

L'activité métallurgique à l'abbaye de Morimond (Haute-Marne) : nouvel éclairage de la fouille à partir de l'analyse archéomagnétique de deux foyers.

New constraints on the metallurgical activity at the Morimond abbey (Haute Marne) from the archeomagnetic analysis of two excavated brick fireplaces

Benoit Rouzeau

Université de Paris 1, LAMOP, UFR 589. benoit.rouzeau@wanadoo.fr

Agnès Genevey

UPMC Univ. Paris 06, Laboratoire d'archéologie moléculaire et structurale, F-75005, Paris, France – CNRS, UMR 8220, F-75005, Paris, France. agnes.genevey@upmc.fr

Yves Gallet

Institut de Physique du Globe de Paris, Sorbonne Paris Cité, Université Paris Diderot, UMR CNRS 7154, Paris, France, gallet@ipggp.fr

Maxime Le Goff

Institut de Physique du Globe de Paris, Sorbonne Paris Cité, Université Paris Diderot, UMR CNRS 7154, Paris, France, legoff@ipggp.fr

datation archéomagnétique, abbaye cistercienne, Morimond, forge

Archeomagnetic dating, Cistercian Abbey, Morimond, Forge
fr

GENER-FRONT

Une étude archéomagnétique à des fins de datation a été menée sur deux foyers en carreaux de terre cuite mis au jour sur le site de l'ancienne abbaye cistercienne de Morimond (Haute-Marne). La désaimantation thermique complète des échantillons prélevés a permis de définir pour chacun des deux foyers une direction archéomagnétique moyenne précise, acquise lors de leur dernière utilisation. Pour dater cet instant, les directions archéomagnétiques ont été comparées à une courbe des variations directionnelles du champ géomagnétique construite à partir de données obtenues en France et dans des pays voisins. Nous obtenons, à 95% de confiance, une datation comprise entre 1585 et 1615 après J.-C. pour le premier foyer et entre 1525 et 1605 après J.-C. pour le second foyer. Bien que leurs deux intervalles d'âge se recouvrent partiellement, les deux directions archéomagnétiques moyennes ne sont pas compatibles à 95% ce qui indique que les arrêts de fonctionnement des deux foyers ne sont pas contemporains. Ces résultats archéomagnétiques confirment deux phases métallurgiques observées indépendamment lors des fouilles. Ils précisent les datations issues des radiocarbone qui ne permettaient pas de discriminer chronologiquement les deux phases. Les datations envisagées se calent avant l'abandon du bâtiment suite à plusieurs saccages évoqués dans les sources écrites.

This paper presents the archeomagnetic dating results obtained from two brick fireplaces excavated inside the ancient Cistercian Abbey of Morimond (Haute-Marne). Complete thermal demagnetization of the collected samples allowed us to define a precise mean archeomagnetic direction acquired during the last cooling of each of the two structures. The dating of the last use of the two fireplaces was derived from the statistical comparison between a reference geomagnetic field directional variation curve constructed using the available French data set together with other data from nearby countries and the two directions obtained in this study. The two dating results lie, with a 95% confidence level, between 1585 and 1615 AD and between 1525 and 1605 AD. Although these dates partially overlap, the two mean archeomagnetic directions are not compatible at the 95% confidence level, indicating a chronology in the abandonment of the two structures. These archeomagnetic results therefore confirm the existence of two metallurgical phases, which were independently observed during the excavations. They further refine the radiocarbon dating unable to discriminate the two phases. The two time intervals defined by archeomagnetism pre-date the abandonment of the building due to severe damages mentioned in written sources.

Nous remercions le Service Régional de l'Archéologie de Champagne-Ardenne pour son soutien lors des différentes campagnes de prélèvement sur le site ; ainsi que les relecteurs pour leurs suggestions et commentaires qui ont permis d'améliorer le manuscrit.

GENER-BODY

L'activité métallurgique à l'abbaye de Morimond (Haute-Marne) : nouvel éclairage de la fouille à partir de l'analyse archéomagnétique de deux foyers.

New constraints on the metallurgical activity at the Morimond abbey (Haute Marne) from the archeomagnetic analysis of two excavated brick fireplaces

Benoit ROUZEAU^a, Agnès GENEVEY^b, Yves GALLET^c et Maxime LE GOFF^d

^a Université de Paris 1, LAMOP, UMR 8589, benoit.rouzeau@wanadoo.fr

^b UPMC Univ. Paris 06, Laboratoire d'archéologie moléculaire et structurale, F-75005, Paris, France – CNRS, UMR 8220, F-75005, Paris, France. (agnes.genevey@upmc.fr)

^c Institut de Physique du Globe de Paris, Sorbonne Paris Cité, Université Paris Diderot, UMR CNRS 7154, Paris, France. (gallet@ipgp.fr)

^d Institut de Physique du Globe de Paris, Sorbonne Paris Cité, Université Paris Diderot, UMR CNRS 7154, Paris, France. (legoff@ipgp.fr)

Mots clés : datation archéomagnétique, abbaye cistercienne, Morimond, forge

Key words : Archeomagnetic dating, Cistercian Abbey, Morimond, Forge



Introduction

L'abbaye cistercienne de Morimond (Haute-Marne) a connu une occupation monastique de 1117 AD jusqu'à la Révolution française. Des fouilles programmées réalisées entre 2004 et 2012 ont mis au jour un ensemble de bâtiments liés au quartier d'accueil de l'abbaye (Flammarion *et al.*, 2010, fig. 1a). Dans cette zone de l'enclos monastique des constructions se sont échelonnées du XII^e au XV^e siècle. A cette date, l'ensemble est en grande partie abandonné et le bâtiment le plus ancien est transformé en bâtiment à vocation utilitaire. Une forge est notamment implantée dans sa partie ouest avec deux foyers associés à cette activité.

Une étude archéomagnétique a été réalisée sur ces deux foyers avec l'objectif d'apporter des contraintes sur l'âge de leur dernière utilisation, avec des questions sur la contemporanéité de l'arrêt des deux foyers et sur la fin de l'activité de forge sur le site. Les résultats des analyses et leurs implications pour le site sont présentés dans cet article.

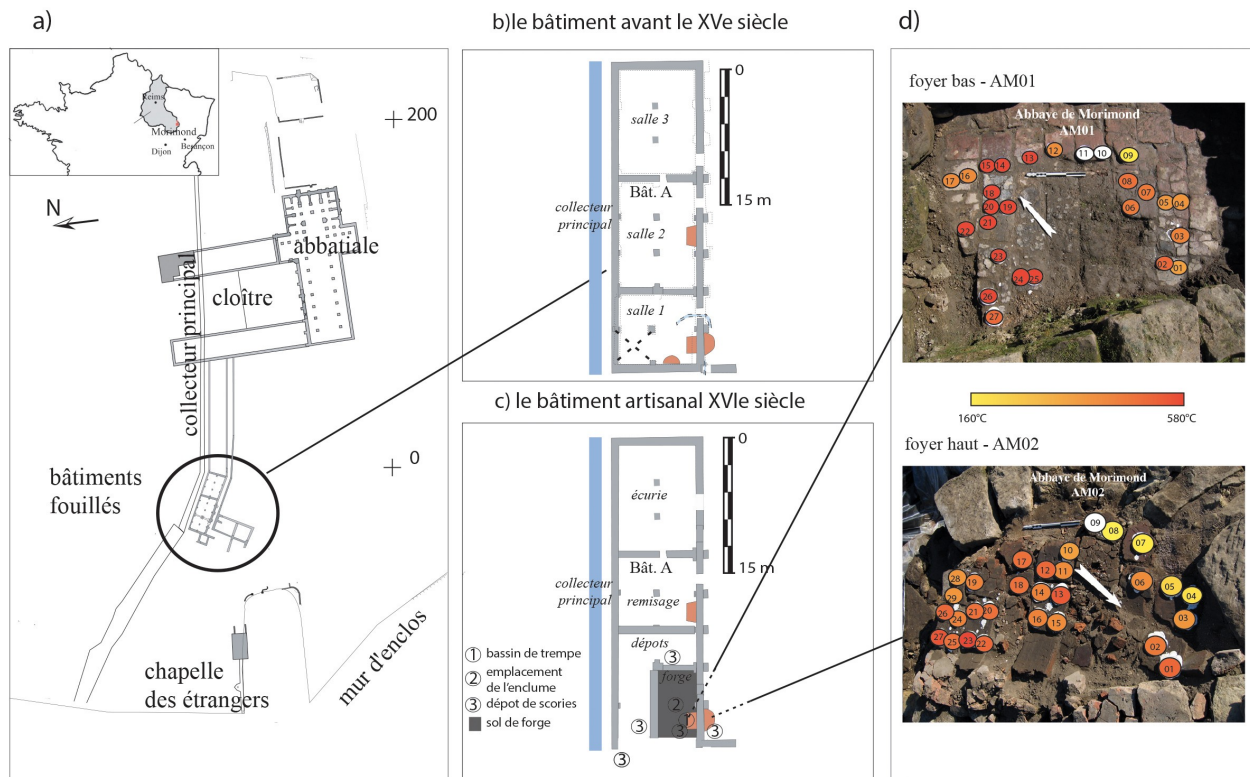


Contexte archéologique et chronologique

Le bâtiment d'accueil construit à la fin du XII^e siècle, se transforme au cours du XIII^e et du XIV^e siècle. La salle 1 du bâtiment se voit dotée de deux nouveaux foyers, en plus de la cheminée existant dès l'origine, dont un à l'extérieur en hémicycle, vraisemblablement un four à pain dans l'axe de la cheminée principale de la pièce (fig. 1b). Cette salle fonctionne vraisemblablement comme une cuisine.

Figure 1 : Localisation de la fouille (a), du bâtiment médiéval (b) et de la forge (c) réutilisant les soles de cheminées et échantillonnage archéomagnétique des foyers (d) bas, identifiant archéomagnétique : AM01 et haut, identifiant archéomagnétique : AM02. La flèche blanche indique la direction du nord magnétique. Longueur de la règle : 30cm. Le code de couleur sur chaque chapeau de plâtre indique la température maximale de la composante de basse température de déblocage (en blanc, les échantillons pour lesquels aucune composante de basse température n'a été isolée).

Figure 1. Localisation de l'excavation (a), bâtiment médiéval (b), et de la forge (c) qui ré-utilise le plancher de deux cheminées. (d) Archéomagnétique des foyers, "low" (site archéomagnétique AM01) et "high" (site archéomagnétique AM02). La flèche blanche indique la direction du nord magnétique. Longueur de la diapositive : 30 cm. Le code couleur indique la température maximale du composant de magnétisation à basse température (en blanc, les fragments pour lesquels aucun composant de magnétisation à basse température n'a été isolé)



À la fin du xv^e siècle, les bâtiments du quartier des hôtes devenus sans objet sont transformés. Celui étudié évolue en bâtiment artisanal, après l'effondrement d'une partie du mur gouttereau nord, l'espace est remanié et séparé en trois nouvelles pièces (fig. 1c). Dans la pièce ouest (salle 1). Une forge de réparation et d'élaboration d'objets métalliques en fer est installée. Pour cela, la porte d'entrée de la salle 1 est murée tandis que le mur pignon est abattu pour faciliter la circulation dans l'atelier. En fait la forge s'implante uniquement dans la nef sud de la salle 1 (fig. 1c). La nef nord augmentée d'une travée supplémentaire prise sur la salle 2 est plus utilisée comme zone de dépôts de scories. Cela amène la surface utile de l'atelier à 5 m de large sur 10 m de long environ, soit 50 m². Cette surface semble assez cohérente avec les forges mises au jour par l'archéologie, principalement en contexte monastique ou d'exploitation minière (Rouzeau, 2008). Cette installation réutilise deux des trois anciens foyers construits en carreaux de terre cuite quadrangulaires.

L'activité artisanale a produit des artefacts qui ont aisément permis de les associer à un travail de forge d'élaboration et de réparation de petits objets métalliques. La fouille a permis de conclure que deux sols de forge distincts, remplis de battitures, de charbons de bois et de scories, se sont succédés. Une couche de remblai sépare les deux niveaux métallurgiques qui s'organisent l'un au dessus de l'autre, autour des deux foyers de forge principaux. La salle de forge (fig. 1c) s'organise autour d'un bassin de trempe (un ancien bénitier en réemploi) et d'une enclume, dont seul le négatif du trou de fixation dans le sol subsistait au centre de la forge. Ces deux emplacements sont situés à proximité immédiate des foyers et permettaient au forgeron de

travailler sans trop de déplacement (fig. 1c). Le foyer bas est en connexion stratigraphique avec le sol de forge le plus récent (le plus haut). Le foyer haut n'a pas de connexion stratigraphique avec le sol de forge, du fait même de sa position élevée (40 cm au dessus du niveau du sol).

Au moins cinq dépôts de scories produits par les deux installations ont été identifiés, amenant le total des découvertes à environ 250 kg. On trouve peu de ce mobilier dans le sol de forge et autour des foyers, ces derniers étant régulièrement nettoyés, pour faire de la place. La plupart des dépôts sont déposés autour de la pièce de forge et principalement à l'ouest (fig. 1c). La fouille a aussi montré que ces foyers avaient conservé un conduit de cheminée circulaire fait de pierre en grès pour faciliter le tirage, sans que l'on puisse mettre en évidence avec précision la position de la structure soutenant le ou les soufflets. Il est possible que ces deux foyers aient fonctionné en même temps, de part et d'autre du mur, le tirage étant assuré par une même cheminée, mais la fouille n'a pas permis de le prouver avec certitude.

Huit datations par radiocarbone ont été effectuées sur des charbons piégés dans les deux sols de forges, dans deux dépôts de scories extérieurs au bâtiment et dans les deux foyers. Pour le foyer bas, les prélèvements ont été faits dans le niveau qui semble être associé à la dernière phase métallurgique, en lien stratigraphique avec le sol de forge le plus récent, l'enclume et le bassin de trempe. L'ensemble des datations indiquent néanmoins une même période assez longue d'activité métallurgique entre le milieu du xv^e et le milieu du xvii^e siècle. Ces analyses ne permettent donc pas de détecter une phase plus ancienne ou plus récente entre les différents sols, foyers et autres dépôts échantillonnés (Rouzeau *et al.*, 2006)¹.

Il convenait donc d'essayer de préciser la chronologie de cette activité artisanale, établie par les datations radiocarbones, la stratigraphie de la fouille et le témoignage des sources écrites qui indiquent une destruction définitive du bâtiment par les moines eux-mêmes à l'extrême fin du xvii^e siècle ou dans la première décennie du xviii^e siècle ; par l'apport de l'archéomagnétisme.

3. Méthodes

Nous rappelons brièvement qu'une datation archéomagnétique repose sur la comparaison entre une courbe de référence des variations en direction et/ou en intensité du champ magnétique terrestre (CMT) établie pour une région donnée et les caractéristiques (direction et/ou intensité) du signal magnétique enregistré par la structure à dater au moment du refroidissement consécutif à sa dernière chauffe (Thellier, 1981 ; Le Goff *et al.*, 2002 ; Lanos, 2004). Ce signal consiste en une aimantation thermorémanente (ATR) portée par des minéraux magnétiques, le plus souvent de la famille de la magnétite ou de l'hématite, présents dans la matrice argileuse. La direction de l'ATR est parallèle à la direction du champ géomagnétique ambiant au moment du

¹ Les datations radiocarbones ont été réalisées à l'Université de Groningen en 2004, 2005, 2006 et 2007.

Morimond 52377001-C35 us1067 : 345+/-20BP (95.4%) (1470AD-1640AD) sol de forge supérieur

Morimond 52377001-C58 us1067 : 390+/-25BP (95.4%) (1440AD (75,6%) 1530AD ; 1580AD (19,8%) 1630AD) sol de forge supérieur

Morimond 52377001-Us1153 : 355+/-30BP (95.4%) (1450AD-1640AD) sol de forge inférieur

Morimond 52377001-Us1053 : 310+/-30BP (95.4%) (1480AD-1650AD) dépôt scories foyer haut

Morimond 52377001-G36 : 335+/-20BP (95.4%) (1480AD-1640AD) dépôt de scories foyer bas

Morimond 52377001-F26 : 380+/-20BP (95.4%) (1440AD (70,0%) 1530AD ; 1580AD (25,4%) 1630AD) dépôt de scories foyer bas

Morimond 52377001-N15 us1091: 300+/-30BP (95.4%) (1490AD-1660AD) dépôt de scories ouest

Morimond 52377001-N42 us1091 : 360+/-30BP (95.4%) (1450AD (44,9%) 1530AD ; 1540AD (50,5%) 1640AD) dépôt de scories ouest

refroidissement et son intensité est proportionnelle à l'intensité de ce même champ (par exemple Dunlop et Özdemir, 1997).

En France, au delà de la période documentée par les mesures directes instrumentales des directions géomagnétiques, c'est à dire au delà des trois derniers siècles environ, nous disposons d'une courbe précise et fiable des variations directionnelles du champ géomagnétique reposant sur l'analyse de nombreuses structures cuites datées (Thellier, 1981 ; Bucur, 1994). Cette courbe remonte désormais jusqu'au premier millénaire avant notre ère (Gallet *et al.*, 2002 ; Hervé *et al.*, 2013) et elle est aujourd'hui couramment utilisée comme outil de datation notamment pour des structures cuites de la période du haut Moyen Âge.

La résolution de cette courbe n'est cependant pas la même pour toutes les époques avec par exemple, et malgré des progrès récents (Hervé *et al.*, 2013), encore peu de résultats datés du premier millénaire avant notre ère. La période charnière précédant les premières mesures directes en déclinaison est également peu documentée avec relativement peu de données obtenues en France datées des ^{xv}^e et ^{xvi}^e siècles. Cette période correspond à celle de la fin présumée de l'activité de forge sur le site de l'Abbaye de Morimond. Pour cette étude, comme nous le détaillerons plus bas, nous pouvons cependant nous appuyer sur d'autres données directionnelles acquises dans des pays voisins et respectant des critères de qualité pour détailler davantage la courbe de référence et être en mesure de proposer une datation archéomagnétique pour les deux foyers échantillonnés.

Ces deux foyers, de forme respectivement rectangulaire et semi-circulaire, étaient constitués de plusieurs carreaux plus ou moins fracturés (fig. 1d).

Ces carreaux ont été prélevés en utilisant la technique dite du chapeau de plâtre permettant leur orientation in situ par rapport au nord géographique (Thellier, 1981). Dix-sept carreaux différents, portant au total 27 chapeaux de plâtre, ont été prélevés au niveau du foyer bas (identifiant archéomagnétique : AM01) et 29 chapeaux de plâtre pour 14 carreaux différents pour le foyer haut (identifiant archéomagnétique : AM02 ; fig. 1d). Au laboratoire ces carreaux ont été sciés de façon à dégager un large fragment pour chaque chapeau de plâtre. Chaque fragment a ensuite été placé dans des moules cubiques de 12 cm de côté et noyé dans du plâtre afin d'obtenir des échantillons de taille standard adaptés à leur mesure sur l'inductomètre à rotation du laboratoire de Paléomagnétisme de l'Institut de Physique du Globe de Paris (à Saint-Maur).

Le signal que nous cherchons à retrouver par les analyses archéomagnétiques est la direction de l'ATR acquise par les carreaux en place au moment de leur dernière chauffe. Cette ATR correspond à une aimantation secondaire car elle est venue remplacer totalement ou partiellement, en fonction des températures atteintes dans chacun des deux foyers, l'ATR originale (ou primaire) acquise par ces mêmes carreaux durant leur fabrication. L'aimantation rémanente naturelle (ARN) des échantillons étudiés est donc susceptible d'être la superposition d'au moins deux composantes d'aimantation thermorémanente dont la proportion respective dépend principalement de la température de chauffe atteinte par chaque carreau des foyers et dans une moindre mesure des caractéristiques des minéraux magnétiques présents dans l'argile.

Une première série de mesures directionnelles effectuées sur les gros blocs a souligné pour les deux foyers une large dispersion des ARN reflétant probablement la superposition de plusieurs composantes d'aimantation de directions différentes.

Pour retrouver l'histoire thermique de ces carreaux et déterminer la direction des composantes successives d'aimantation, nous avons entrepris de les désaimanter via des chauffes répétées par paliers croissants de température. Ces chauffes permettent en effet de détruire progressivement l'ARN et d'isoler ainsi les différentes composantes d'aimantation. Cette désaimantation ne pouvait pas être effectuée directement sur les gros blocs car d'une part, nous ne disposons pas au

laboratoire d'un four de taille suffisante et d'autre part, le plâtre qui englobe ces gros échantillons ne résistent pas au delà d'une température de 250-300°C ce qui ne permet pas d'effectuer une désaimantation totale (jusqu'à environ 600°C). A partir de chaque gros bloc, nous avons donc préparé au laboratoire un petit échantillon cubique d'1cm de côté, orienté précisément suivant les axes du bloc correspondant.

Les échantillons cubiques ont été analysés au laboratoire de Paléomagnétisme de l'Institut de Physique du Globe de Paris à Jussieu. Ils ont été désaimantés par paliers de température de 30°C entre 100°C et 160°C puis de 20°C entre 160°C et 580°C. Leur aimantation a été mesurée à température ambiante après chaque chauffe et refroidissement à l'aide d'un magnétomètre cryogénique 2G à accès horizontal.

L'anisotropie d'ATR des échantillons a été de plus déterminée en cours de désaimantation à 460°C à partir de l'acquisition et de la mesure successive d'une ATR partiellement acquise au laboratoire dans 6 directions différentes (x, -x, y, -y, z, -z). Cette anisotropie est liée à des alignements préférentiels des minéraux magnétiques et trouve son origine dans l'étirement de la pâte argileuse au moment du façonnage des carreaux. Elle se traduit par une déviation plus ou moins importante de la direction de l'ATR enregistrée lors du refroidissement dans un plan dit de facile aimantation qui est le plus souvent confondu avec le plan d'étirement de l'argile (Aitken *et al.*, 1981).

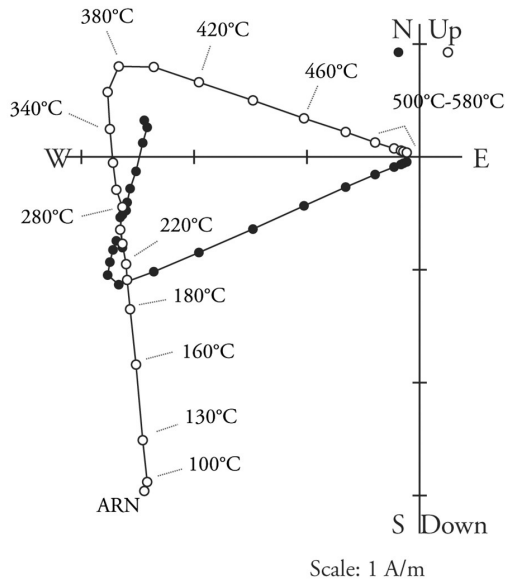
4. Résultats

Le traitement par désaimantation thermique permet de distinguer  la majorité des échantillons deux composantes d'aimantation de directions différentes (fig. 2a,c,d). La première composante de basse température de déblocage est le plus souvent isolée entre 100°C et 320°C-420°C (figs. 2a,d ; Tableaux 1 et 2). Cette composante correspond à l'ATR acquise par les carreaux en place dans le foyer, c'est à dire lors de l'activité de la forge. Pour quelques échantillons, cette composante est observée sur un intervalle de température plus réduit entre 100°C et ~200°C (fig. 2c), indiquant par la même des températures de recuisson moins élevées, au moins pour la zone du carreau d'où provient le cube. Au delà de ces températures de recuisson, une seconde composante de haute température de déblocage est alors isolée jusqu'à ~580°C. Cette composante haute température (HT) est cependant observée pour la plupart des échantillons au delà de 380°C. Elle correspond à l'ATR acquise par les carreaux lors de leur fabrication. Enfin notons que certains échantillons ne présentent qu'une seule composante d'aimantation sur toute la gamme de température d'analyse (fig. 2b).

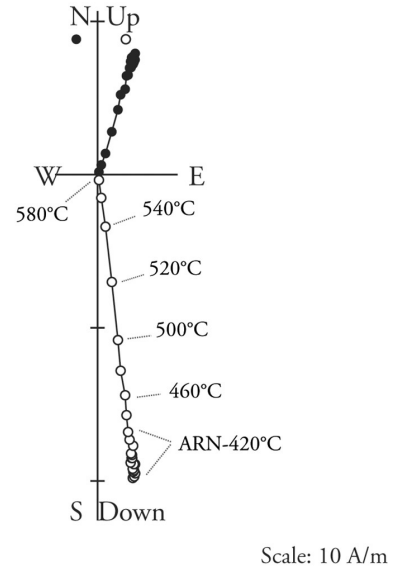
Figure 2 : Exemples de diagrammes de désaimantation thermique de l'ARN. Les déclinaisons sont reportées dans le plan Est-Nord avec des ronds pleins et les inclinaisons dans le plan Est-Up avec des ronds vides. Les données sont celles obtenues au site de prélèvement. 

Figure 2: Examples of thermal demagnetization diagrams of the natural remanent magnetization. Declinations (closed symbols) and Inclinations (open symbols) are respectively displayed in a North-East and an East-Up plane. The data are those obtained at the sampling site.

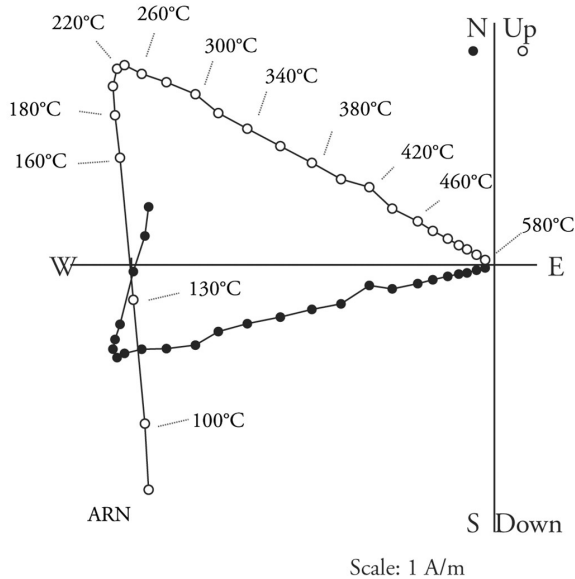
a) AM01-16



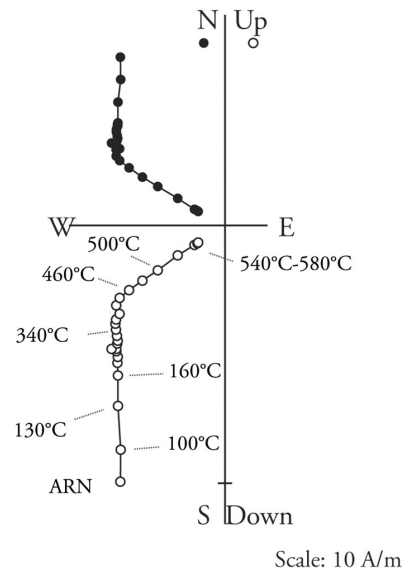
b) AM01-20



c) AM02-04



d) AM02-17



La direction de la composante d'aimantation de basse température (Figure 1) a été déterminée pour chaque petit échantillon (Kirschvink, 1980 ; Cogné, 2003) puis corrigé de l'effet de l'anisotropie d'ATR (tableaux 1 et 2). De manière générale, l'anisotropie d'ATR mesurée pour chaque échantillon est faible et les corrections apportées aux directions sont relativement peu importantes, inférieure dans tous les cas à 3.5°.



Tableau 1: Directions magnétiques individuelles de l'ATR de basse température de déblocage déterminées pour les échantillons du foyer AM01. Les échantillons marqués d'un astérisque ne portent qu'une seule composante d'aimantation.

Table 1: Individual magnetic directions of the low-unblocking temperature thermoremanent magnetization component obtained for the samples from fireplace AM01. Samples marked with an asterisk possess a single magnetization component.

Echantillon	Intervalle de température	Nombre de paliers	Déclinaison (°)	Inclinaison (°)
AM01-01	ARN - 320 °C	12	11.9	69.6
AM01-02	100 °C - 440 °C	17	12.0	63.3
AM01-03	100 °C - 380 °C	14	352.2	67.9
AM01-04	100 °C - 340 °C	12	343.2	61.2
AM01-05	100 °C - 340 °C	12	356.2	65.4
AM01-06	100 °C - 400 °C	15	2.3	69.5
AM01-07	ARN - 400 °C	16	16.2	66.5
AM01-08	100 °C - 420 °C	16	6.7	68.6
AM01-09	100 °C - 180 °C	4	0.6	64.1
AM01-10	<i>Impossible de définir une composante basse température</i>			
AM01-11	<i>Impossible de définir une composante basse température</i>			
AM01-12	100 °C - 360 °C	13	21.9	68.2
AM01-13	130 °C - 580 °C	23	7.6	68.9
AM01-14	100 °C - 580 °C	24	4.7	70.5
AM01-15	100 °C - 580 °C	24	11.8	67.9
AM01-16	100 °C - 360 °C	13	10.3	70.0
AM01-17	100 °C - 360 °C	13	12.1	68.4
AM01-18 (*)	100 °C - 580 °C	24	13.4	66.5
AM01-19 (*)	100 °C - 580 °C	24	8.3	67.3
AM01-20 (*)	100 °C - 580 °C	24	15.2	68.2
AM01-21 (*)	100 °C - 580 °C	23	21.0	67.1
AM01-22 (*)	100 °C - 580 °C	24	10.8	67.3
AM01-23 (*)	100 °C - 580 °C	24	5.9	66.8
AM01-24 (*)	100 °C - 580 °C	24	18.2	70.7
AM01-25 (*)	100 °C - 580 °C	24	6.1	67.1
AM01-26 (*)	130 °C - 580 °C	23	23.7	69.6
AM01-27	180 °C - 440 °C	14	11.1	74.0



Tableau 2: Directions magnétiques individuelles de l'ATR de basse température de déblocage déterminées pour les échantillons du foyer AM02.

Table 2: Individual magnetic directions of the low-unblocking temperature thermoremanent magnetization component obtained for the samples in fireplace AM02.

Echantillon	Gamme de température	Nombre de paliers	Déclinaison (°)	Inclinaison (°)
AM02-01	100 °C - 440 °C	17	24.7	53.8
AM02-02	100 °C - 400 °C	15	19.6	52.7

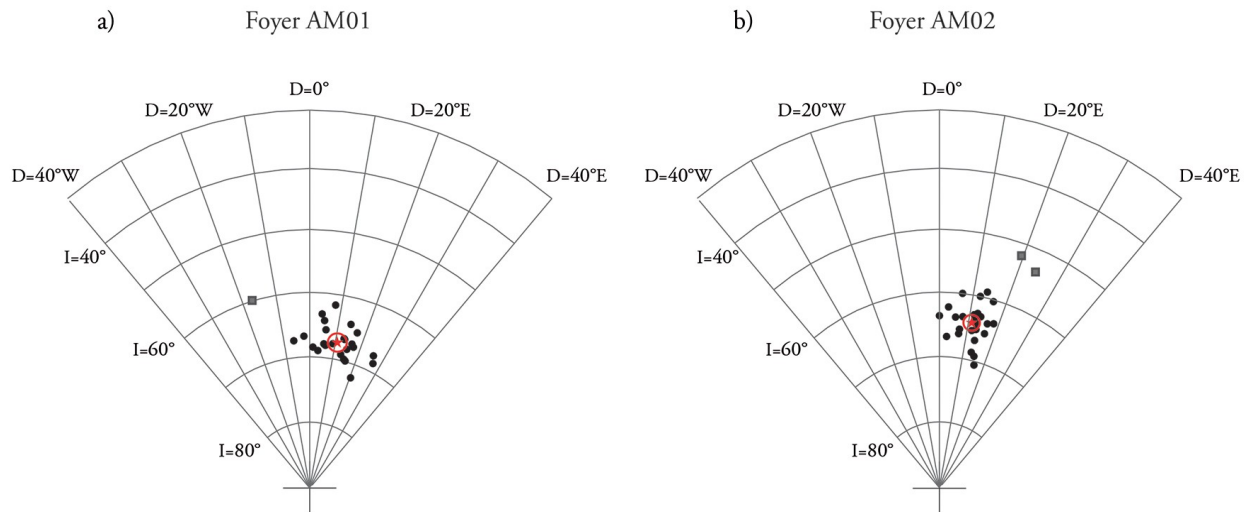
AM02-03	100 °C - 340 °C	12	14.3	68.8
AM02-04	100 °C - 200 °C	5	12.4	71.8
AM02-05	100 °C - 220 °C	6	13.1	67.7
AM02-06	100 °C - 360 °C	13	7.5	66.3
AM02-07	100 °C - 180 °C	4	7.4	66.5
AM02-08	100 °C - 160 °C	3	11.5	69.3
AM02-09	<i>Pas de composante de basse température</i>			
AM02-10	100 °C - 320 °C	11	1.9	63.5
AM02-11	100 °C - 360 °C	13	12.4	63.6
AM02-12	100 °C - 440 °C	17	6.1	67.3
AM02-13	100 °C - 480 °C	19	8.8	65.4
AM02-14	ARN - 380 °C	15	13.0	62.8
AM02-15	ARN -360 °C	14	11.9	63.0
AM02-16	100 °C - 380 °C	14	6.8	63.8
AM02-17	100 °C - 420 °C	16	2.7	62.5
AM02-18	100 °C - 420 °C	16	11.3	62.5
AM02-19	100 °C - 380 °C	14	12.1	65.3
AM02-20	130 °C - 420 °C	15	19.8	62.4
AM02-21	130 °C - 420 °C	15	11.2	59.8
AM02-22	100 °C - 440 °C	17	16.7	62.7
AM02-23	100 °C - 580 °C	24	16.8	61.0
AM02-24	100 °C - 380 °C	14	11.6	61.9
AM02-25	100 °C - 420 °C	16	15.3	63.4
AM02-26	100 °C - 440 °C	17	12.2	66.4
AM02-27	130 °C - 500 °C	19	10.8	63.0
AM02-28	100 °C - 340 °C	12	357.1	64.3
AM02-29	130 °C - 340 °C	11	6.2	60.7

Pour deux échantillons du foyer AM01 (AM01-10 et AM01-11), il n'a pas été possible de définir une composante de basse température en raison d'un recouvrement des spectres de déblocage des composantes BT et HT. L'échantillon AM02-09 ne présente quant à lui qu'une seule composante d'aimantation dont la direction ($D=223.9^\circ$ et $I=-24.5^\circ$) est très différente des directions de la composante BT définies pour les autres échantillons. Cette composante unique correspond donc à celle de haute température acquise lors de la fabrication du carreau. L'échantillon frère du même carreau, AM02-08, porte bien une petite composante BT, mais qui est isolée sur une gamme très réduite de température (100-160°C), ce qui souligne que ce carreau a effectivement été très peu réchauffé lors de l'utilisation du foyer. De manière plus générale, la température maximale de la composante BT peut, en première approximation, nous renseigner sur les températures atteintes dans les différentes zones échantillonnées des foyers. Ainsi pour le foyer AM01, on peut observer que les carreaux entièrement recuits se trouvent sur la moitié ouest de la structure, proche du centre du foyer où les carreaux restants étaient extrêmement fracturés, le plus certainement sous l'effet de la chaleur et non accessibles à notre échantillonnage archéomagnétique (fig. 1d ; Tableau 1). Pour le foyer AM02, les zones les plus réchauffées apparaissent davantage concentrées dans la partie est de la structure (fig. 1d ; Tableau 2). Il faut cependant préciser que la portée de ces observations est limitée dans la mesure où tous les carreaux des foyers n'ont pas été analysés.

Les directions définies pour la composante BT sont bien groupées (fig. 3). Pour le calcul des directions moyennes, nous avons néanmoins exclu les échantillons AM01-04, AM02-01 et AM02-02 dont les directions indiquées par des carrés sur les figures 3a et 3b apparaissent sensiblement déviantes par rapport aux autres directions. Ces écarts sont le plus probablement à relier à des petits déplacements de ces trois carreaux après la dernière utilisation des foyers.

Figure 3 : Directions magnétiques individuelles de l'ATR basse température obtenues sur les échantillons cubiques des foyers AM01 (a) et AM02 (b) reportées en utilisant une projection à aires équivalentes. Les carrés gris indiquent les échantillons exclus pour le calcul des directions moyennes. Les directions moyennes sont indiquées par une étoile rouge avec leur ovale de confiance à 95% (Fisher, 1953).

Figure 3: Individual (sample-level) magnetic directions of the low-unblocking temperature magnetization component isolated from fireplaces AM01 (a) and AM02 (b) using an equal-area projection. The grey squares indicate the directions, which were excluded from the calculation of the mean directions. The mean directions are indicated by a red star with their 95% confidence oval (Fisher, 1953).



Les directions moyennes obtenues au site (48.07°N, 5.67°E) et après réduction à Paris en utilisant la méthode des pôles géomagnétiques virtuels (par exemple Daly et Le Goff, 1996) sont reportées ci-dessous. Ces directions sont données avec deux paramètres de précision, k et l'angle dit α_{95} correspondant au demi-angle d'ouverture d'un cercle où la vraie direction a 95% de chance de se trouver. Une direction moyenne est d'autant plus précise que k est grand et α_{95} petit (avec $\alpha_{95} = 140 / \sqrt{k \times N}$ et N = nombre d'échantillons).

	AM01	N=24 échantillons	D=9.9°	I=68.2°	$\alpha_{95}=1.3^\circ$	k=497
	⇒ Après réduction à Paris :		D=10.4°	I=68.5°		
	AM02	N=26 échantillons	D=10.4°	I=64.5°	$\alpha_{95}=1.3^\circ$	k=504
	⇒ Après réduction à Paris :		D=10.4°	I=68.8°		

Ces directions moyennes avec un α_{95} de 1,3° sont particulièrement précises compte tenu du mode de préparation des petits cubes.

5. Datation archéomagnétique

Il est tout d'abord intéressant de remarquer que les deux directions moyennes de la composante BT ne sont pas compatibles à 95%. La distance angulaire entre ces deux directions est en effet supérieure à la distance angulaire critique définissant le seuil de confiance à 95% au dessus duquel on peut considérer que les deux ensembles de directions individuelles associés au deux foyers ne partagent pas la même direction moyenne (test développé par McFadden et McElhinny,

1990). Ce test statistique nous indique que l'arrêt du fonctionnement des deux foyers n'est pas contemporain et montre ainsi une chronologie dans la cessation de l'activité de forge sur le site. Pour dater la dernière utilisation des foyers, nous avons comparé les directions réduites au site de Paris avec une courbe de référence des variations directionnelles établies à partir de l'analyse de nombreuses structures cuites datées provenant de France (Thellier, 1981 ; Bucur, 1994) mais également des pays voisins, principalement l'Angleterre, mais aussi la Belgique, l'Allemagne et les Pays Bas. Pour sélectionner ces données supplémentaires, nous avons utilisé la base de données GEOMAGIA50 [<http://geomagia.ucsd.edu/>] ; Donadini *et al.*, 2006 ; Korhonen *et al.*, 2008) et conserver les résultats obtenus dans un rayon de 700 km autour de Paris, soit à peu près la distance entre Paris et le sud de France. Nous cherchons en effet à construire une courbe de référence intégrant un grand nombre de données disponibles dans une zone géographique restant relativement limitée (ici à l'échelle de la France) pour réduire autant que possible les erreurs liées aux effets de réduction à un même site de référence (ici Paris ; par exemple Bucur, 1994). Nous avons ensuite conservé les données avec une incertitude en âge inférieure ou égale à 100 ans et une direction moyenne définie par au moins 4 directions individuelles et par un α_95 inférieur ou égal à 3° . Ces critères de sélection ne sont pas très sévères mais ils assurent malgré tout une relative homogénéité avec les caractéristiques des données françaises. Notons que 5 données françaises datées, non publiées, ont été ajoutées et sont issues de l'analyse de fours de potier à Montpellier. La courbe de référence a ensuite été calculée par moyenne mobile pour des fenêtres temporelles dont les durées sont ajustées suivant la distribution temporelle des données archéomagnétiques datées de référence (Le Goff *et al.*, 2002).

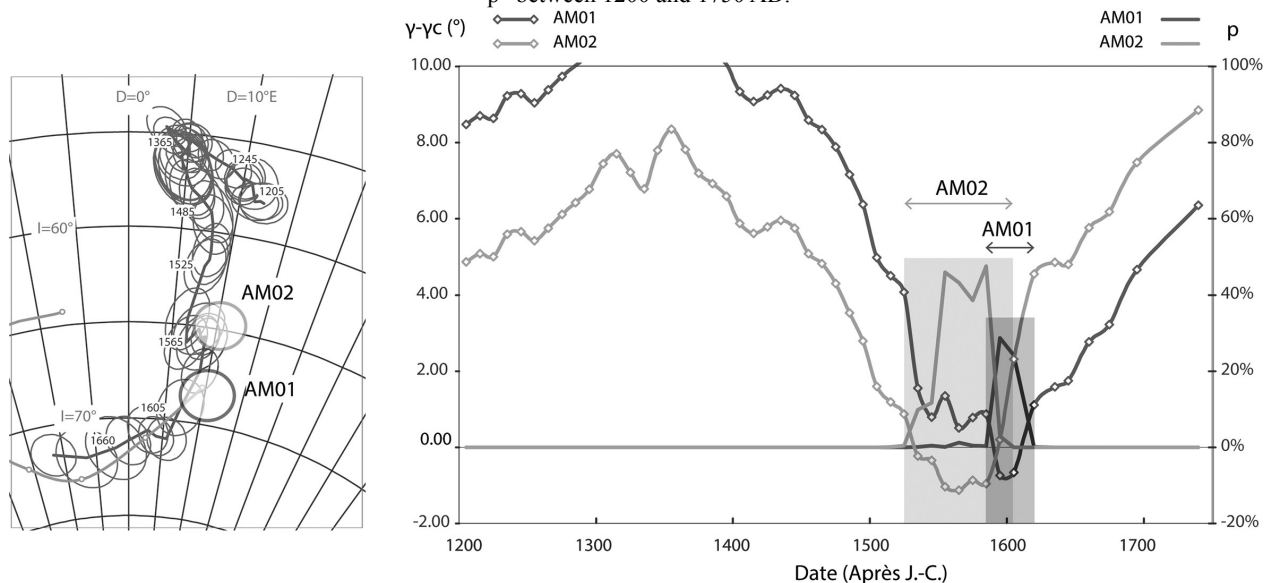
Deux méthodes statistiques ont été développées en France pour dater par archéomagnétisme des structures cuites en place. Si les approches sont différentes, il est à noter que les résultats obtenus suivant ces deux méthodes sont cohérents (Hervé, 2012). La première méthode, basée sur une statistique hiérarchique bayésienne, a été utilisée par Lanos (2004) pour construire les courbes de variation séculaire du CMT (direction et intensité) et développer un outil de datation (logiciel RenDateModel). La seconde, que nous utiliserons ici, repose sur le calcul de la distance angulaire (γ) entre la direction à dater et les directions successives d'une courbe de référence des variations directionnelles du CMT (Le Goff *et al.*, 2002). Un âge archéomagnétique est trouvé quand cette distance angulaire est inférieure à une distance critique (γ_c) définie selon un certain seuil (ici à 95% ; McFadden et McElhinny, 1990). Pour compléter cette datation, nous avons calculé également le paramètre « p » qui estime la probabilité en pourcentage de faire une erreur en considérant la direction à dater différente des directions successives de la courbe de référence, ce qui revient à quantifier un âge plus probable à l'intérieur de l'intervalle d'âge obtenu précédemment (Le Goff *et al.*, 2002).

La méthode statistique utilisée donne pour le foyer AM01 une datation à 95% comprise entre 1585 et 1615 après J.-C. (fig. 4). Il est à noter que la direction obtenue pour le foyer AM01 est intermédiaire entre deux directions moyennes de la courbe de référence dont les ovales de confiance à 95% se recouvrent peu (fig. 4a). Ceci souligne des variations rapides pour cette période fin XVI^e-début XVII^e siècle et la faible valeur du paramètre « p » observée semble plus à relier à la nature de ces fluctuations et à la résolution encore trop limitée de la courbe de référence qu'à une mauvaise précision de la direction à dater (fig. 4b). Il est important de souligner qu'un même intervalle d'âge archéomagnétique est obtenu quand la comparaison est faite avec les plus anciennes mesures directes de la direction du champ géomagnétique (courbe grise, fig. 4a).

Pour le foyer AM02, nous obtenons une datation à 95% entre 1525 et 1605 après J.-C. et un âge plus probable entre 1555 et 1585 (fig. 4).

Figure 4: Datation archéomagnétique des foyers AM01 et AM02 (a) Comparaison entre la direction moyenne obtenue sur la structure (ovale gris sombre AM01, ovale gris clair AM02) et la courbe de référence des variations directionnelles du champ magnétique terrestre en France entre 1200 et 1750 après J.-C. (courbe noir avec les ovales de confiance à 95% associés). La courbe en gris clair correspond aux variations directionnelles du CMT déduites des mesures directes (Thellier, 1981). (b) La courbe avec marques (gris foncé: AM01, gris clair: AM02) indique les valeurs successives de $\psi - \psi_c$. Une datation est définie quand $\psi - \psi_c$ est négatif (intervalles soulignés par des zones grisées). La courbe sans marque (gris foncé: AM01, gris clair: AM02) présente les variations du paramètre « p » suivant les directions successives du champ géomagnétique entre 1200 et 1750 après J.-C.

Figure 4: Archeomagnetic dating of the two fireplaces AM01 and AM02 (a) Comparison between the mean direction obtained for the structure (dark grey oval: AM01, light grey oval: AM02) and the reference curve of the directional variations of the geomagnetic field in France between 1200 and 1750 AD (black curve with their associated 95% ovals of confidence). The light grey curve shows the directional variations deduced from direct measurements (Thellier 1981). (b) The curve with markers (dark grey: AM01, light grey: AM02) indicates the successive values of $\psi - \psi_c$. A dating is obtained when $\psi - \psi_c$ is negative (intervals underlined by the grey zones). The unmarked curve (dark grey: AM01, light grey: AM02) shows the variations of the parameter “p” between 1200 and 1750 AD.



6. Conclusion

L'étude archéomagnétique de deux foyers de forge mis au jour sur le site de l'abbaye de Morimond a permis de dater la dernière utilisation de ces structures, avec pour le foyer bas (AM01) une datation comprise entre 1595 et 1615 après J.-C. et pour le foyer haut (AM02), une datation entre 1525 et 1605 après J.-C. Si les intervalles se recouvrent partiellement, les deux directions magnétiques moyennes obtenues ne sont pas compatibles à 95% ce qui indique une chronologie dans l'arrêt de fonctionnement des foyers ; le foyer bas apparaît avoir été abandonné quelques dizaines d'années avant le foyer haut. Il est cependant important de préciser que cette chronologie n'interdit nullement que les deux foyers aient pu fonctionner simultanément durant le XVI^e siècle c'est à dire sur la période définie par les analyses de radiocarbone.

Nos résultats viennent appuyer les conclusions issues de la fouille avec deux sols de forge mis en évidence et distincts d'un point de vue stratigraphique, ce qui indique deux phases d'activité métallurgique. Alors que le foyer bas est en relation stratigraphique avec le sol de forge le plus

récent, il apparaît logique d'associer ici le foyer haut, qui semble s'arrêter plus tôt d'après l'analyse archéomagnétique, au sol de forge le plus ancien.

L'ensemble de ces données archéométriques et archéologiques confortent ainsi nos hypothèses selon lesquelles cette partie du bâtiment a été abandonnée avant 1650 et que l'activité métallurgique est déjà interrompue lors des destructions subies sur le site abbatial à l'occasion des deux sièges successifs de la citadelle voisine de La Mothe qui occasionna de nombreux dégâts entre 1634 et 1645 (Flammarion *et al.*, 2010). Les sources écrites ne sont pas assez détaillées sur la fin du ^{xvi}^e siècle et le début du ^{xvii}^e siècle pour affirmer que l'activité métallurgique s'arrête plus tôt peut-être du fait de saccages liés aux troubles des guerres de Religion qui furent nombreux dans la région après 1562.

gener-bibliography

Bibliographie

AITKEN M. J., ALCOCK P. A., BUSSEL G. D., SHAW C. J., 1981. Archaeomagnetic determination of the past geomagnetic intensity using ancient ceramics: allowance for anisotropy. *Archaeometry* 23, 53-64.

BUCUR I., 1994. The direction of the terrestrial magnetic field in France during the last 21 centuries. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 87 : 95-109.

COGNÉ J.P., 2003. PaleoMac: a Macintosh™ application for treating paleomagnetic data and making plate reconstructions. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 4(1), 1007, doi:10.1029/2001GC000227.

DALY L., LE GOFF M., 1996. An updated and homogeneous world secular variation data base. 1. Smoothing of the archaeomagnetic results. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 93 : 159-190.

DONADINI F., KORHONEN K., RIISAGER P., PESONEN L., 2006. Database for Holocene geomagnetic intensity information. *EOS, Transactions, American Geophysical Union*, 87(14) : 137.

DUNLOP D., ÖZDEMİR Ö., 1997. *Rock Magnetism, Fundamental and Frontiers*, Cambridge University Press.

FISHER R., 1953. Dispersion on a sphere. *Proceedings of the Royal Society of London*, A217, 295-305.

FLAMMARION H., ROUZEAU B., VIARD G., 2010. *Morimond quatrième fille de Cîteaux*. éd. Association des Amis de l'Abbaye de Morimond : 65.

GALLET Y., GENEVEY A., LE GOFF M., 2002. Three millennia of directional variation of the Earth's magnetic field in western Europe as revealed by archeological artefacts. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 131 : 81-89.

HERVÉ G., 2012. Datation par archéomagnétisme des terres cuites archéologiques en France au premier millénaire av. J.-C. Etalonnage des variations du champ géomagnétique en direction et intensité. Thèse de doctorat, Université Michel de Montaigne - Bordeaux III, France.

HERVÉ G., CHAUVIN A., LANOS P., 2013. Geomagnetic field variations in Western Europe from 1500BC to 200AD. Part I: Directional secular variation curve. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 218 : 1-13.

KIRSCHVINK J., 1980. The least squares line and plane and the analysis of paleomagnetic data. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 62: 699-718.

KORHONEN K., DONADINI F., RIISAGER P., PESONEN L., 2008. GEOMAGIA50: an archeointensity database with PHP and MySQL. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 9: doi:10.1029/2007GC001, 893.

- LANOS P., 2004. Bayesian inference of calibration curves, application to archaeomagnetism. In C.E. Buck, A.R. Millard (Eds.), *Tools for Constructing Chronologies Crossing Disciplinary Boundaries. Lecture Notes in Statistics*. 177. Springer, London, 43-82.
- LE GOFF M., GALLET Y., GENEVEY A., WARMÉ N., 2002. On archeomagnetic secular variation curves and archeomagnetic dating. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 134 : 203-211.
- McFADDEN P., McELHINNY M., 1990. Classification of the reversal test in paleomagnetism, *Geophysical Journal International*, 103 : 725-729.
- ROUZEAU B., 2008. *Le patrimoine hydraulique et industriel de l'abbaye de Morimond depuis sa fondation jusqu'à la guerre de Trente Ans : énergie et matériaux d'après les sources écrites et les sources archéologiques*. Thèse de doctorat, Université de Paris 1, 2 vol, France.
- ROUZEAU B. et al., 2006. Ancienne abbaye de Morimond, Rapport de fouille programmée, SRA, Champagne-Ardenne : 330.
- THELLIER E., 1981. Sur la direction du champ magnétique terrestre en France durant les deux derniers millénaires. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 24 : 89-132.