avons choisi de présenter un dernier exemple qui concerne le coffre de crapaudine situé à l'Entrée Nord du GPR (**fig. 8**). Dans ce coffre a été trouvé la crapaudine inscrite au nom du roi (ou gouverneur) Hanun-Dagan de la dynastie Shakkanakku, le constructeur supposé du GPR dont le règne est placé à la fin de la III[e] dynastie d'Ur, vers 2000 av. J.-C. La valeur d'archéo-intensité obtenue pour cet ensemble est typique des valeurs intermédiaires trouvées pour les canalisations et les dalles cuites de la cour 106, donc sensiblement plus faible que le niveau d'intensité attendu pour la phase la plus ancienne retrouvée pour le GPR. Au stade de notre étude, il n'est pas question de discuter dans cet article de la contrainte de datation pour le GPR qu'apporte cette crapaudine cassée et non finie au nom d'Hanun-Dagan [25]. Force est de constater que nos données archéomagnétiques semblent indiquer que cette crapaudine était dans un coffre postérieur au règne de ce roi, peut-être replacée à la suite de travaux de rénovation ou d'aménagement que montre, entre autres, la mise en place d'un grand système de canalisation. Il s'agit d'un élément chronologique nouveau à la disposition des archéologues. D'autres solutions sont certainement possibles qui, nous l'espérons, motiveront la poursuite des analyses archéomagnétiques à Mari/ Tell Hariri.

25. « Si l'on songe à la crapaudine inscrite au nom du Shakkanakku, on peut penser que l'ensemble est resté en place pendant l'histoire du bâtiment ; les modifications importantes n'ont sans doute affecté que l'unité de l'intendant sans pour autant toucher à son principe de base. Cependant l'absence d'inscription sur le cartouche préparé de vingt lignes alors que seul le nom du Shakkanakku a été porté est tout à fait étrange. Il est possible que derrière cette curiosité se profile une situation anormale ; mais il est impossible d'aller plus loin », MARGUERON 2004, p. 372 ; *cf.* n. 22.

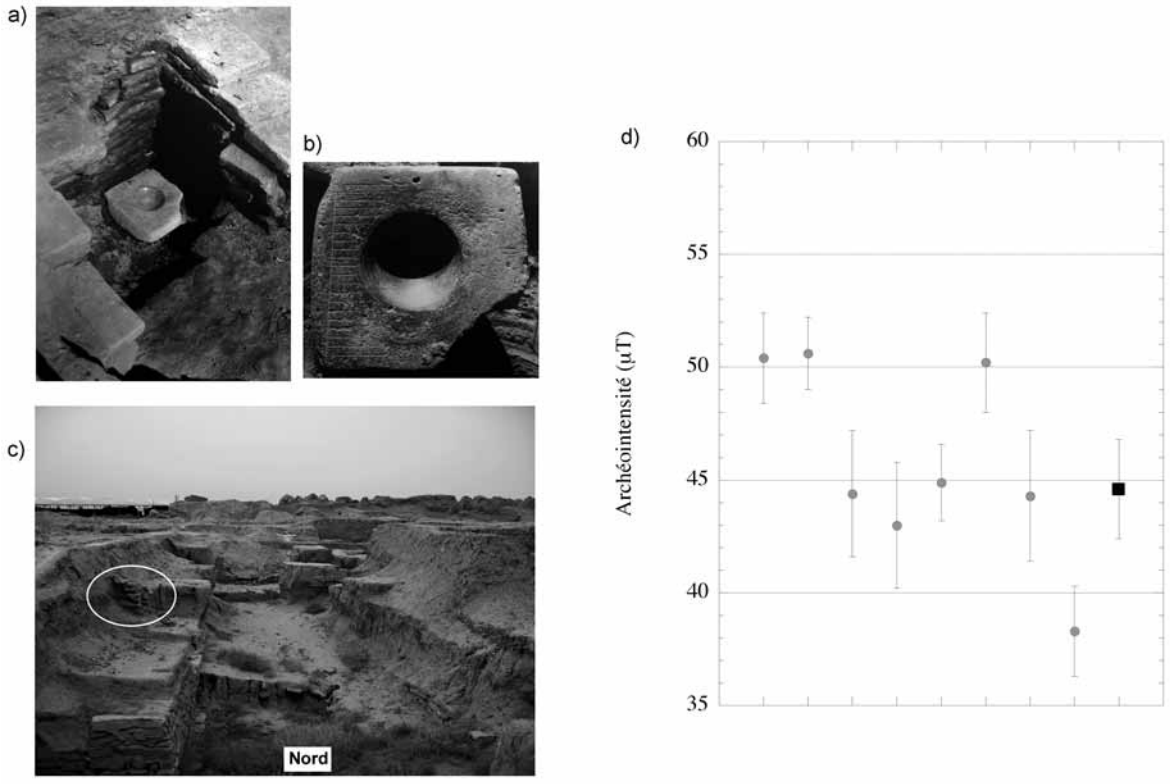

Figure 8. Valeur d'archéo-intensité obtenue à Mari-Ville III sur le coffre de crapaudine où a été trouvée la crapaudine inscrite au nom d'Hanun-Dagan, le constructeur supposé du Grand Palais Royal (fig. 8a-c). La valeur obtenue vers 45 μT (carré noir fig. 8d) ne correspond pas au niveau d'intensité géomagnétique le plus élevé trouvé pour le Grand Palais Royal, ce qui indique, en supposant qu'Hanun-Dagan est bien le constructeur de ce palais, que le coffrage en briques cuites est postérieur à la crapaudine. Comme précédemment, les valeurs d'archéo-intensité présentées sur les fig. 4, 5 et 6 sont également reportées sur cette figure (ronds gris).

Un bilan provisoire

Reconnaissons-le, cet article a été écrit avec un grand plaisir. Depuis l'invitation de J.-Cl. Margueron, en 1998, à venir échantillonner des instantanés du champ magnétique ancien à Mari, nous avons découvert la richesse à laquelle pouvait donner accès une connaissance précise des variations temporelles de l'intensité du champ magnétique terrestre dans une même région. De fait, nous commençons seulement à la percevoir à travers ses applications en géomagnétisme, en archéologie et bientôt, nous l'espérons, pour confirmer l'existence d'un lien entre le champ magnétique et le climat. La richesse archéologique et l'activité des archéologues font de la Syrie un terrain extraordinaire, un véritable laboratoire pour les recherches en archéomagnétisme. Les études effectuées nous ont d'ores et déjà apporté un jeu unique de données d'archéo-intensité pour les périodes du Bronze et du Fer. Ces résultats, datés par les archéologues, montrent des fluctuations fortes et rapides des intensités géomagnétiques qui illustrent clairement la grande variabilité du champ magnétique aux échelles centennale et millénaire dans une région donnée. Il apparaît ainsi que des variations des valeurs d'intensité de l'ordre de 30 à 40 %, voire plus, en quelques siècles traduisent un comportement relativement commun du champ géomagnétique régional. Le défi des prochaines études archéomagnétiques sera d'améliorer si possible la résolution temporelle de ce signal géomagnétique. La courbe actuelle permet en effet de suggérer un signal « secondaire » de faible amplitude. Seule une collaboration accrue avec les archéologues permettra d'analyser des lots de fragments suffisamment bien datés pour attester pleinement de l'existence de ces petites variations. Il s'agira en fait de tester la capacité des techniques expérimentales mises en œuvre en

archéomagnétisme, ainsi que celle des objets d'étude à restituer un enregistrement fidèle et « complet » des variations de l'intensité du champ géomagnétique. Cette capacité est actuellement débattue au sein de la communauté des archéomagnéticiens. Les données que nous présentons dans cet article nous rendent optimistes sur l'issue de cette recherche.

Ce développement ne sera possible que si l'on arrive à convaincre les archéologues que l'archéomagnétisme peut être une discipline utile à l'archéologie du Proche-Orient ancien. Les quelques exemples de chronologie archéomagnétique concernant le Grand Palais Royal de la Ville III de Mari/ Tell Hariri présentés ici viennent illustrer les conditions d'utilisation de la méthode archéométrique que nous construisons au fur et à mesure de l'élaboration d'une courbe fiable des variations de l'intensité géomagnétique. Les possibilités sont sans doute nombreuses, mais il paraît certain que seuls les archéologues pourront, grâce à leur connaissance toujours plus précise de la méthode des archéo-intensités, identifier les meilleurs contextes pour l'appliquer efficacement. C'est l'objectif principal de cet article. Notre espoir est donc que les données d'archéo-intensité syriennes soient enrichies, étendues dans le temps et que la Délégation Générale des Antiquités et des Musées et les archéologues reçoivent prochainement le juste retour de l'aide qu'ils ont accordée jusqu'à présent aux archéomagnéticiens.

Bibliographie

Ben-Yosef (E.), H. Ron, L. Tauxe, A. Agnon, A. Genevey, T. Levy, A. Avner & M. Najjar
2008 « Application of copper slag in geomagnetic archeointensity research », *J. Geophys. Res.*, p. 113, B08101.

Ben-Yosef (E.), L. Tauxe, T. Levy, R. Shaar, H. Ron & M. Najjar
2009 « Geomagnetic intensity spike recorded in High resolution slag deposit in Southern Jordan », *Earth Planet. Sci. Lett.* 287, p. 529-539.

Brinkman (J. A.)
1997 « Mesopotamian chronology of the historical period », Appendix in A. L. Oppenheim, *Ancient Mesopotamia: Portrait of a dead civilization*, Chicago, p. 335-348.

Bucur (I.)
1996 « The direction of the terrestrial magnetic field in France during the last 21 centuries », *Phys. Earth Planet. Inter.* 87, p. 95-109.

Gallet (Y.), A. Genevey & F. Fluteau
2005 « Does Earth's magnetic field secular variation control centennial climate change ? », *Earth Planet. Sci. Lett.* 236, p. 339-347.

Gallet (Y.), A. Genevey, M. Le Goff, F. Fluteau & S. A. Eshraghi
2006 « Possible impact of the Earth's magnetic field on the history of ancient civilizations », *Earth Planet. Sci. Lett.* 246, p. 17-26.

Gallet (Y.), A. Genevey, M. Le Goff, N. Warmé, J. Gran-Aymerich & A. Lefèvre
2009 « On the use of archeology in geomagnetism, and vice-versa: Recent developments in archeomagnetism », *C. R. Physique* 10, p. 630-648.

Gallet (Y.) & M. Al Maqdissi
2010 « Archéomagnétisme à Mishirfeh-Qatna : nouvelles données sur l'évolution de l'intensité du champ magnétique terrestre au Moyen-Orient durant les derniers millénaires », *Akkadica* 131, p. 29-46.

Gallet (Y.), M. Le Goff, A. Genevey, J. Margueron & P. Matthiae
2008 « Geomagnetic field intensity behavior in the Middle East between ~3000 BC and ~1500 BC », *Geophys. Res. Lett.* 35, L02307.

Gasche (H.)
2003 « La fin de la première dynastie de Babylone : une chute difficile », *Akkadica* 124, p. 205-220.

Genevey (A.), Y. Gallet & J. Margueron
2003 « Eight thousand years of geomagnetic field intensity variations in the eastern Mediterranean », *J. Geophys. Res.* 108, 2228.

Genevey (A.), Y. Gallet, J. Rosen & M. Le Goff
2009 « Evidence for rapid geomagnetic field intensity variations in Western Europe over the past 800 years from new French archeointensity data », *Earth Planet. Sci. Lett.* 284, p. 132-143.

Hulot (G.), C. Finlay, C. Constable, N. Olsen & M. Mandea
2010 « The magnetic field of planet Earth », *Space Sci. Rev.* 152, p. 159-222.

Lanos (P.)
2004 « Bayesian inference of calibration curves: applications to archaeomagnetism », C. Buck & A. Millard (éd.), *Tools for constructing chronologies: Crossing disciplinary boundaries* (*Lecture notes in statistics*), Londres, p. 43-82.

LE GOFF (M.) & Y. GALLET
2004 « A new three-axis vibrating sample magnetometer for continuous High-temperature magnetization measurements: applications to paléo- and archeo-intensity determinations », *Earth Planet. Sci. Lett.* 229, p. 31-43.

LE GOFF (M.), Y. GALLET, A. GENEVEY & N. WARMÉ
2002 « On archeomagnetic secular variation curves and archeomagnetic dating », *Phys. Earth Planet. Inter.* 134, p. 203-211.

MARGUERON (J.-Cl.)
2004 *Mari Métropole de l'Euphrate au IIIe et au début du IIe millénaire av. J.-C.*, Paris.

1995 « Tessons et architecture de terre », *Syria* 72, p. 70-103.

MATTHIAE (P.)
1996 *Aux origines de la Syrie, Ebla retrouvée*, Paris.

NACHASOVA (I.) & K. BURAKOV
2000 « The geomagnetic field intensity in central Asia from 6000 to 3000 B.C. », *Izv. Phys. Solid Earth* 36, p. 358-363.

PARROT (A.)
1958 *Mission archéologique de Mari,* II-1 *: Le Palais-Architecture*, Paris.

THÉBAULT (E.) & Y. GALLET
2010 « A bootstrap algorithm for deriving the archeomagnetic field intensity variation curve in the Middle East over the past 4 millennia BC », *Geophys. Res. Lett.* 37, L22303.

THELLIER (E.)
1933 « Aimantation permanente des terres cuites », *C. R. Acad. Sc. Paris* 197, p. 1399-1401.

1937 « Aimantation des terres cuites ; application à la recherche de l'intensité du champ magnétique terrestre dans le passé », *C. R. Acad. Sc. Paris* 204, p. 184-186.

1938 « Sur l'aimantation des terres cuites et ses applications géophysiques », *Ann. Inst. Phys. Globe Paris* 16, p. 157-302.

THELLIER (E.) & O. THELLIER
1959 « Sur l'intensité du champ magnétique terrestre dans le passé historique et archéologique », *Ann. Géophys.* 15, p. 285-376.