Datation par archéomagnétisme des terres cuites archéologiques en France au premier millénaire av. J.-C. : étalonnage des variations du champ géomagnétique en direction et intensité

Gwenaël Hervé

▶ **To cite this version:**

Gwenaël Hervé. Datation par archéomagnétisme des terres cuites archéologiques en France au premier millénaire av. J.-C. : étalonnage des variations du champ géomagnétique en direction et intensité. Archéologie et Préhistoire. Université Michel de Montaigne - Bordeaux III, 2012. Français. NNT : 2012BOR30011 . tel-00738129

HAL Id: tel-00738129
https://theses.hal.science/tel-00738129

Submitted on 3 Oct 2012

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Université Michel de Montaigne Bordeaux 3

École Doctorale Montaigne Humanités (ED 480)

THÈSE DE DOCTORAT EN « PHYSIQUE DES ARCHEOMATERIAUX »

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

Présentée et soutenue publiquement le 13 janvier 2012 par

Gwenaël Hervé

Sous la direction de Philippe Lanos et Annick Chauvin

Membres du jury

Yves GALLET, DR CNRS, IPG Paris.	Rapporteur
Stéphane VERGER, Directeur d'études, EPHE.	Rapporteur
Pierre GUIBERT, IRHE CNRS, Université de Bordeaux 3.	Examinateur
Mimi HILL, Lecturer, University of Liverpool.	Examinatrice
Stefan WIRTH, Professeur, Université de Bourgogne.	Examinateur
Philippe LANOS, DR CNRS, Université de Bordeaux 3.	Directeur de thèse
Annick CHAUVIN, Professeure, Université de Rennes 1.	Co-directrice de thèse

Remerciements

Ce travail de doctorat, financé par l'université de Bordeaux 3, a principalement été réalisé au laboratoire de Paléomagnétisme et d'Archéomagnétisme de Rennes, dont les membres dépendent soit de Géosciences Rennes (UMR6118, CNRS & Université de Rennes 1), soit de l'IRAMAT-CRPAA (UMR5060, CNRS & Université de Bordeaux 3).

Tout d'abord, je tiens à remercier les membres du jury, Yves Gallet, Stéphane Verger, Pierre Guibert, Mimi Hill et Stefan Wirth d'avoir accepté de juger ce travail.

Tous mes remerciements à mes directeurs de thèse, Philippe Lanos et Annick Chauvin pour leur soutien, leur enthousiasme et leurs encouragements tout au long de ce travail. Merci également à Pierre Guibert en tant que directeur du CRPAA pour avoir soutenu cette thèse en archéomagnétisme depuis Bordeaux.

J'ai beaucoup apprécié de travailler au sein du laboratoire de Rennes. Merci donc à Philippe Dufresne (mon mentor pour le prélèvement, la préparation des échantillons et les analyses) et à Philippe Cullerier. Merci à Pierrick Roperch pour le repérage des erreurs et l'ergonomie des logiciels d'acquisition (sans toi, les mesures auraient sûrement été plus rébarbatives). Merci enfin à Guillaume Dupont-Nivet pour sa relecture attentive.

A Rennes, mes remerciements s'adressent au directeur Denis Gapais, pour avoir accepté que ma thèse se déroule aussi au sein de son unité. Un grand merci et plein de bisous à mes chers collègues du bureau 211 : Eline, Alain (avec qui j'ai apprécié ces années-là), Nuno, Guillaume et les « petits » M2 (Sebastien, Lucie, Pierre, Maxime...). Merci surtout à Eline pour sa bonne humeur, pour nos petites pauses de rigolade pendant ces trois années. Merci à l'ensemble des doctorants anonymes (!) de Rennes pour tous les très bons souvenirs passés ensemble au labo ou ailleurs : Claudine (le pilier de cette fine équipe), Fabounet, Anne-Claire, Christoff, Romain, Nathan, Pipo, Mélo (Que vais-je faire maintenant de la fontaine ?), Justine, Justine, Sam, Morgane, Rémi, Céline, Yannick, Gloria, Emilie...

Pour leur accueil toujours très amical, merci aux membres permanents du CRPAA à Bordeaux. J'aurais aimé passer plus de temps avec vous. Merci à mes anciens collègues

de Master 2, Marion, Ziad, Laetitia, Laure, Sarah et Romain... Merci aux luminescents Sophie, Armel, Aurélie et Guillaume, ainsi qu'à FX, Christelle, Ayed, Nadia... Merci à Françoise P. pour sa disponibilité.

Ce travail n'aurait pas non plus été mené sans la collaboration des équipes d'archéologues. Merci pour leur accueil sur leurs sites. Les rencontres furent très enrichissantes, notamment à Bibracte. Merci à Sylvie Barrier pour m'avoir initié à la datation céramologique. La plupart des structures ont été prélevées avant le début de la thèse par les soins d'Hugues Savay-Guerraz, Céline Jandot, Pascal Paris, Louis Jeanson, Olivier Ginouvez et Fabrice Charlier, que je remercie pour la précision de leurs prélèvements. L'étude des briquettes expérimentales de Sallèles-d'Aude n'aurait pu être réalisée sans le conservateur du musée Amphoralis Michel Perron d'Arc.

Enfin merci à mes parents, à ma «petite» soeur Nolwenn et mes grand-mères pour leur soutien au cours de mes études...

Résumé

L'objectif de ce travail est l'amélioration des courbes de variation séculaire de la direction (inclinaison I et déclinaison D) et de l'intensité (F) du champ magnétique terrestre en Europe occidentale durant le premier millénaire av. J.-C. 47 fours, foyers et lots de tessons céramiques ont été étudiés pour constituer de nouvelles structures de référence. La datation du moment d'acquisition de l'aimantation a été définie en analysant l'ensemble des informations archéologiques et chronométriques disponibles sur les sites. 39 nouvelles archéodirections ont été obtenues après désaimantations thermique et par champ alternatif. Les 18 archéointensités ont été déterminées par le protocole de Thellier-Thellier et généralement corrigées des effets de l'anisotropie et de la vitesse de refroidissement. Les courbes de variation séculaire françaises, construites par moyenne mobile et par la statistique hiérarchique bayésienne, ont été étendues jusqu'en 1500 av. J.-C. pour la direction et jusqu'en 800 av. J.-C. pour l'intensité. L'inclinaison a une variation non monotone entre 65 et 75° entre 1500 et 0 av. J.-C. Les variations de la déclinaison et de l'intensité sont très fortes avec un maximum en 800 av. J.-C. (30° pour D et 90 µT pour F) et un minimum (-5° pour D et 60µT pour F) en 250 av. J.-C. L'interprétation géomagnétique de la variation séculaire est difficile en raison des lacunes des jeux de données de référence hors Europe. Ces nouvelles courbes plus fiables améliorent la datation archéomagnétique au premier millénaire av. J.-C. et étendent son application à l'âge du Bronze final. Du fait de la forte variation séculaire, le premier âge du Fer est la période la plus propice.

Mots-clé : datation archéomagnétique, courbes de variation séculaire, premier millénaire av. J.-C., âge du Fer

Abstract

This study aims to improve the Western Europe secular variation curve of the direction (inclination I and declination D) and the intensity (F) of the Earth's magnetic field during the first millennium BC. New archaeomagnetic reference data were obtained from 47 kilns, hearths and sets of pottery sherds with precise magnetization acquisition ages determined through a comprehensive review of available archaeological and chronometric informations. 39 new archaeodirections were computed after thermal and alternating field demagnetizations and 18 new archaeointensities were determined by the Thellier-Thellier protocol with anisotropy and cooling rate corrections. The new French secular variation curves, built using hierarchical bayesian statistics, were extended to 1500BC for the direction and to 800BC for the intensity. Inclination vary non-monotonously (between 65 and 75°) between 1500BC and 0AD. Variations in declination and intensity are very strong with a maximum at 800BC (30° for D and 90μT for F) and a minimum at 250BC (-5° for D and 60μT for F). Interpreting the geomagnetic significance of this strong variation is hindered by the scarcity of data outside Europe. However it provides a useful marker for reliable archaeomagnetic dating in Western Europe during the Iron Age, especially during the Early Iron Age thanks to the strong secular variation. The new directional curve also allows the extension of archaeomagnetic dating to the Late Bronze Age.

Keywords: archaeomagnetic dating, secular variation curves, first millennium BC, Iron Age

SOMMAIRE

Introduction générale 13

Première partie : Présentation du contexte et objectifs 17

Chapitre 1 : La reconstitution de la variation séculaire du champ géomagnétique dans le passé : principes et applications 21

Chapitre 2 : Le premier millénaire av. J.-C. en France : contexte et chronologie 47

Conclusion : Objectifs de la thèse 69

Deuxième partie : Données et méthodologie 73

Chapitre 3 : Corpus des nouveaux sites 77

Chapitre 4 : La datation des structures de référence : enjeux, méthodes et limites 89

Chapitre 5 : Protocole d'acquisition des archéodirections et archéointensités 111

Article : Archaeomagnetic results on three Early Iron Age salt-kilns from Moyenvic (France), publié en 2011 dans *Geophysical Journal International* 112

Chapitre 6 : Analyse expérimentale de briquettes de Sallèles-d'Aude (Aude) : investigations sur l'effet de la vitesse de refroidissement 125

Chapitre 7 : Construction des courbes de variation séculaire 159

Troisième partie : Implications géomagnétiques et archéologiques 169

Chapitre 8 : Variation séculaire de la direction du champ géomagnétique en Europe Occidentale durant les 1500 dernières années av. J.-C. 173

Article : Improvements of the Western Europe directional secular variation curve during the last 1500 years BC, à soumettre 173

Chapitre 9 : Variation séculaire de l'intensité du champ géomagnétique en Europe Occidentale au premier millénaire av. J.-C. 223

Article : New archaeointensity data from France and variation of the geomagnetic dipole during the first millennium BC, à soumettre 223

Chapitre 10 : La datation archéomagnétique au premier millénaire av. J.-C. en Europe occidentale : avancées et perspectives 273

Conclusion générale 297

Bibliographie 301

Glossaire des abréviations 325

Liste des figures 327

Liste des tableaux 330

Introduction générale

L'archéomagnétisme est une méthode de datation chronométrique fondée sur l'enregistrement par les terres cuites archéologiques du champ magnétique terrestre ambiant lors de leur cuisson. La méthode repose sur la construction de courbes de variation séculaire du champ magnétique, valables dans une zone géographique réduite d'au maximum 1000km de rayon. Les résultats de datation (Lanos, 2004) sont conditionnés par la précision et la résolution des courbes, qui dépendent du nombre et de la qualité des données de référence. Ces données permettent aussi d'établir des modèles globaux du champ géomagnétique (Korte *et al.*, 2009 ; Korte et Constable, 2011), qui apportent des informations sur l'organisation et la dynamique du noyau interne (Christensen, 2011).

En France, les courbes de variation séculaire de la direction (déclinaison et inclinaison) du champ magnétique couvrent les trois derniers millénaires (Gallet *et al.*, 2002). Mais leur précision est suffisante à des fins de datation archéomagnétique uniquement pour les deux derniers millénaires. Pendant le premier millénaire av. J.-C., qui correspond à la fin de l'âge du Bronze et à l'âge du Fer, les données de référence françaises se limitent à 24 structures étudiées par Bucur (1994), Moutmir (1995) et Gallet *et al.* (2002). Pour l'intensité du champ magnétique (aussi appelée archéointensité), la courbe de variation séculaire (Gomez-Paccard *et al.*, 2008) est établie seulement pour les deux derniers millénaires et les données fiables (c'est-à-dire corrigées des effets de l'anisotropie et de la vitesse de refroidissement) sont très rares au premier millénaire av. J.-C. en Europe occidentale (Hill *et al.*, 2007 et 2008 ; Gallet *et al.*, 2009).

Pourtant, ces ébauches de courbes de variation séculaire montrent de fortes variations de la déclinaison et de l'intensité au premier millénaire av. J.-C., qui serait donc une période particulièrement propice à la datation archéomagnétique. Aussi, l'objectif principal de ce doctorat est l'amélioration des courbes de référence de la direction et de l'intensité du champ géomagnétique, afin d'**optimiser la datation**

archéomagnétique en France au premier millénaire av. J.-C., au cours duquel les autres méthodes de datation chronométrique (radiocarbone et dendrochronologie) présentent des déficiences notamment entre 800 et 500 av. J.-C.. Comme les chrono-typologies de l'âge du Fer, exceptées aux deux derniers siècles av. J.-C., sont calées sur l'échelle calendaire de manière relativement imprécise, la mise en place d'une nouvelle méthode de datation chronométrique pourrait aussi avoir un impact important sur la datation des sites archéologiques.

A une échelle plus large, aucune autre aire géographique en Europe et au Proche-Orient ne présente au premier millénaire av. J.-C. un jeu de données fiable et complet à la fois en direction et en intensité. Les modèles globaux restent incertains pour cette période (Korte *et al.*, 2009 ; Korte et Constable, 2011). L'acquisition d'un nouveau jeu de données complet permettrait de **mieux comprendre les fortes variations du champ géomagnétique** pressenties en Europe au premier millénaire av. J.-C..

Ces applications archéologiques et géomagnétiques des nouvelles courbes de variation séculaire reposent sur l'acquisition de nouvelles données de référence. **Quarante-sept structures archéomagnétiques** (fours, foyers et lots de tessons) provenant de vingt-six sites archéologiques ont été prélevées pour analyse.

La première partie de ce mémoire précise la documentation archéomagnétique disponible au premier millénaire av. J.-C. en Europe (chapitre 1) et le contexte archéologique (chapitre 2) de cette période. La deuxième partie présente la méthodologie suivie pour le calage chronologique et pour le traitement de l'aimantation des nouvelles données de référence. Cette partie comprend également une étude expérimentale sur des briquettes produites à Sallèles-d'Aude, qui apporte de nouveaux éléments sur la correction de vitesse de refroidissement dans les protocoles d'archéointensité. La troisième partie synthétise les résultats et présente les nouvelles courbes de référence de la direction entre 1500 av. J.-C. et 0 ap. J.-C. (Chapitre 8) et de l'intensité au premier millénaire av. J.-C. (Chapitre 9). Les implications géomagnétiques de ces nouvelles courbes sont étudiées dans ces deux chapitres, alors que le chapitre 10 présente les améliorations de la datation archéomagnétique en Europe occidentale.

Première partie :

Présentation du contexte et objectifs

L'archéomagnétisme est une méthode de datation fondée sur l'enregistrement des variations du champ magnétique terrestre par les terres cuites archéologiques (fours, foyers, terres cuites architecturales, céramiques) et par les roches volcaniques (Lanza *et al.*, 2005 ; Arrighi *et al.*, 2006). Lors de leur dernière cuisson, elles acquièrent une aimantation parallèle et proportionnelle au champ géomagnétique ambiant. Cette aimantation est appelée thermorémanente (ATR). Les propriétés physiques de cette ATR, ainsi que les modalités de son acquisition sont décrites dans l'annexe 1.

Cette méthode de datation a été développée en France par Emile Thellier (1938, 1981), puis en Grande-Bretagne (Cook et Belshé, 1958 ; Aitken et Weaver, 1962). Depuis, la méthode s'est considérablement améliorée et développée dans la majorité des pays européens, ainsi qu'en Amérique du Nord et du Sud et en Asie (Cf. la synthèse de Sternberg 2008). Comme la dendrochronologie, l'archéomagnétisme nécessite la construction de référentiels. Ceux-ci sont appelés courbes de variation séculaire et sont valables dans une aire géographique limitée en raison de la variation spatiale du champ magnétique terrestre. Ces référentiels sont établis par l'étude de structures de référence datées par d'autres méthodes de datation indépendantes. Outre leur application à des fins de datation à l'échelle locale, ces données de référence sont aussi utilisées pour modéliser le champ magnétique terrestre à l'échelle globale, afin de mieux comprendre le fonctionnement de la géodynamo terrestre.

Cette partie est constituée de deux chapitres. Le premier intitulé **La reconstitution de la variation du champ géomagnétique dans le passé : principes et applications** rappelle les caractéristiques du champ géomagnétique et de sa variation. Ce chapitre présente également l'état de la documentation archéomagnétique au premier millénaire av. J.-C.

Le deuxième chapitre intitulé **Le premier millénaire av. J.-C. : contexte et chronologie** aborde le contexte archéologique, ainsi que les apports et les limites des systèmes chronotypologiques et des méthodes chronométriques pour cette période.

En conclusion de cette partie, les objectifs de la thèse sont récapitulés.

Chapitre 1

La reconstitution de la variation du champ magnétique terrestre dans le passé : principes et applications

En tout lieu, le champ magnétique est caractérisé par un vecteur **F**, dont la direction peut être visualisée par une aiguille aimantée. Ce vecteur, tangent aux lignes de champ magnétique, est décrit par trois composantes : l'inclinaison I, la déclinaison D et l'intensité F (Figure 1.1). L'inclinaison I, exprimée en degrés, est l'angle du vecteur **F** par rapport au plan horizontal. Par convention, sa valeur est positive lorsque **F** est dirigé vers l'intérieur de la Terre, comme c'est le cas dans l'hémisphère Nord depuis la dernière inversion il y a environ 780000 ans. La déclinaison D, exprimée en degrés, est l'angle entre le Nord géographique et la projection dans le plan horizontal du vecteur **F**. La direction de cette projection, qui indique le Nord magnétique est donnée par les boussoles. L'existence de ces instruments est avérée à partir du XII^{ème} siècle ap. J.-C. en Europe et peut-être dès le I^{er} siècle ap. J.-C. en Chine (Needham, 1962). La déclinaison est comptée positivement dans le sens horaire. Le troisième paramètre, l'intensité F est exprimée en Tesla (T).

Le champ géomagnétique **F** et donc ses trois paramètres I, D et F varient dans l'espace, mais également dans le temps à différentes échelles. Les variations rapides, de l'ordre du jour, du mois ou de l'année, sont liées à l'interaction de l'activité solaire avec la ionosphère : on parle de magnétosphère. Cette source externe du champ magnétique mesuré à la surface de la Terre contribue à environ 1% du champ magnétique total.

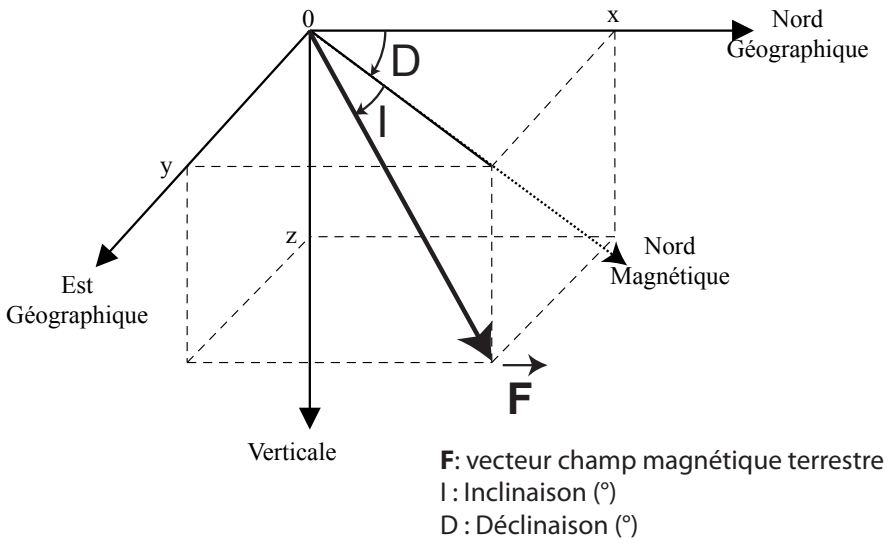


Figure 1.1 : Composantes du vecteur champ magnétique

Les variations lentes du champ magnétique terrestre, à l'échelle de la décennie, du siècle et du millénaire, sont appelées variations séculaires. Elles sont liées à des sources internes, qui représentent 99% du champ magnétique mesuré à la surface de la Terre. L'archéomagnétisme et plus largement le paléomagnétisme s'attache à l'étude de la variation séculaire, dont l'analyse permet de proposer des hypothèses sur l'origine et le fonctionnement des sources internes, notamment grâce à la décomposition du champ magnétique en harmoniques sphériques et grâce à la magnétohydrodynamique.

1. Description spatiale du champ géomagnétique : l'analyse en harmoniques sphériques

Cette analyse mathématique (SHA, Spherical Harmonic Analysis) a été appliquée au champ magnétique terrestre par Gauss en 1839. Elle permet de séparer les différentes composantes externes et internes du champ géomagnétique. A la surface de la Terre, le champ magnétique est assimilé au champ dérivant d'un potentiel géomagnétique V, qui est la somme de deux potentiels V_i et V_e correspondant aux sources internes et externes du champ. Le potentiel V vérifie l'équation de Laplace à la surface de la Terre, à distance de toute source électromagnétique :

$$\nabla^2 V = 0 \qquad [1.1]$$

La résolution de cette équation permet de décrire les potentiels interne et externe sous la forme d'une somme d'harmoniques sphériques, qui dépendent des coordonnées sphériques (r, θ, λ) du point d'observation. r est la distance du point d'observation au centre de la Terre, θ la colatitude et λ la longitude.

$$V_i = a\sum_{n=1}^{\infty}\sum_{m=0}^{n}\left(\frac{a}{r}\right)^{n+1} P_n^m(\cos\theta)\,(g_n^m\cos(m\lambda) + h_n^m\sin(m\lambda)) \qquad [1.2]$$

$$V_e = a\sum_{n=1}^{\infty}\sum_{m=0}^{n}\left(\frac{r}{a}\right)^{n} P_n^m(\cos\theta)\,(g_n^m\cos(m\lambda) + h_n^m\sin(m\lambda)) \qquad [1.3]$$

g_n^m et h_n^m sont les coefficients de Gauss de degré n et ordre m, associés aux polynômes de Legendre normalisés P_n^m. a est le rayon moyen de la Terre (6371 km).

Les valeurs des coefficients de Gauss, exprimés en nT, à un moment donné sont déterminées par modélisation inverse à partir des observations. Cette procédure est pratiquée à partir des mesures d'observatoires, pour construire les modèles de champ global IGRF (International Geomagnetic Reference Field, IGRF-11 pour la dernière version, Finlay *et al.*, 2010 et http://www.ngdc.noaa.gov/IAGA/vmod/igrf.html). Les modèles peuvent aussi être établis avec les données des satellites tels que Magsat, Oersted ou CHAMP.

Ces modèles permettent de décrire le spectre d'énergie du champ géomagnétique actuel à la surface de la Terre (Figure 1.2a) en fonction du degré n d'harmoniques sphériques. L'énergie diminue des degrés 1 à 14, qui décrivent le champ principal généré dans le noyau externe de la Terre. Les degrés supérieurs à 14, de mieux en mieux connus, décrivent le champ d'anomalie d'origine crustale.

Le spectre d'énergie du champ principal est dominé par le degré 1 associé au champ dipolaire, qui constitue environ 90% du champ géomagnétique. Il est décrit par les termes g_1^0, g_1^1 et h_1^1. La valeur du moment dipolaire m est calculée :

$$m = \frac{4\pi a^3}{\mu_0}\sqrt{(g_1^0)^2 + (g_1^1)^2 + (h_1^1)^2} \qquad [1.4]$$

Le terme g_1^0 représente le champ développé par un dipôle centré et parallèle à l'axe de rotation de la Terre. Le terme g_1^1 est celui d'un dipôle centré orienté dans le plan équatorial selon l'axe X, alors que h_1^1 est orienté selon l'axe Y. Les valeurs actuelles de ces deux derniers termes déterminent une inclinaison de l'axe du dipôle de 11,5° par

rapport à l'axe de rotation de la Terre. Les termes supérieurs sont associés au champ non-dipolaire qui constitue approximativement 10% du champ géomagnétique. Les termes de degré 2 décrivent par exemple le champ crée par un quadrupôle.

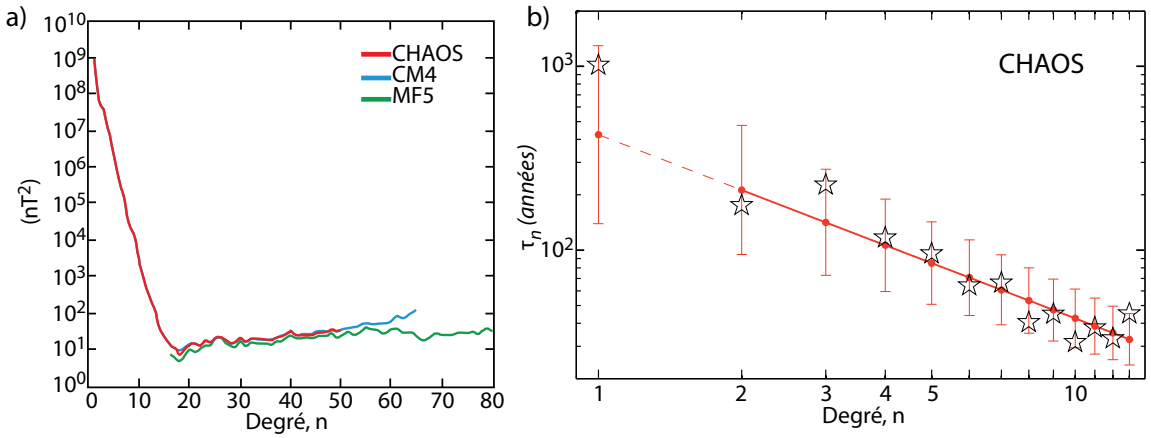


Figure 1.2 : a) Spectre d'énergie du champ magnétique en fonction du degré d'harmoniques sphériques n obtenu à partir des modèles CHAOS (Olsen et al., 2006), CM4 (Sabaka et al., 2004) and MF5 (Maus et al., 2007) établis avec les données satellitales. (D'après Hulot et al., 2009). b) Temps de réorganisation des différents degrés d'harmoniques sphériques déduit du modèle CHAOS (Olsen et al., 2006) d'après Lhuillier et al. (2011)*. Les étoiles noires correspondent aux observations et les points rouges avec leurs barres d'erreur aux prédictions de Lhuillier al.* (2011).

L'analyse des données satellitales donne aussi des informations sur les taux de variation séculaire associés à chaque degré d'harmoniques sphériques. Les temps de réorganisation (Hulot et Le Mouël, 1994) sont définis par la durée nécessaire à un degré d'énergie pour varier d'une quantité égale à sa valeur actuelle étant donné son taux de variation actuel. Olsen *et al.* (2006) ont estimé le temps de réorganisation du dipôle à environ 900 ans. Pour les degrés d'harmonique n entre 2 et 13 (Figure 1.2b), le temps de réorganisation décroît selon la loi 415±50/n (Lhuillier *et al.*, 2011) : par exemple, les structures du champ géomagnétique associées au quadrupôle se réorganisent sur une échelle de temps d'environ 200 ans.

Les modèles globaux basés sur une description en harmoniques sphériques permettent également de déterminer la composante radiale (Br) du champ géomagnétique à l'interface noyau-manteau (*Core-Mantle Boundary*, CMB). Les variations de Br à la CMB donnent des renseignements sur les mouvements des fluides dans le noyau externe et par conséquent sur la géométrie de la géodynamo (Christensen,

2011). Par exemple, quatre zones de concentration du flux magnétique (Gubbins et Bloxham, 1987) ont été mises en évidence à haute latitude (deux dans l'hémisphère Nord sous la Sibérie et le Grand Nord canadien et deux autres approximativement symétriques dans l'hémisphère Sud). Ces zones, appelées *flux patchs* ou *flux lobes*, seraient associées dans le noyau externe à des cellules de convection cylindriques parallèles à l'axe de rotation de la Terre (Kono et Roberts, 2002).

2. Variation du champ géomagnétique dans le passé

2.1 Données historiques

La variation passée du champ géomagnétique est connue par des mesures continues depuis 1830 et par des mesures ponctuelles depuis le début du XVI^{ème} siècle pour la déclinaison et l'inclinaison et depuis 1832 pour l'intensité suite aux travaux de Gauss. Des courbes de variation séculaire précises ont pu être établies sur ces quatre derniers siècles dans la plupart des pays européens, qui constituent la zone la mieux couverte sur le globe, comme la France (Alexandrescu *et al.*, 1996), le Royaume-Uni (Malin et Bullard, 1981), l'Italie (D'Ajello Caracciolo *et al.*, 2011) ou l'Allemagne (Korte *et al.*, 2009b).

En outre, les mesures de la direction du champ magnétique acquises par les navigateurs sur le reste du globe permettent d'avoir une très bonne répartition spatiale des mesures à la surface de la Terre (Jonkers *et al.*, 2003). Ceci a permis la construction d'un modèle global en harmoniques sphériques fiable : le modèle gufm (Jackson *et al.*, 2000). La variation de g_1^0 avant les premières mesures absolues de l'intensité en 1832 reste néanmoins très discutée. Depuis 1832, g_1^0 diminue à un taux annuel de -15 nT et Jackson *et al.* (2000), soutenu par Suttie *et al.* (2011) proposent d'étendre ce taux jusqu'en 1590. D'autres versions de gufm sont fondées entre 1690 et 1832 sur une diminution plus faible de g_1^0 (-2,3±2,7 nT/an, Gubbins *et al.*, 2006) ou sur un g_1^0 constant (Finlay, 2008). Enfin, les données archéomagnétiques de Genevey *et al.* (2009) et Hartmann *et al.* (2011) mettent en évidence une variation non-monotone de g_1^0 entre le XVI^{ème} siècle et 1832.

2.2 Données archéo- et paléomagnétiques et variation séculaire sur les derniers millénaires

Avant le XVI^{ème} siècle, le champ géomagnétique ne peut être mesuré qu'indirectement par l'analyse de l'aimantation thermorémanente (ATR) des roches volcaniques ou des terres cuites archéologiques. Les sédiments peuvent être également utilisés, car ils acquièrent au cours de la sédimentation une aimantation rémanente détritique (ARD), dont le processus d'acquisition est très différent de celui d'une ATR (Cf. annexe 1). Les estimations du champ géomagnétique déduites de l'analyse des ARD ne sont pas aussi fiables que celles issues des coulées volcaniques et des terres cuites archéologiques : d'une part, un aplatissement de l'aimantation par rapport au champ magnétique terrestre ambiant est créé lors du dépôt du sédiment et d'autre part les sédiments ne permettent de retrouver que la variation relative de l'intensité du champ géomagnétique.

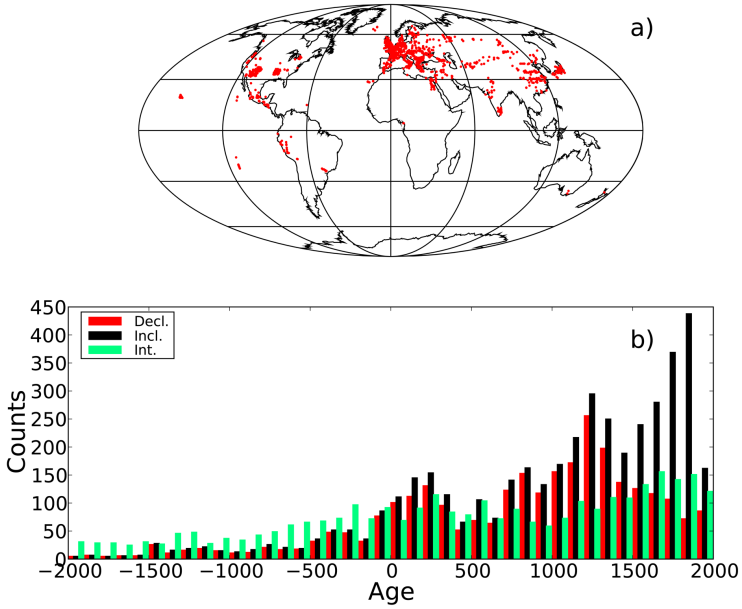


Figure 1.3 : Répartition spatiale (a) et temporelle (b) des données magnétiques de coulées volcaniques et de terres cuites archéologiques. D'après Donadini et al., 2009.

Depuis cinquante ans, un nombre considérable de données a été acquis sur des coulées volcaniques ou des matériaux archéologiques. La répartition spatiale des données est cependant très hétérogène (Figure 1.3) avec une majorité de données acquises en Europe. A partir de ce type de données, ont néanmoins pu être établis des modèles globaux de la variation séculaire du Pôle Géomagnétique Virtuel (Valet *et al.*

2008, sur 2000 ans) ou du moment dipolaire (Yang *et al.*, 2000 sur 12000 ans ; Genevey *et al.*, 2008 sur 3000 ans).

Des modèles plus complexes en harmoniques sphériques ont également été développés avec ces données volcaniques et archéomagnétiques. Hongre *et al.* (1998) ont décrit sur 2000 ans les variations du champ géomagnétique jusqu'au troisième degré d'harmoniques. Depuis, la publication d'un nombre considérable de nouvelles données a récemment permis le développement de modèles plus complexes jusqu'au dixième degré d'harmoniques sphériques tels que ARCH3k.1 (Korte *et al.*, 2009a). Arch3k.1 et ARCH3k_cst.1 une version jumelle construite après sélection des données en fonction de leurs incertitudes sont établis par modélisation inverse avec des paramètres de régularisation spatiale définis en fonction de l'adéquation aux données. La variation temporelle est obtenue par des B-splines cubiques.

Selon leurs auteurs, ces deux modèles s'avèrent fiables en Europe seulement, du fait de la mauvaise répartition spatiale des données volcaniques et archéomagnétiques. Pour diminuer les déséquilibres géographiques, notamment entre les hémisphères Nord et Sud, des modèles globaux plus complets intègrent aussi les données sédimentaires. Le premier modèle publié CALS7k.1 (Korte et Constable, 2005a) couvre les sept derniers millénaires. CALS7k.1 sous-estime fortement le moment dipolaire (Figure 1.4) et donc les variations de l'intensité. Depuis, les modèles sur les trois derniers millénaires ont été améliorés grâce à une augmentation du nombre de données et une meilleure définition des paramètres de régularisation spatiale : CALS3k.3 (Korte *et al.*, 2009a), puis CALS3k.4 (Korte et Constable, 2011).

La variation séculaire du champ magnétique terrestre et notamment de sa direction, est de mieux en mieux décrite par ces modèles en harmoniques sphériques CALS3k.4 et ARCH3k.1 de plus en plus complexes. En revanche, les variations de l'intensité restent assez mal estimées. Malgré leurs limites, ces modèles s'avèrent déjà très utiles (Constable, 2011) pour explorer la dynamique des flux dans le noyau externe au cours des deux derniers millénaires (Dumberry et Finlay, 2007 ; Korte et Holme, 2010). Mais pour les millénaires av. J.-C., le nombre de données (Figure 1.3b) reste encore insuffisant pour permettre de telles études.

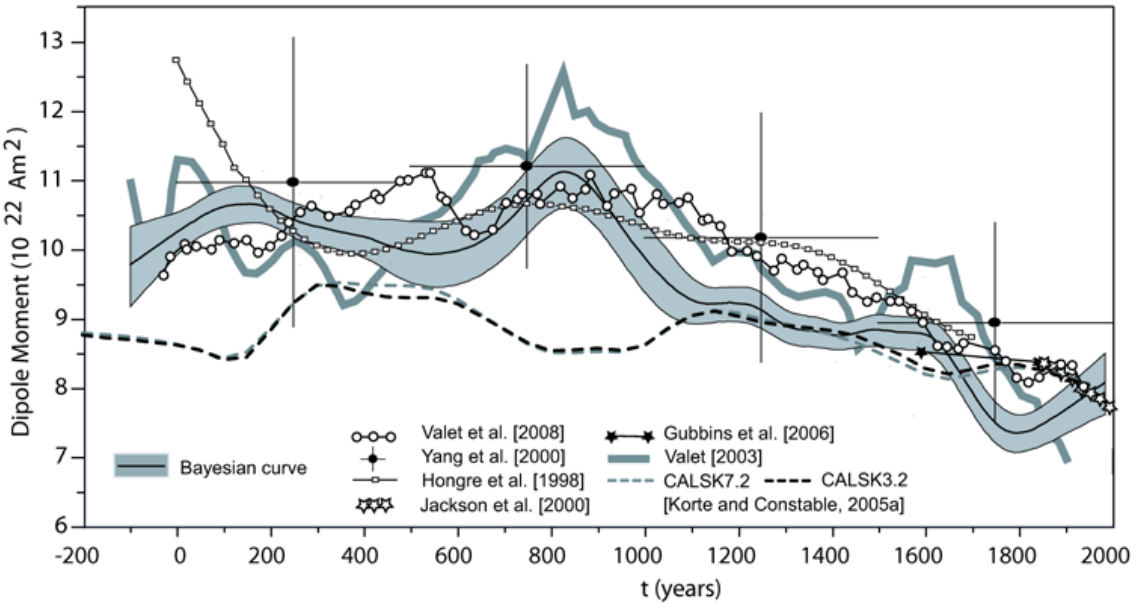


Figure 1.4 : Comparaison de la variation du moment dipolaire obtenue avec les données ouest-européennes les plus fiables (courbe bayésienne) ; avec la variation des moments dipolaires des modèles globaux gufm (Gubbins et al., 2006), de Hongre et al. (1998), CALS7K.2 et CALS3k.2 (Korte et Constable, 2005b) ; avec la courbe de variation du moment dipolaire en Europe orientale (Valet et al., 2008) ; avec les moments dipolaires axiaux virtuels (VADM) moyens de Yang et al. (2000) et Valet et al. (2008). [D'après Gomez-Paccard et al., 2008]

3. La datation archéomagnétique

Une autre application de l'acquisition de données de référence paléo- et archéomagnétiques est la datation d'autres sites archéologiques ou coulées volcaniques. La Figure 1.5 présente le principe de la datation archéomagnétique, telle qu'elle est menée à Rennes avec le logiciel RenDateModel (Lanos, 2004). L'inclinaison, la déclinaison moyenne et éventuellement l'intensité moyenne (Kostadinova et Kovacheva, 2008) sont comparées à leurs courbes de référence respectives (Lanos, 2004), construites de façon sphérique (I et D) ou bien vectorielle (I, D et F). Le résultat de la datation est l'intervalle de date à 95% de confiance défini sur la combinaison des deux ou trois densités de probabilité calculées. Plusieurs intervalles de date peuvent être obtenus, mais ils sont généralement suffisamment espacés (plusieurs siècles), pour être discriminés par le contexte archéologique. La précision de la datation dépend de la

qualité des données acquises sur la structure à dater, de la précision des courbes (liée au nombre et à la qualité des données de référence) et du taux de variation des courbes.

Le laboratoire de l'Institut de Physique du Globe de Paris procède différemment. La datation est déterminée par l'écart angulaire le plus faible entre la direction moyenne au site (I et D) et la courbe de référence (Le Goff *et al.*, 2002). Les deux méthodes donnent des résultats équivalents.

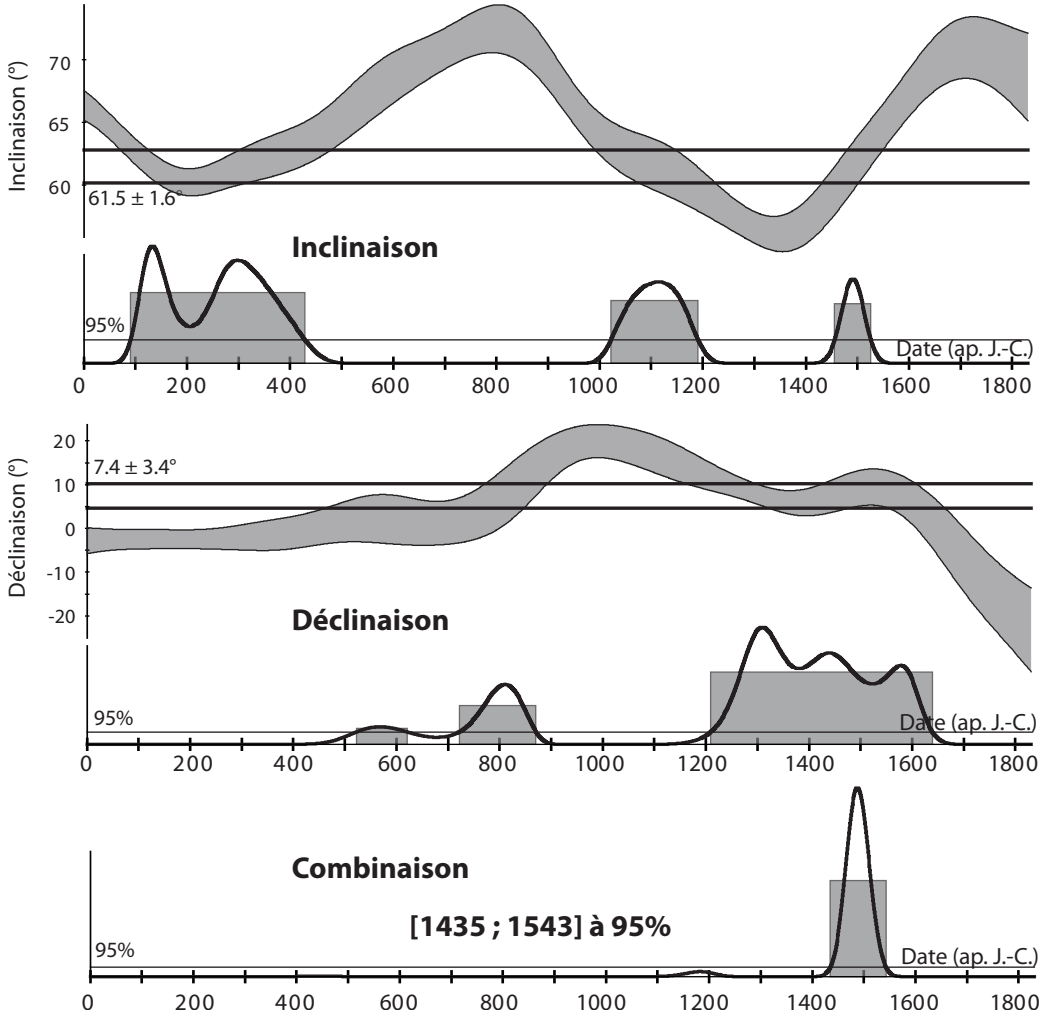


Figure 1.5 : Principe général de la datation archéomagnétique sur le logiciel RenDateModel développé à Rennes (Lanos, 2004). L'inclinaison et la déclinaison (obtenue en l'occurrence sur un four de tuilier du site de Villevieille à Moriez, Alpes-de-Haute-Provence) sont comparées à leurs courbes de référence respectives. Les deux densités de probabilité obtenues sont ensuite combinées, au sens sphérique, pour obtenir l'intervalle de date final à 95% de confiance. Dans cet exemple, la datation est effectuée avec les courbes de variation séculaire françaises (Gallet et al., 2002 ; Lanos, 2005).

En théorie, la datation archéomagnétique est réalisable avec les modèles globaux présentés en section précédente. Par exemple, Lodge et Holme (2008) ont développé à partir de CALS7k.1 un nouveau modèle GMADE2k.1 spécialement créé pour la datation. Des modèles régionaux avec des harmoniques sphériques régionales (SCHA, spherical cap harmonic analysis) ont également été établis à des fins de datation (Pavon-Carrasco *et al.*, 2010a). Le champ magnétique est modélisé à l'intérieur d'un cône de 30° centré à 48° de latitude Nord et 9° de longitude Est. Pour les trois derniers millénaires, le modèle SCHA.DIF.3k est construit seulement à partir des données archéomagnétiques (Pavon-Carrasco *et al.*, 2009), alors que des données sédimentaires sont aussi utilisées pour prolonger le modèle nommé SCHA.DIF.8k entre 1000 et 5000 av. J.-C. (Pavon-Carrasco *et al.*, 2010b).

A cause des limites des modèles globaux ou régionaux (principalement le manque de données et l'hétérogénéité de la répartition spatiale des sites), la datation est plutôt réalisée à partir des courbes de variation séculaire locales, car elles sont généralement plus précises. Ces courbes sont définies en un lieu de référence et valables dans une aire géographique limitée en général de 1000 à 2000 km de diamètre. Par rapport à cette approche, la datation par les modèles globaux et régionaux présente l'avantage d'éviter les erreurs de relocalisation des données au lieu de référence, qui sont estimées en Europe à 0,25°/100 km et 0,1 à 0,2 µT/100 km (Casas et Incoronato, 2007).

Des courbes de variation séculaire de la direction du champ géomagnétique sont disponibles dans la plupart des pays européens : France (Gallet *et al.*, 2002), Royaume-Uni (Zananiri *et al.*, 2007), Espagne (Gomez-Paccard *et al.*, 2006a), Italie (Tema *et al.*, 2006), Allemagne (Schnepp et Lanos, 2005 ; Schnepp *et al.*, 2009), Autriche (Schnepp et Lanos, 2006), Hongrie (Marton, 2009 et 2010), Bulgarie (Kovacheva *et al.*, 2009a) et Grèce (Evans, 2006). La contruction des courbes a bénéficié du réseau européen RTN (Research Training Network) « Archaeomagnetic Applications for the Rescue of Cultural Heritage » (AARCH) entre 2002 et 2006. Les courbes de l'archéointensité sont moins nombreuses car l'acquisition des données est plus longue et car les terres cuites adaptées aux protocoles usuels (Thellier-Thellier, 1959) sont plus rares. Des courbes ont été publiées pour l'Europe occidentale (Gomez-Paccard *et al.*, 2008 ; Genevey *et al.*, 2009), l'Allemagne (Schnepp *et al.*, 2009), la Grèce (De Marco *et al.*, 2008) et la Bulgarie (Kovacheva *et al.*, 2009a).

4. Les courbes de variation séculaire de la direction en France

En France, la construction des référentiels de la direction du champ magnétique terrestre a débuté par les travaux d'Emile Thellier à l'Institut de Physique du Globe de Paris (Thellier, 1938). Le tableau de la Figure 1.6a illustre la progression de l'acquisition des nouvelles données de référence directionnelles et de l'élaboration des courbes de variation séculaire, depuis la publication de la première courbe de référence (Thellier, 1981). Les améliorations sont nombreuses, au niveau des protocoles d'acquisition, du soin apporté au calage chronologique des structures et de la méthode de construction des courbes.

4.1 Variation au cours des deux derniers millénaires

Emile Thellier propose en 1981 la première courbe de variation séculaire de l'inclinaison et de la déclinaison (Figure 1.6b). Sa compilation présente les résultats de 32 lots de terres cuites architecturales (briques ou tuiles) et de 110 structures en place, provenant principalement de France mais aussi de Belgique (6), d'Allemagne rhénane (10) et d'Espagne (Ampurias, 1 four). Ces points de référence sont datés par les méthodes archéologiques (typologie des céramiques, numismatique) ou historiques pour les structures les plus récentes. Les structures sont quasi-exclusivement datées de l'époque romaine et de la seconde moitié du Moyen-Âge. Les directions d'aimantation sont corrigées de l'indice de viscosité, qui permet d'éliminer les composantes d'aimantation rémanente visqueuse (VRM) perturbant la direction de l'aimantation thermorémanente acquise lors de la dernière chauffe de la structure. Les sites avec un α_{95} supérieur à 3°, un indice de viscosité moyen supérieur à 5% et ayant moins de quatre prélèvements ne sont pas pris en compte dans la construction des courbes de référence.

Emile Thellier propose une courbe de variation de l'inclinaison sur les deux derniers millénaires établie avec les structures en place et les matériaux déplacés, ainsi qu'une courbe de variation moyenne de l'inclinaison et de la déclinaison (I, D). Ces premières courbes, réduites à Paris par l'approximation d'un dipôle axial (GAD, Geomagnetic Axial Dipole), mettent en évidence des variations importantes de la direction du champ magnétique terrestre au cours des deux derniers millénaires. Aucune des deux courbes n'est présentée avec son enveloppe d'erreur.

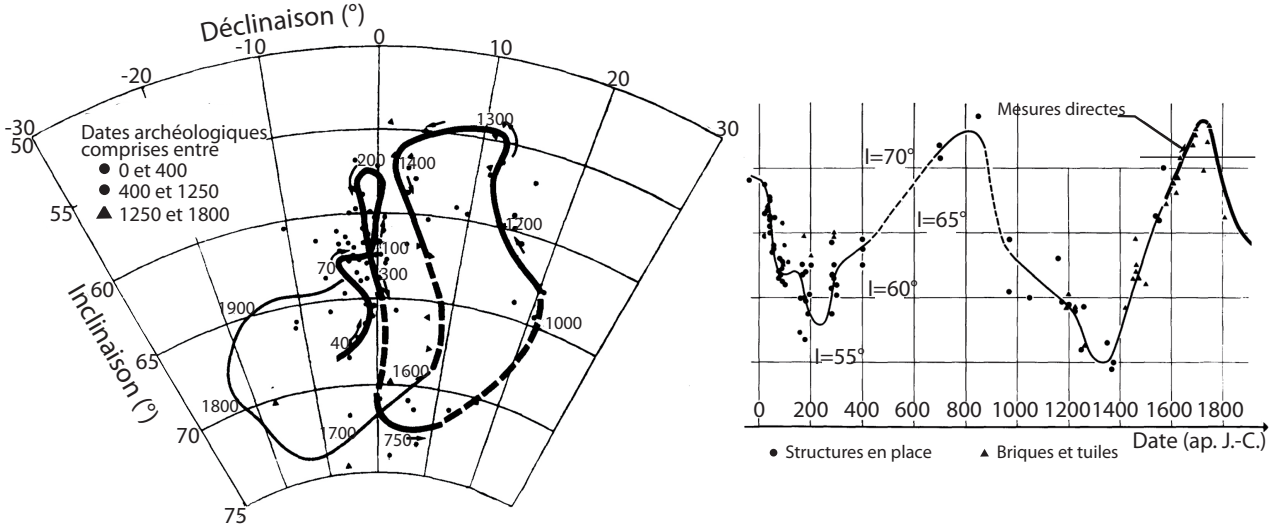
En continuité avec les travaux d'Emile Thellier, Ileana Bucur et son équipe à l'Institut de Physique du Globe de Paris apportent de nombreuses améliorations à ces premières courbes de variation séculaire du champ magnétique terrestre (Bucur, 1994). 92 nouvelles directions moyennes, obtenues après correction du test de viscosité de Thellier, sont publiées pour la France. La répartition temporelle des sites est plus homogène que celle de Thellier (1981) avec notamment de nombreux sites du haut Moyen-Âge et quelques sites de la seconde moitié du premier millénaire av. J.-C. (Figure 1.6c). Les sites sont uniquement datés par les méthodes historiques ou archéologiques. I. Bucur propose une sélection de l'ensemble des données en fonction de la fiabilité de leur calage chronologique : points PC (points certains, 112 points) et points PI (points incertains, 91 points).

La courbe proposée par Bucur (1994) pour l'inclinaison (Figure 1.6c) ne prend pas en compte les matériaux déplacés de Thellier (1981), car l'estimation de l'inclinaison moyenne repose sur des hypothèses de position de cuisson à partir d'échantillonnages trop faibles. Les données sont réduites à Paris par la méthode du Pôle Géomagnétique Virtuel (VGP Virtual Geomagnetic Pole, Noel et Batt, 1990), qui permet de corriger géographiquement à la fois l'inclinaison et la déclinaison. L'amélioration majeure de Bucur (1994) par rapport à Thellier (1981) est l'estimation de l'erreur sur les courbes de variation séculaire (Figure 1.6c). La courbe est construite en suivant la statistique bivariée développée par Le Goff (1990) et Le Goff *et al.* (1992) [Voir aussi Daly et le Goff, 1996], qui est une extension de la statistique de Fisher (1953). La variation temporelle du champ magnétique est suivie par une série d'ellipses de confiance, calculées autour de la moyenne pondérée des directions d'aimantation des structures pour une fenêtre de temps donnée (Cf. chapitre 7). La répartition temporelle des données a permis à I. Bucur de fixer la largeur des fenêtres mobiles à 80 ans et l'intervalle entre deux fenêtres successives à 25 ans.

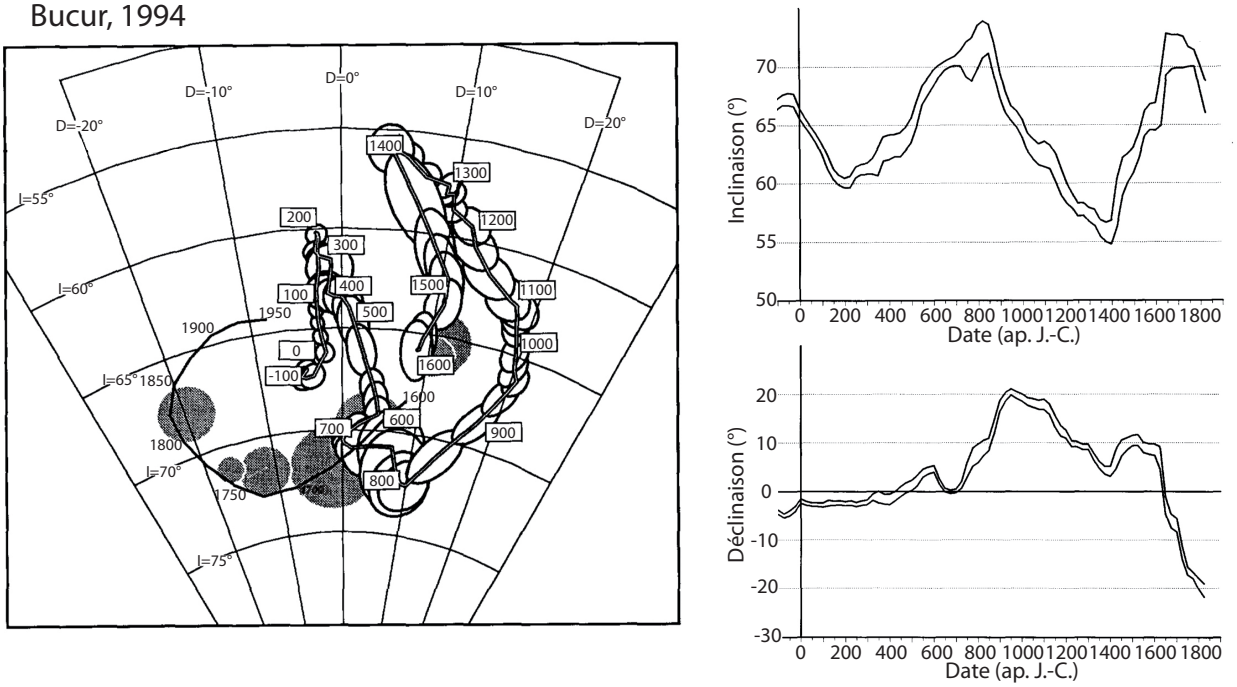
a)

	Nombre de données (I,D) nouvelles	Nombre total de données (I,D)	Méthode de construction des courbes	Extension de la courbe	Protocole	Datation
Thellier (1981)	51 (+48 points incertains)	51	Moyenne	2000 ans	Test de viscosité	Archéologique et historique
Bucur (1994)	61 (+43 points incertains)	112	Statistique bivariée (Le Goff 1990)	2100 ans	Test de viscosité	Archéologique et historique
Moutmir (1995)	11	123	Statistique bivariée (Le Goff 1990)	3000 ans	Test de viscosité ou désaimantation thermique	Archéologique et chronométrique (5)
Chauvin (2000)	12	135	-	-	Thellier-Thellier	Archéologique
Gallet (2002)	6	141	Statistique bivariée (Le Goff 1990)	3000 ans	Désaimantation par champ alternatif	Archéologique
Lanos (2004)	0	141	Statistique hiérarchique bayésienne	3000 ans	-	-

b) Thellier, 1981



c) Bucur, 1994



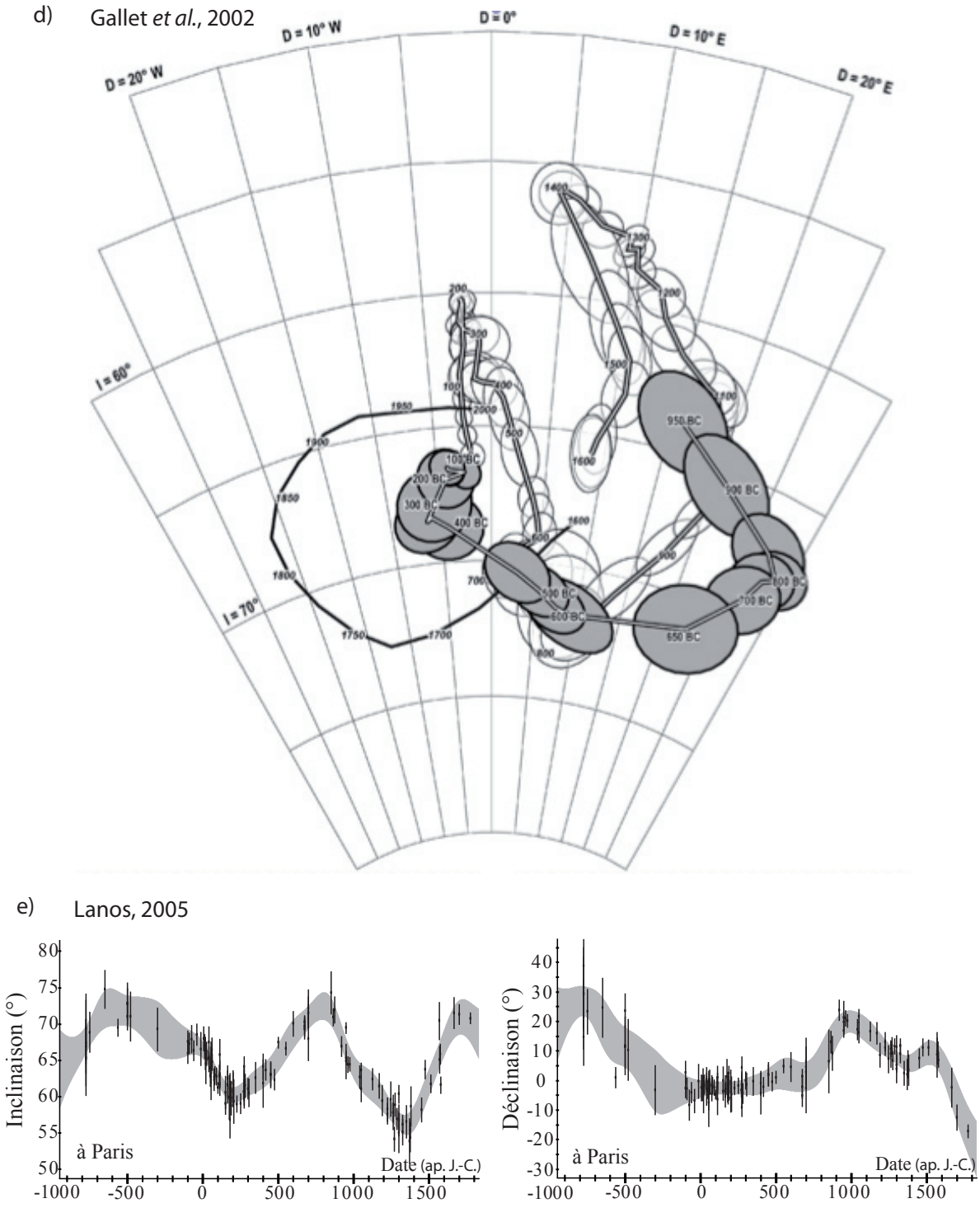


Figure 1.6 : Etat des courbes de variation séculaire de la direction en France. a) Tableau des études sur les structures en place. Les données allemandes et espagnoles de Thellier (1981) ne sont pas comptabilisées. b) Courbes de variation de la direction (en gras avec les données archéomagnétiques et en trait fin avec les mesures directes) et de l'inclinaison de Thellier (1981) pour les deux derniers millénaires. La courbe de variation de l'inclinaison inclut des structures en place et des terres cuites architecturales. c) Courbes de la direction,

de l'inclinaison et de la déclinaison de Bucur (1994) sur les 21 derniers siècles. La courbe bivariée (double trait à partir des données archéomagnétiques et trait simple pour les mesures directes) est tracée avec ses ellipses de confiance (Le Goff, 1990). Les courbes de l'inclinaison et de la déclinaison sont représentées avec leurs marges d'erreur à 95% de confiance. d) Courbe bivariée (Le Goff, 1990) de la direction du champ magnétique terrestre durant les trois derniers millénaires (Gallet et al., 2002) déduites des mesures directes (trait simple) et des données archéomagnétiques (trait double). La variation au premier millénaire av. J.-C. est indiquée en grisé. e) Courbes bayésiennes (Lanos, 2004) de l'inclinaison et de la déclinaison avec leurs marges d'erreur à 95% de confiance.

Pour les deux derniers millénaires, la datation archéomagnétique repose presqu'exclusivement sur les données de cette compilation. Douze nouvelles directions moyennes (provenant principalement du site de Sallèles-d'Aude) ont été ajoutés par Garcia (1996) et Chauvin *et al* (2000) pour l'époque gallo-romaine. Cette étude visait à construire la première courbe de variation séculaire de l'intensité du champ magnétique terrestre. La publication de nouvelles courbes de variation de la direction au cours du haut Moyen-Âge est en cours (Warmé, 2009). Une autre méthode de construction des courbes de référence, fondée sur la statistique hiérarchique bayésienne, a également été proposée par Philippe Lanos (2004). Le lissage par splines cubiques pénalisés, prend en compte l'erreur sur la direction d'aimantation moyenne, mais également l'erreur sur le calage chronologique des structures (Cf. chapitre 7 pour plus de détails).

4.2 Variation au premier millénaire av. J.-C.

Une extension de la courbe au premier millénaire av. J.-C. (Figure 1.6d) a été publiée par Gallet *et al.* (2002) à partir des données françaises acquises par Bucur (1994), Moutmir (1995) et Gallet *et al.* (2002). Le Tableau 1.1 recense l'ensemble des données françaises publiées pour les périodes protohistoriques.

Les structures sont en général datées par les méthodes archéologiques, sauf trois structures (Lignat S1, Lignat S2, Issoire le Brot 1) datées par radiocarbone. Ces nouveaux points (sauf pour Marlenheim im Gewinkel et Mairy les Hautes Charvières) sont acquis avec des méthodes plus complexes et plus fiables que le test de viscosité, comme la désaimantation thermique (totale ou jusqu'à de faibles températures,

Moutmir, 1995) et par champ alternatif (Gallet *et al.*, 2002). La courbe de Gallet *et al.* (2002) est construite par la méthode de la statistique bivariée (Le Goff *et al.*, 1992) avec une fenêtre mobile de 160 ans décalée avec un pas de 50 ans durant le premier millénaire av. J.-C. (Figure 1.6d). Pour augmenter le nombre de données de référence, sont aussi incluses les données d'Angleterre, du sud de l'Italie et de Tunisie, alors disponibles d'après la compilation de Tarling (1999).

Les courbes de Lanos (2004) pour le premier millénaire av. J.-C. (Figure 1.6e) sont construites uniquement avec les données françaises. On peut en effet considérer que les points d'Italie du sud et de Tunisie, par leur éloignement, induisent une erreur de relocalisation trop élevée (presque 4° selon Casas et Incoronato, 2007). Ces courbes sont susceptibles d'être utilisées pour la datation archéomagnétique des sites du premier millénaire av. J.-C. Mais la datation reste imprécise en raison de la grande marge d'erreur des courbes. Au lieu d'obtenir des intervalles de data de l'ordre du siècle (Figure 1.4), les résultats à 95% de confiance couvrent au minimum 300 ou 400 ans. Les marges d'erreur s'expliquent par le faible nombre de points de référence : 2,6 sites/siècle pour le premier millénaire av. J.-C. par rapport à 5,7 sites/ siècles pour les deux derniers millénaires [11,7 sites/siècle en incluant aussi les points incertains de Thellier (1981) et Bucur (1994)]. Le manque de sites de référence est particulièrement important pendant la seconde moitié du premier millénaire av. J.-C., c'est-à-dire pendant le second âge du Fer.

Des nouvelles données de référence doivent donc être acquises pour conforter les fortes variations de la direction (essentiellement de la déclinaison) au premier millénaire av. J.-C. Ces nouvelles données permettront d'obtenir un outil de datation plus efficace et d'améliorer les modèles globaux du champ géomagnétique.

Site	Référence	Lat.	Long.	Type	Tmin	Tmax	Tmoy	$Meth_{AGE}$	Protocole	N (n)	D_s (°)	I_s (°)	k	α95 (°)	D_P (°)	I_P (°)	$Réf_{AM}$
Rungis, ZAC des Antes	Bouetiez & Prost, 1989	48,75	2,34	Four	-3495	-2939	-3217	^{14}C	Après chauffe à 215°C	11 (11)	3,4	64,6	162	3,3	3,4	64,7	Moutmir, 1995
Donzère, grotte de la Chauve-Souris	Vital, 1990	44,44	4,71	Foyer	-1850	-1680	-1765	^{14}C	Désaimantation thermique	6 (6)	26.5	66.8	456	3,7	29.1	69.0	Moutmir, 1995
Marlenheim, im Gewinkel	Haegel, 1986	48,60	7,50	Four	-1000	-900	-950	Archeo	Test de viscosité	11 (11)	18,0	64,6	704	1,6	17,6	64,0	Moutmir, 1995
Loupiac, Combe-Nègre 01	Prodéo et al., 2002	44,91	1,48	Foyer	-850	-700	-775	Archeo	Désaimantation AF	14 (14)	27,0	64,5	889	1,3	29,1	67,3	Gallet *et al.*, 2002
Loupiac, Combe-Nègre 03		44,91	1,48	Foyer	-850	-700	-775	Archeo	Désaimantation AF	14 (14)	36,2	62,4	242	2,6	38,8	65,1	Gallet et al., 2002
Loupiac, Combe-Nègre 12		44,91	1,48	Foyer	-850	-700	-775	Archeo	Désaimantation AF	9 (9)	19,7	66,7	236	3,4	21,4	69,5	Gallet et al., 2002
Loupiac, Combe-Nègre 16		44,91	1,48	Foyer	-850	-700	-775	Archeo	Désaimantation AF	17 (17)	27,4	62,4	123	3,2	29,4	65,4	Gallet et al., 2002
Gannat	Vernet G. et Loison C.	46,20	3,30	Four	-850	-700	-775	Archeo	Après chauffe à 160°C	10 (10)	14,0	65,1	237	2,9	14,7	66,9	Moutmir, 1995
Lignat S1, plaque 111	Gardette *et al.*, 1996	45,80	3,30	Plaque foyer	-850	-700	-775	^{14}C	Après chauffe à 160°C	16 (16)	25.0	65.1	180	2.6	26.4	66.9	Moutmir, 1995
Lignat S2, plaque 10	Moutmir *et al.*, 1995	45,80	3,30	Plaque foyer	-850	-700	-775	^{14}C	Désaimantation thermique	8 (8)	33,7	68,9	484	2,3	36,1	70,3	Moutmir, 1995
Mairy, les Hautes Charvières	Marolle, 1986	49,00	5,00	Four	-800	-700	-750	Archeo	Test de viscosité	11 (11)	23,3	69,4	449	1,9	23,3	68,8	Moutmir, 1995
Issoire, le Brot, 2	Surmely, 2003	45,50	3,30	Four polynésien	-700	-600	-650	Archeo	Après chauffe à 160°C	2 (8)	22,0	73,0	483	1,6	24,6	74,7	Moutmir, 1995
St. Blaise		43,50	5,00	Four	-575	-550	-562,5	Archeo	Test de viscosité	11 (11)	0,5	65,6	2355	0,9	0,9	69,4	Bucur, 1994
Aspiran, Mas de Pascal, AFR6186	Pezin, A.	43,62	3,58	Four de potier	-525	-475	-500	Archeo	Désaimantation AF	17 (17)	9,9	69,5	398	1,8	11,7	72,8	Gallet et al., 2002
Aspiran, Mas de Pascal, AFR6416		43,62	3,58	Four de potier	-525	-475	-500	Archeo	Désaimantation AF	13 (13)	9,6	69,4	728	1,5	11,3	72,7	Gallet et al., 2002
Issoire, le Brot, 1	Surmely, 2003	45,50	3,30	Four polynésien	-750	-250	-500	^{14}C	Après chauffe à 160°C	9 (21)	21,6	69,1	961	1,4	23,5	71,0	Moutmir, 1995
Herblay "Gaillon-le-Bas" 1	Moutmir, 1994	49,00	2,20	Foyer	-530	-430	-480	Archeo	Après chauffe à 160°C	11 (11)	3,7	74,0	157	3,4	3,6	73,9	Moutmir, 1995
Herblay "Gaillon-le-Bas" 2		49,00	2,20	Foyer	-530	-430	-480	Archeo	Après chauffe à 160°C	9 (9)	10,4	71,1	295	1,7	10,3	71,0	Moutmir, 1995
Saint Florence	Sireix, 1989	44,80	0,00	Four de potier	-325	-275	-300	Archeo	Test de viscosité	11 (11)	-2,8	66,4	386	2,2	-3,3	69,2	Bucur, 1994
Aiguillon F4	Sireix *et al.*, 1994	44,30	0,30	Four de potier	-120	-80	-100	Archeo	Test de viscosité	19 (19)	2,6	64,1	1607	0,8	2,8	67,6	Bucur, 1994
Aiguillon F1+2+3	Sireix *et al.*, 1994	44,30	0,30	Four de potier	-120	-80	-100	Archeo	Test de viscosité	45 (45)	-2,4	62,4	1825	0,5	-2,6	65,9	Bucur, 1994
Montans 4		43,90	1,80	Four	-100	-80	-90	Archeo	Test de viscosité	11 (11)	-2,6	63,5	1696	1	-2,9	67,2	Bucur, 1994
Petit et Grand Lezat		46,00	3,30	Four	-100	-50	-75	Archeo	Test de viscosité	10 (10)	-7,9	65,7	931	1,5	-8,3	67,8	Bucur, 1994
Lagruere	Sireix *et al.*, 1994	44.40	0.20	Four de potier	-80	-40	-60	Archeo	Test de viscosité	14 (14)	-3.7	62.9	1797	0.9	-4.0	66.3	Bucur, 1994
Fréjus, pièce LVIII		43,47	6,75	Four	-41	-39	-40	Archeo	Test de viscosité	8 (8)	-6,4	64,3	1629	1,2	-6,8	68,5	Thellier, 1981
Limoux II, four II		43,10	2,30	Four	-20	-5	-12,5	Archeo	Test de viscosité	7 (7)	-0,3	62,0	625	2,1	-0,3	66,5	Thellier, 1981

Tableau 1.1 : Points de référence actuellement publiés pour la période protohistorique en France. Les points de la thèse de Moutmir (1995) ont été repris par Gallet et al. 2002. Les points acquis par Thellier (1981) et Bucur (1994) sont classés dans la catégorie des points certains (PC) de Bucur (1994).

Nom du site et de la structure ; référence archéologique ou sinon nom de l'archéologue responsable d'opération ; Latitude ; Longitude ; Type de structure ; Date minimum ; Date maximum ; Date moyenne ; Méthode de datation utilisée pour le calage chronologique ; Protocole de détermination de la direction d'aimantation ; Nombre de blocs (nombre d'échantillons) ; Déclinaison et inclinaison moyenne au site ; Paramètre de précison et erreur à 95% sur la direction moyenne (statistique de Fisher, 1953) ; Déclinaison et inclinaison à Paris ; Référence archéomagnétique

4.3 Les autres courbes de référence européennes

Les courbes de la variation séculaire de l'inclinaison et de la déclinaison durant le premier millénaire av. J.-C. ne sont pas mieux contraintes dans les autres pays d'Europe occidentale (Figure 1.7). Les données ne sont pas suffisamment importantes en Allemagne, Autriche et Italie et quasi inexistantes en Espagne. Le nombre de données est plus élevé au Royaume-Uni (39 points datés du premier millénaire av. J.-C.), mais la dispersion des données est très importante probablement en raison du calage chronologique imprécis ou incertain (Cf. les classes de Clark *et al.*, 1988) de certaines d'entre elles. En conséquence, les courbes de référence (Zananiri *et al.,* 2007) n'offrent pas une précision suffisante pour la datation ou pour le géomagnétisme.

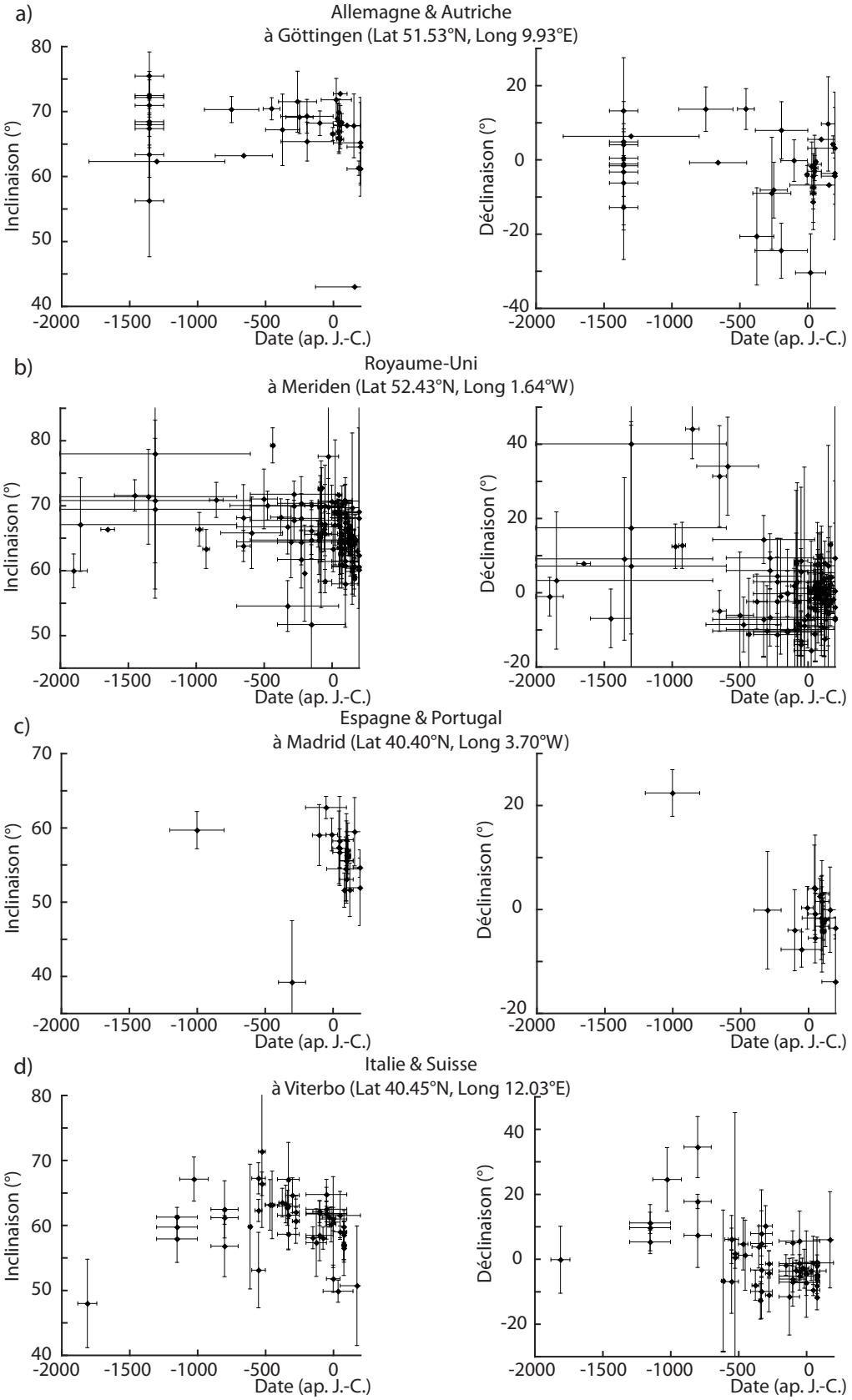
Ces ébauches de courbes montrent des caractéristiques communes de la direction du champ magnétique en l'Europe de l'Ouest au premier millénaire av. J.-C. :

- une faible variation de l'inclinaison,
- une forte variation de la déclinaison avec un maximum de 30 à 40° dans la première moitié du premier millénaire av. J.-C. Mais, des incertitudes demeurent sur l'amplitude de ce pic et sur le taux de variation séculaire de la déclinaison.

Les courbes d'Europe orientale, qui présentent les mêmes caractéristiques sont incomplètes (Figure 1.8) en Hongrie (Marton, 2010 pour les 2500 dernières années et Marton, 2009 pour les périodes protohistoriques) et en Grèce (Evans, 2006) avec une lacune de données au cours de la première moitié du premier millénaire av. J.-C.. Les courbes des Balkans (Bulgarie et Serbie) restent les mieux définies en Europe (Kovacheva, 1997 ; Kovacheva *et al.*, 2009a ; Donadini *et al.,* 2010) avec 26 données (acquises par le laboratoire de Sofia) recensées pour le dernier millénaire av. J.-C.. Ce millénaire n'est cependant pas la période la plus riche en données de référence de ces courbes qui couvrent les huit derniers millénaires.

Figure 1.7 (page suivante) : Variation de la direction du champ magnétique terrestre en Europe occidentale. a) en Allemagne et en Autriche (Schnepp et al., 2005 ; Aidona et al., 2006). b) au Royaume-Uni (Clark et al., 1988 ; Batt, 1997 ; Zananiri et al., 2007) c) dans la péninsule ibérique (principalement Gomez-Paccard et al., 2006b, plus Ruiz-Martinez et al., 2008 ; Catanzariti et al., 2008) et d) en Italie (Tema et al., 2006 ; Evans et Hoye, 2005 ; Hill et al., 2007) et en Suisse (Kovacheva et al., 2004). Les données sont relocalisées aux points

de référence de chaque pays. La compilation des données est issue de la base Geomagia50v2 (Donadini et al., 2009).



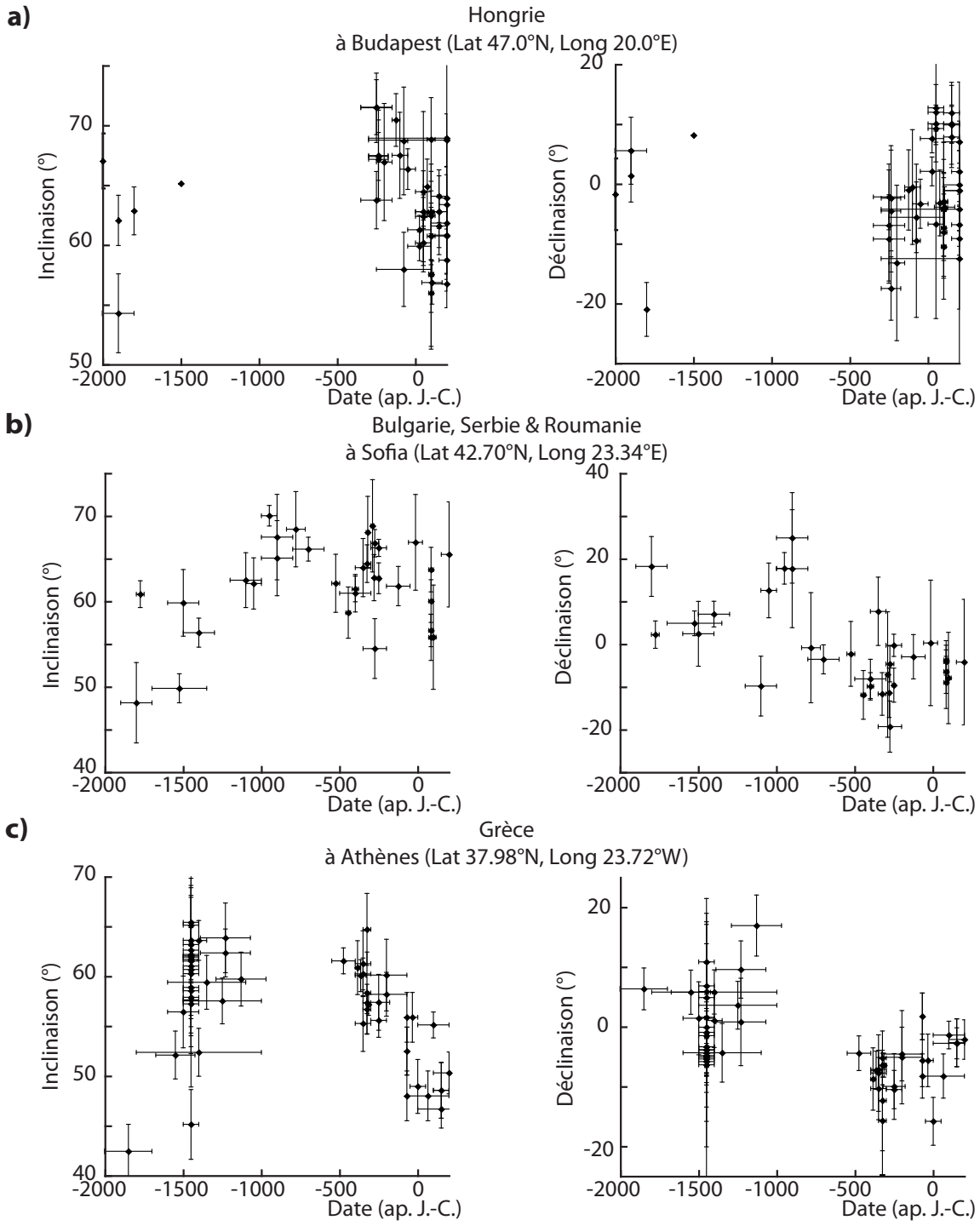


Figure 1.8 : Variation de la direction du champ magnétique terrestre en Europe orientale. a) données de référence hongroises (Marton, 2009 et Marton, 2010). b) données de référence du laboratoire de Sofia (Bulgarie, Serbie, Kovacheva et al., 2009a et Donadini et al., 2010) et données roumaines (Deux points Suteu et al, 2008, Aitken et Hawley, 1966. c) données de référence grecques (Evans, 2006).

Ainsi, excepté en Bulgarie, le premier millénaire av. J.-C. reste une période mal couverte en données de référence archéomagnétiques. Les ébauches de courbes mettent cependant en évidence des variations très importantes de la déclinaison dans la première moitié du premier millénaire av. J.-C. Aussi, cette période apparaît très propice à la datation archéomagnétique et il est nécessaire d'acquérir de nouvelles données fiables et bien calées chronologiquement.

5. La variation séculaire de l'intensité en Europe occidentale

La variation de l'archéointensité est moins bien connue que celle de la direction, car les protocoles d'acquisition sont plus complexes (Thellier-Thellier, 1959 et ses dérivés) et nécessitent du matériel archéologique avec une minéralogie magnétique stable et constituée de grains monodomaines (Levi, 1977). L'absence d'évolutions minéralogiques au cours des chauffes doit être contrôlée par des bouclages (pTRM-checks). Il est aussi désormais bien établi que les déterminations d'archéointensité (Chauvin *et al.*, 2000 ; Gomez-Paccard *et al.*, 2008) doivent être corrigées des effets de l'anisotropie d'aimantation thermo-rémanente (Veitch *et al.*, 1984 ; Rogers *et al.*, 1993) et des effets de la vitesse de refroidissement (Fox et Aitken, 1980).

5.1 Connaissances sur la variation de l'intensité du champ géomagnétique en Europe occidentale

Durant les deux dernières décennies, les données respectant ces critères sont devenues progressivement de plus en plus nombreuses en Europe sud-occidentale (Figure 1.9a). Les archéointensités sont obtenues sur du matériel en place (Chauvin *et al.*, 2000 ; Gomez-Paccard *et al.,* 2006c, 2008 ; Hill *et al.*, 2007) ou plus fréquemment sur du matériel déplacé comme les briques (Tema *et al.*, 2009 ; Sapin *et al.*, 2008), les carreaux de pavement (Genevey *et al.*, 2009) ou les céramiques (Genevey et Gallet, 2002 ; Genevey *et al.*, 2009). Une courbe couvrant les deux derniers millénaires a récemment été proposée par Gomez-Paccard *et al.* (2008) avec l'ensemble des données publiées en Europe occidentale (jusqu'au Danemark, Gram-Jensen *et al.*, 2000). Les données sont pondérées en fonction du type de matériel, du nombre d'échantillons, du protocole de paléointensité utilisé et des corrections appliquées (suivant Chauvin *et al.*, 2000).

Le nombre de données de référence apparaît désormais suffisant pour espérer utiliser l'archéointensité à des fins de datation (Gallet *et al.*, 2009a ; Gomez-Paccard *et al.*, 2008 ; Schnepp *et al.*, 2009). Pour les 800 dernières années, la résolution actuelle des données permettrait aussi d'affiner notre connaissance des variations du dipôle axial g_1^0 (Genevey *et al.*, 2009 ; Hartmann *et al.*, 2011). La variation durant le haut Moyen-Âge, apparemment forte et rapide, est progressivement mieux contrainte (Tema *et al.*, 2009 ; Sapin *et al.*, 2008 ; Gallet *et al.*, 2009a).

Pour le premier millénaire av. J.-C., les données corrigées de l'anisotropie et de la vitesse de refroidissement se limitent (Figure 1.9a) à des données italiennes datées du I^{er} siècle av. J.-C. (site d'Albinia, Hill *et al.*, 2007) et du VII^{ème} siècle av. J.-C. (Hill *et al.*, 2008 et Gallet *et al.*, 2009a). Les autres données non corrigées de l'anisotropie et/ou de la vitesse de refroidissement montrent une dispersion parfois très importante (Figure 1.9b). Les données les plus fiables sont les valeurs corrigées de l'anisotropie par le tenseur d'ATR (Hedley et Wagner, 1991) ou par le tenseur de l'ARA, Aimantation Rémanente Anhystérétique (Kovacheva *et al.*, 2004). Le tenseur de l'anisotropie d'ARA est en effet proche du tenseur d'anisotropie d'ATR (Chauvin *et al.*, 2000). Il a aussi été montré que la correction d'anisotropie par le tenseur de l'Anisotropie de Susceptibilité Magnétique (AMS) est considérablement sous-estimée (Chauvin *et al.*, 2000). Ceci explique sans doute la forte dispersion des archéointensités de la péninsule ibérique (Burakov *et al.*, 2006 ; Nachasova et Burakov, 2009, Figure 1.9b), d'autant plus qu'elles sont réalisées sur des tessons céramiques habituellement fortement anisotropes.

Ces données de qualité variable montrent que de fortes variations de l'archéointensité sont attendues au premier millénaire av. J.-C. Un maximum serait observé entre 800 et 600 av. J.-C. avec des valeurs d'environ 90µT à Paris. Ces valeurs, doubles des valeurs actuelles (48µT), seraient les plus élevées des dix derniers millénaires, d'après les données de paléointensité relative obtenues sur les sédiments lacustres de Scandinavie (Snowball *et al.*, 2007). Il apparaît nécessaire d'acquérir de nouvelles données absolues d'archéointensité pour mieux définir ces fortes variations.

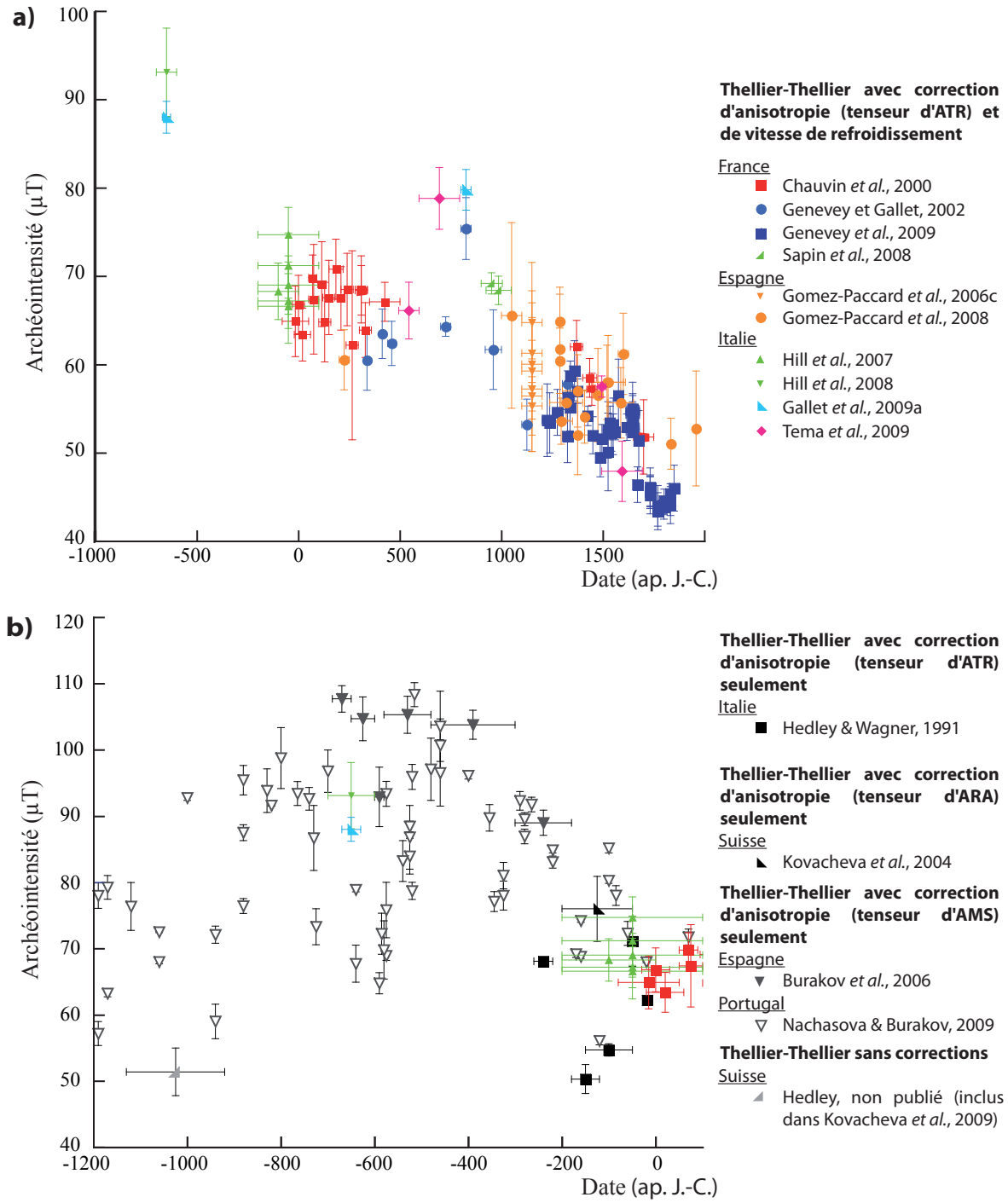


Figure 1.9 : Variation de l'intensité du champ magnétique terrestre en Europe occidentale (France, Italie, Suisse et péninsule Ibérique). a) Archéointensités corrigées des effets de l'anisotropie d'aimantation thermorémanente (ATR) sur les trois derniers millénaires. b) Ensemble des archéointensités (protocoles de double chauffe) publiées au premier millénaire av. J.-C. Toutes les archéointensités sont relocalisées à Paris par la méthode du VADM (Virtual Axial Dipole Moment).

5.2 La variation de l'intensité du champ géomagnétique en Méditerranée orientale

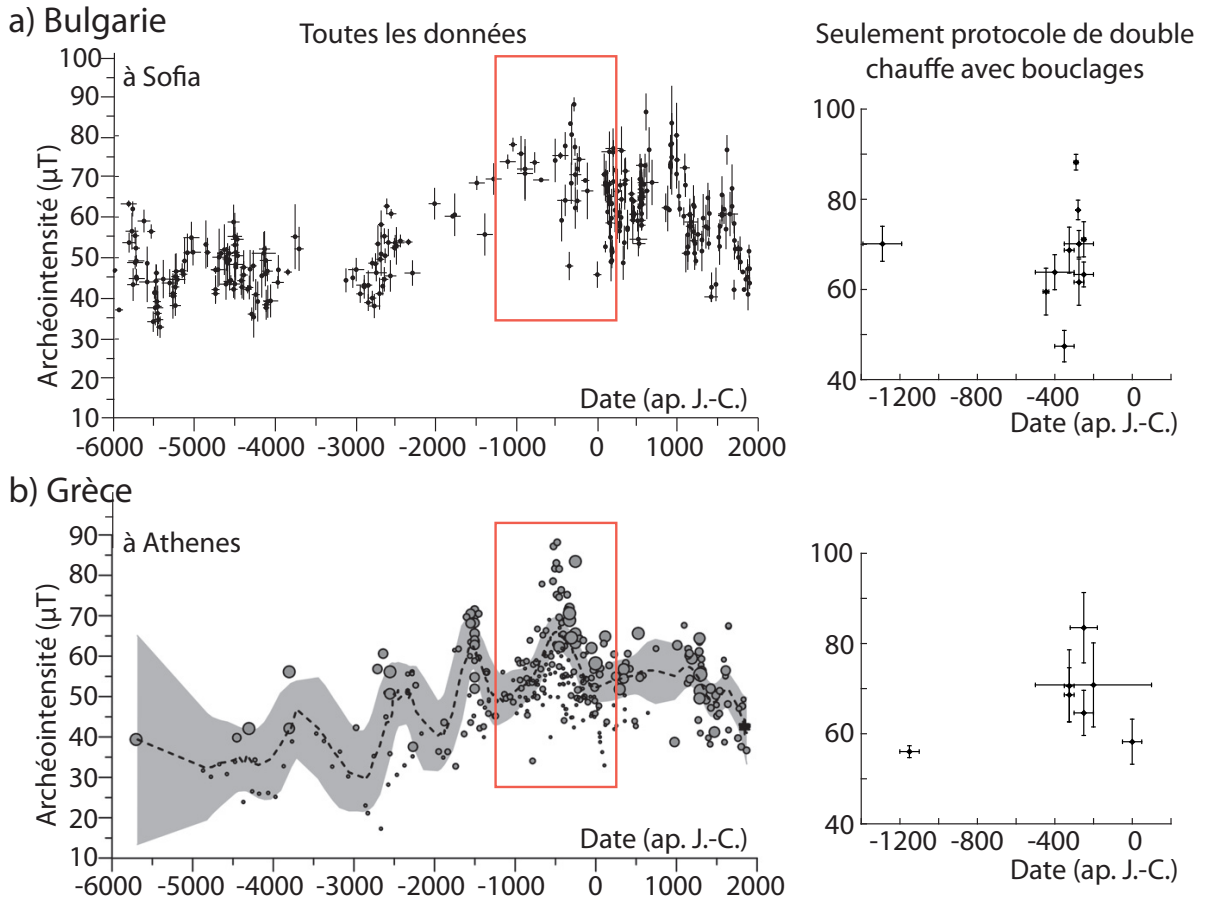


Figure 1.10 : Variation de l'archéointensité en Europe orientale a) d'après les données du laboratoire de Sofia (données de Bulgarie et de Serbie, Kovacheva et al., 2009a) et b) d'après les données grecques (De Marco et al., 2008 ; Kovacheva et al., 2000). La courbe grecque avec son enveloppe d'erreur à 95% est calculée par la statistique hiérarchique bayésienne avec pondération (La taille des points est proportionnelle à la qualité de la donnée) des données en fonction du type de matériel, du protocole utilisé et du nombre d'échantillons (Chauvin et al., 2000). A droite, sont uniquement représentées les données déterminées par les protocoles de double chauffe avec bouclages.

Le nombre d'archéointensités de référence est beaucoup plus élevé en Bulgarie (Kovacheva *et al.*, 2009a) et en Grèce (De Marco *et al.*, 2008), où des courbes ont été proposées pour les huit derniers millénaires (Figure 1.10). La qualité des données, anciennement acquises, est néanmoins très variable et généralement mauvaise : seules 11 données bulgares et 7 données grecques sont déterminées par les protocoles de double chauffe avec bouclages. Les variations déduites des courbes de référence sont

donc à prendre avec précaution. Le système de pondération établi par Chauvin *et al.* (2000) appliqué à la Grèce illustre la dispersion engendrée par les données de qualité médiocre, qui tendent à sous-estimer l'archéointensité (Figure 1.10b).

En revanche, des archéointensités corrigées de l'anisotropie d'ATR et de la vitesse de refroidissement ont été publiées pour le Proche-Orient (Figure 1.11) sur des céramiques de Syrie (Genevey et Gallet, 2002 ; Gallet et Le Goff, 2006) ou d'Iran (Gallet *et al.*, 2006). Ces données montrent un maximum d'archéointensité vers 800 av. J.-C. La variation de l'archéointensité a également été étudiée avec une haute résolution temporelle sur des scories de cuivre datées du début du premier millénaire av. J.-C. (Ben-Yosef *et al.*, 2008 ; Ben-Yosef *et al.*, 2009 ; Shaar *et al.*, 2011a) : ces études mettent en évidence des *maxima* brefs (de l'ordre de la dizaine d'années) de l'intensité, appelés *spikes*.

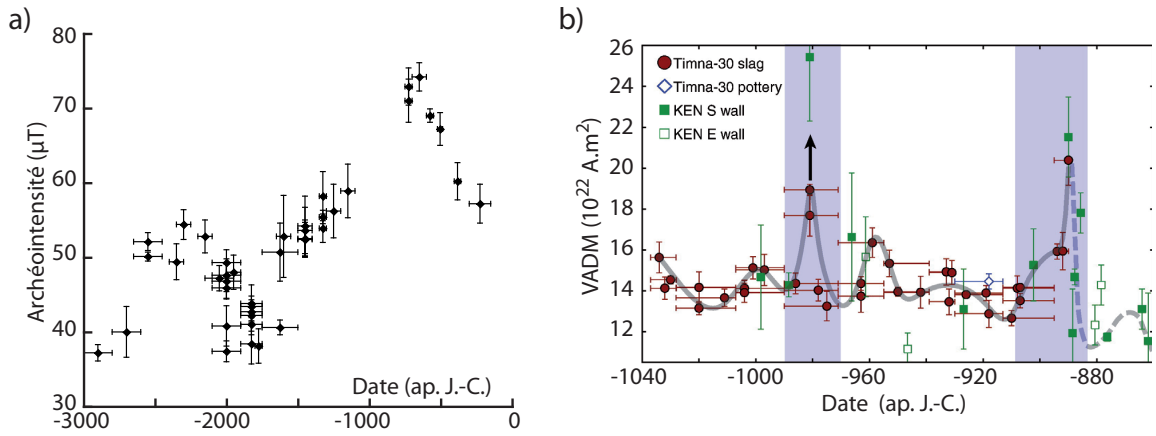


Figure 1.11 : Variation de l'archéointensité au Proche-Orient. a) Données de Syrie (Genevey et Gallet, 2003 ; Gallet et Le Goff, 2006) et d'Iran (Gallet et al., 2006) sur des céramiques. Les archéointensités sont relocalisées à Mari (Syrie, Lat : 34.5°N, Long : 40.9°E) par la correction du VADM. b) Variation du moment dipolaire axial virtuel (VADM) déduit des données de Jordanie et d'Israël (Ben-Yosef et al., 2008 ; Ben-Yosef et al., 2009 ; Shaar et al., 2011a) sur des scories de cuivre (D'après Shaar et al., 2011a).

Grâce à ces données fiables, la variation de l'archéointensité au premier millénaire av. J.-C. apparaît donc mieux déterminée au Proche-Orient qu'en Europe. Cependant, les données d'archéodirection sont très rares dans cette aire géographique avec seulement quatre points publiés pour les deux derniers millénaires av. J.-C. (plus précisément entre 1850 et 750 av. J.-C., Speranza *et al.*, 2006).

Synthèse des données publiées datées du premier millénaire av. J.-C.

Aucun ensemble de courbes de variation séculaire de la direction et de l'intensité n'est donc complet, fiable et précis en Europe et au Proche-Orient pour le premier millénaire av. J.-C.. Les données existantes indiquent de très fortes variations de la déclinaison et de l'archéointensité pendant cette période, qui semble donc particulièrement propice :

- à la datation archéomagnétique,
- aux études géomagnétiques : Quelle est l'ampleur et la vitesse de la variation séculaire au cours de cette période ? Comment expliquer ces fortes variations : quelle est la part des composantes dipolaire et non-dipolaire du champ géomagnétique ? A quels mouvements de flux dans le noyau externe pourraient correspondre de telles variations ?

Pour apporter quelques éléments de réponse, la variation séculaire à la fois de l'archéodirection et de l'archéointensité doit être déterminée plus précisément dans une même aire géographique, en acquérant de nouvelles données fiables du point de vue du calage chronologique et du protocole d'acquisition. La France et plus largement l'Europe occidentale sont une zone propice pour atteindre cet objectif, car les fouilles sur les sites archéologiques du premier millénaire av. J.-C. sont nombreuses notamment grâce au développement récent de l'archéologie préventive.

Chapitre 2

Le premier millénaire av. J.-C. : contexte et chronologie

Au cours de ce travail, de nombreux sites français datés du premier millénaire av. J.-C. ont été étudiés pour affiner les variations du champ magnétique terrestre. Il semble important de replacer ces sites dans leur contexte « historique ». Du point de vue de la chronologie, le premier millénaire av. J.-C. comprend la fin de l'âge du Bronze, puis l'âge du Fer à partir de 800 av. J.-C., suivant le système des trois âges de Thomsen établi en 1836. L'âge du Fer est divisé en un premier et un second âge du Fer, aussi appelés périodes de Hallstatt et de la Tène en Europe nord-alpine. Le premier millénaire av. J.-C. finit en « France » par les trois premières décennies de l'époque gallo-romaine, dont le début est fixé par l'avènement d'Auguste (27 av. J.-C.) et la réorganisation impériale du territoire. La première partie de ce chapitre présente l'évolution des sociétés au cours du millénaire, alors que la deuxième s'attache à la chronologie et à ses méthodes.

Le cadre géographique de cette étude archéomagnétique est limité à la France actuelle. Pour le premier millénaire av. J.-C., le Midi est généralement opposé au reste du territoire actuel sur des arguments archéologiques (comme les différences dans l'organisation du territoire, l'importance des relations avec le monde méditerranéen) et environnementaux (comme le changement du climat et de la végétation, qui conditionnent les matériaux disponibles pour la construction). L'état actuel de la documentation archéologique indique cependant que l'évolution des sociétés dans le Nord et dans le Midi est assez semblable (Verdin, 2006) ou du moins pas aussi différente

que ne le laisse supposer l'organisation de l'archéologie française héritée du XIXème siècle et du début du XXème siècle. Ce point de vue a été souligné par Christian Goudineau « Pour leur archéologie, la coupure entre [les deux zones] me paraît correspondre en grande partie à l'histoire de la recherche » (Goudineau, 1998a, page 83) et par la table-ronde d'Antibes en 1986 (Duval *et al.*, 1990). Les premières recherches sur le Midi protohistorique, très proches de l'archéologie classique, étaient principalement focalisées sur son intégration dans le domaine méditerranéen par le biais de la colonisation grecque (Benoît, 1965 par exemple) et non sur le fonctionnement des sociétés autochtones comme dans le « Nord ». Dans le cadre de mon travail, la distinction entre les deux aires géographiques se justifie par des systèmes chronologiques et des approches méthodologiques différents. Le Midi est défini par le littoral méditerranéen (bande littorale d'environ 100 km) du Roussillon à Nice (Figure 1.12, suivant Garcia, 2004). Le « Nord », défini par l'ensemble du territoire français excepté cette bande littorale, ne forme pas une zone homogène avec un Centre-Est (de la vallée du Rhône à la Champagne et du Berry à l'Alsace) très dynamique. Les principaux phénomènes sociaux du premier millénaire av. J.-C., décrits dans ce chapitre, concernent cette aire géographique. Les particularismes des littoraux atlantiques et de la Manche, où sont situés quatre sites de notre corpus seulement, seront en revanche peu évoqués.

L'évolution des sociétés est retracée presqu'exclusivement par les données archéologiques. Les sources textuelles grecques ou latines (Polybe, Posidonios, Strabon et *De Bello Gallico* de César) sont rares et écrites au cours des IIème et Ier siècles av. J.-C.. De plus, la partialité de ces textes vis-à-vis des populations locales (appelées Celtes ou Gaulois) n'est plus à démontrer (Goudineau, 1990 pour le commentaire de *La guerre des Gaules*). Les premières fouilles « modernes » ont été menées dans la seconde moitié du XIXème siècle, notamment sous l'impulsion de Napoléon III, dans un contexte de nationalisme exacerbé. Plus que d'autres périodes, le premier millénaire av. J.-C. a profité du développement de l'archéologie, notamment préventive, depuis les années 70s : ceci a permis de renouveler considérablement la chronologie et notre vision de ces sociétés.

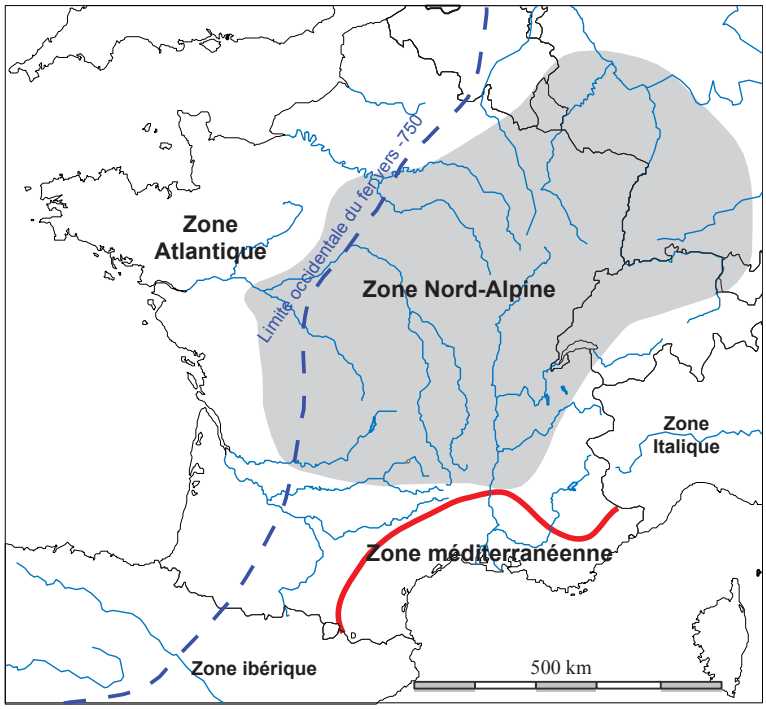


Figure 1.12 : Localisation des zones géographiques au Bronze final. Le trait continu marque la limite de la zone méditerranéenne (Midi) définie dans ce travail. (D'après Carozza et Marcigny, 2007 et Buchsenschutz, 2007)

1. Cadre « culturel » du premier millénaire av. J.-C.

Sauf mention contraire, cette partie est une synthèse des ouvrages généraux récemment publiés sur l'âge du Bronze (Carozza et Marcigny, 2007) et sur l'âge du Fer (Brun et Ruby, 2008 ; Buchsenchutz, 2007). Pour le Midi, l'ouvrage de référence utilisé est Garcia (2004).

1.1 De -1000 à -600 : la transition âge du Bronze – âge du Fer

Au début du millénaire, trois entités géographiques, présentes dès 1600 av. J.-C. sont distinguées par leur mobilier archéologique (Figure 1.12) :

- un complexe Nord-alpin, également appelé RSFO (Rhin-Suisse/France Orientale), qui tend à se développer vers l'Ouest. Jusqu'aux années 80, ce complexe était associé à la culture des Champs d'Urnes, suivant la terminologie allemande instaurée par Wolfgang Kimmig (1951-1954).
- un complexe atlantique sur les littoraux de l'Ecosse à l'Andalousie.

- un complexe méditerranéen, au croisement de plusieurs influences continentales, ibériques et italiques (Ligures notamment).

A l'âge du Bronze, les relations commerciales s'effectuent de manière privilégiée selon un axe Est-Ouest en raison de la présence de minerais d'étain dans les îles britanniques. A l'âge du Fer, l'axe commercial Nord-Sud devient prépondérant. Le début de l'âge du Fer est fixé par convention vers 800 av. J.-C.. Contrairement aux idées avancées au XIX^{ème} siècle (où la culture matérielle était associée à un peuple), la transition n'est ni brutale, ni liée à l'arrivée de nouvelles populations. La transition progressive se produit lors de « l'horizon de Gündlingen » (Pare, 1991) et s'illustre notamment par la typologie des épées de Gündlingen et de Mindelheim, qui montre un passage par étapes de l'utilisation du bronze au fer (Brun *et al.*, 2009). Mais cette apparition du fer dans la seconde moitié du VIII^{ème} siècle, spatialement généralisée, reste limitée aux objets de prestige. Malgré ses meilleures propriétés mécaniques, le fer n'est utilisé pour les outils agricoles qu'à partir du III^{ème} siècle av. J.-C.. La transition entre l'âge du Bronze et l'âge du Fer est également marquée entre 850 et 750 av. J.-C. par une péjoration climatique, qui explique probablement l'abandon des stations palafittiques des lacs alpins caractéristiques de l'âge du Bronze final (Billaud *et al.*, 1992). La transition se caractérise aussi par le développement de certains artisanats, comme la production du sel sur le site éponyme de Hallstatt et dans la vallée de la Seille par exemple. Aux IX^{ème} et VIII^{ème} siècles, on observe un passage progressif des pratiques d'incinération à l'inhumation (notamment sous tumulus).

Dans le Midi, le IX^{ème} siècle av. J.-C. (Bronze final) se caractérise par l'installation de véritables communautés villageoises (Garcia, 2004 évoque même une proto-urbanisation), comme sur le plateau du Cayla à Mailhac. Ce phénomène, qui marque un essor démographique et une structuration sociale plus développée, est également observé en Espagne et dans le Nord de l'Italie. Les agglomérations du sud de la France sont cependant abandonnées au VII^{ème} siècle av. J.-C., qui se caractérise par un habitat très dispersé. Aucune discontinuité n'est cependant visible dans le mobilier et les nécropoles (la nécropole du Grand Bassin I à Mailhac continue par exemple à être occupée). Le « Nord » connaît une évolution similaire, mais de moindre ampleur : les fortifications de hauteur caractéristiques du Bronze Final sont également abandonnées à la même période.

1.2 De -600 à -450 : la fin du premier âge du Fer et les premiers contacts méditerranéens

Dans le Midi, les premiers contacts avec les commerçants méditerranéens se produisent à partir de 700 av. J.-C. avec les Phéniciens, puis à partir de 650 av. J.-C. avec les Etrusques et les Grecs. Ces contacts s'intensifient après la fondation de Marseille vers 600 av. J.-C. et celle d'*Emporion* (Ampurias) vers 580 av. J.-C..

Ces évènements semblent avoir une influence prépondérante sur le développement de l'urbanisation aux VI^{ème} et V^{ème} siècles d'abord sur le littoral puis progressivement dans l'arrière-pays (Arcelin, 1992 ; Garcia, 2004). Il apparaît des agglomérations fortifiées indigènes, qui sont réoccupent des sites du Bronze final comme Mailhac ou sont des fondations comme Ruscino (fondé vers 600 av. J.-C., Marichal et Rébé, 2003), Béziers et Lattes (fondé vers 520 av. J.-C.). L'agglomération de Lattes (*Lattara*) montre que l'urbanisation s'est également réalisée sous l'influence étrusque (Lebeaupin et Séjalon, 2008). Les plans des villes en lanières (exemple de Martigues, Chausserie-Laprée et Nin, 1987) et des habitats restent originaux par rapport aux modèles méditérranéens. L'évolution sans rupture des typologies témoigne également de la continuité des sociétés indigènes, qui occupent ces agglomérations.

Au Nord, la même période (VI^{ème} et V^{ème} siècles av. J.-C., Hallstatt final) est aussi caractérisée par des changements sociaux de grande ampleur (Figure 1.13), particulièrement à la périphérie Nord des Alpes, de la Bohême au Centre de la France (Les zones littorales atlantique et de la Manche ne semblent pas concernées.). C'est la période des « résidences princières » et des « tombes princières », dont la richesse témoigne d'une hiérarchisation plus complexe de la société par rapport aux siècles précédents : une aristocratie, contrôlant de vastes territoires centralisés, semble émerger. Les sites les plus connus sont Bourges (Augier *et al.*, 2007), Vix (Bourgogne, Chaume et Mordant, 2011) et la Heuneburg (Bade-Würtemberg, Kimmig, 1983). Des premières agglomérations sont construites avec des remparts, dont la fonction semble plus ostentatoire que défensive, et des bâtiments prestigieux comme les bâtiments absidiaux du Mont Lassois (Chaume et Mordant, 2011). Des agglomérations à forte composante artisanale se développent également telles que Bourges et Lyon-Vaise (Bellon, 2003). Dans l'artisanat céramique, le Hallstatt final est marqué par l'apparition du tour lent (Augier, 2004).

L'émergence de cette aristocratie et de ces agglomérations semble liée à l'accroissement des contacts avec les sociétés méditerranéennes, dont témoignent le mobilier céramique et métallique prestigieux (le cratère de Vix fabriqué en Grande Grèce en est l'exemple le plus évocateur). Les sites « princiers » sont en effet géographiquement peu éloignés de la Méditerranée et à proximité des voies de communication Nord-Sud (cols alpins et vallées du Rhône et de la Saône, Figure 1.13). La complexification sociale s'explique sans doute aussi par des facteurs internes, mal cernés par l'archéologie.

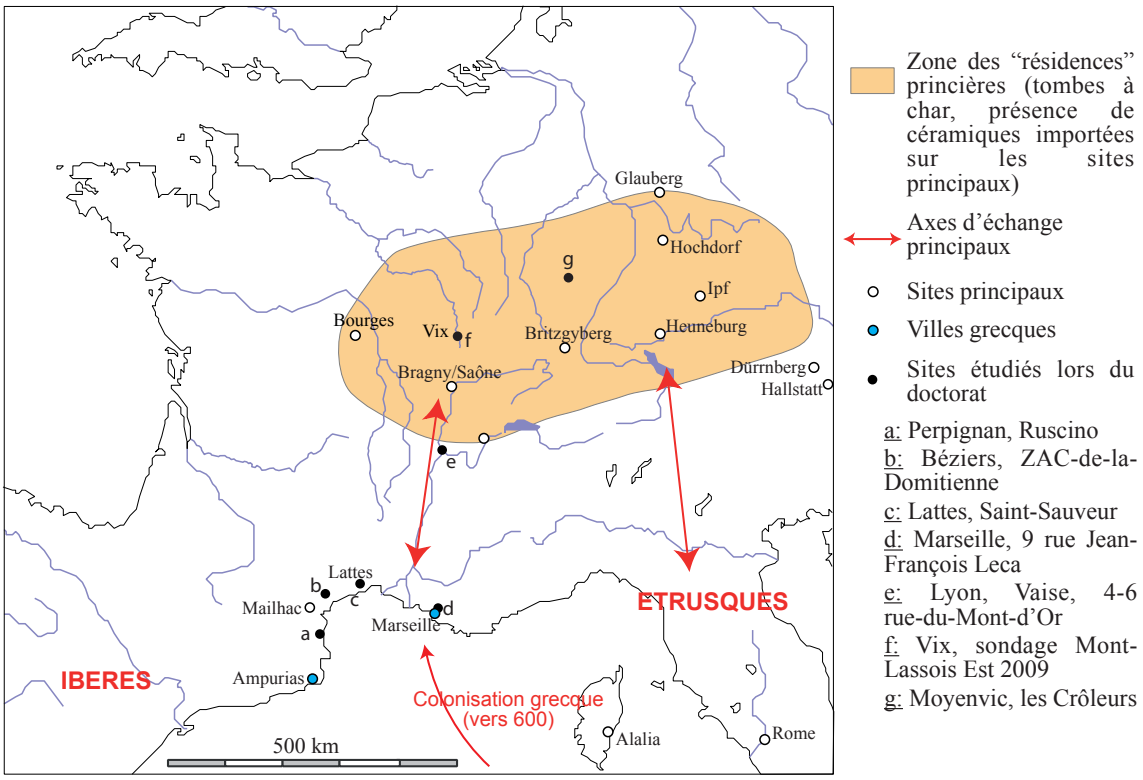


Figure 1.13 : Carte synthétique de l'âge du Fer en « France » entre 600 et 450 av. J.-C. avec localisation des sites étudiés par archéomagnétisme (d'après Buchsenchutz, 2007).

A l'inverse du Midi, cette société hallstattienne pré-urbanisée décline vers -450, de manière rapide et presque contemporaine sur l'ensemble de la zone. Les « résidences princières » de Vix et de la Heuneburg sont abandonnées, les tombes à char sont moins riches mais plus nombreuses. Ceci marquerait une nouvelle organisation sociale, avec un partage du pouvoir et des richesses. En parallèle, on observe au V^{ème} siècle un développement de la périphérie septentrionale de la zone des « principautés » hallstattiennes, c'est-à-dire de la Champagne à la Hesse (Figure 1.14). Les raisons du

déclin des « principautés » sont très discutées. Les spécialistes avancent des conflits entre principautés, des conflits sociaux au sein des principautés ou des modifications du commerce méditerranéen. Les commerçants méditerranéens auraient cherché à contourner les « princes », devenus trop exigeants, au profit de la périphérie septentrionale (Brun et Chaume, 1997) ou d'autres axes commerciaux, comme la Garonne (Séguier et Vidal, 1992).

1.3 De -450 à -200 : le début du second âge du Fer

Au début du second âge du Fer, les riches sépultures et habitats se répartissent en effet entre la Champagne et l'Allemagne centrale (Figure 1.14). Le nombre de tombes, qui sont parfois concentrées dans des nécropoles très vastes (Münsingen, Bobigny), indiquerait un essor démographique. Leur mobilier, souvent constitué d'armes, montre l'importance d'une classe guerrière. Ce phénomène est peut-être associé aux mouvements de migration vers le monde méditerranéen aux IV^{ème} et III^{ème} siècles. Ces migrations, qui laissent des souvenirs traumatisants dans les populations méditerranéennes (prise de Rome en 386 av. J.-C. et de Delphes en 280 av. J.-C.), s'apparentent à des razzias et l'installation reste peu durable exceptée en Italie du Nord et en Asie Mineure (Galatie). Ces migrations, puis le mercenariat dans les armées méditerranéennes, semblent avoir eu d'importantes conséquences sur l'économie des sociétés celtiques, notamment sur leur monétarisation : les premières monnaies celtiques, des imitations de statères d'or (de Philippe II de Macédoine notamment), sont attestées dès la fin du IV^{ème} siècle av. J.-C. (Pion, 2008).

La connotation guerrière de la société se manifeste aussi par la multiplication à la fin du IV^{ème} siècle de sanctuaires caractérisés par l'exposition de trophées guerriers (Brunaux, 1986). Les exemples les plus connus sont les sites de la Tène (lac de Neuchâtel), Gournay-sur-Aronde (Oise) et Ribemont-sur-Ancre (Somme). Dans le Midi, le culte du guerrier dans les sanctuaires s'exprime différemment avec une grande importance de la statuaire. Les sanctuaires méridionaux sont situés en contexte urbain, comme à Roquepertuse (sous la forme d'un portique, Boissinot et Lescure, 1998) et pourraient parfois être à l'origine du développement des agglomérations, surtout en Provence et en Languedoc oriental (Garcia, 2004).

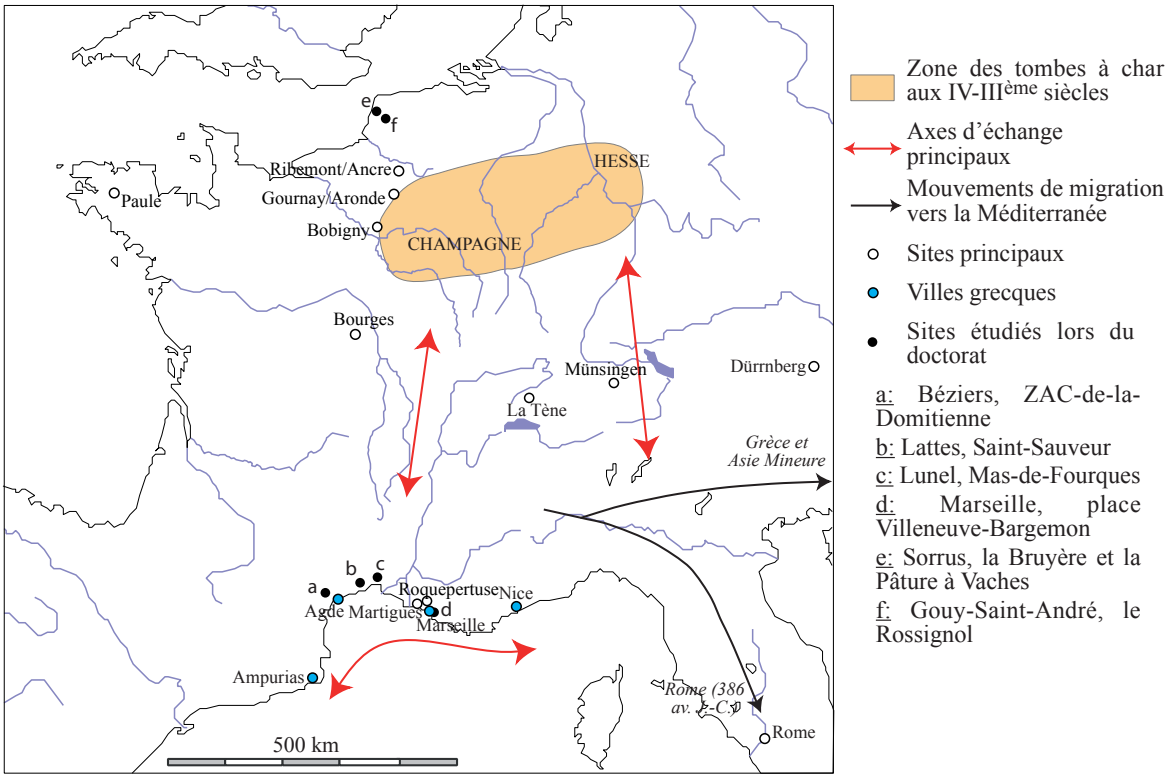


Figure 1.14 : Carte synthétique de l'âge du Fer en « France » entre 450 et 200 av. J.-C. avec localisation des sites étudiés par archéomagnétisme (d'après Buchsenchutz, 2007).

Au « Nord », le début du second âge du Fer est également marqué par une intensification de l'agriculture (liée à l'utilisation du fer dans les outils) et de l'artisanat. Par exemple, l'artisanat du sel connaît un essor important sur les littoraux (Daire, 2003) comme dans le Pas-de-Calais (Cf. les sites de Gouy-Saint-André le Rossignol et de Sorrus étudiés en archéomagnétisme). L'habitat est très dispersé : les habitats ruraux, entourés de fossés (on parle d' « enclos »), sont très nombreux (Lorho *et al.*, 2007) depuis les petits établissements jusqu'aux grandes fermes à caractère aristocratique comme Paule (Côtes d'Armor). Les activités artisanales se déroulent dans de petites unités associées aux pratiques agricoles.

En revanche, les habitats isolés sont rares dans le Midi (Mauné, 1998). Le réseau des agglomérations constitué au VI^{ème} siècle se consolide au début du second âge du Fer. Les plans parfois élaborés des habitats, comme à Lattes, indiquent une différentiation sociale accrue. L'artisanat et l'agriculture connaissent aussi dans le Midi un développement considérable, dont témoignent les fours de potiers (Cf. les fours de Lunel Mas-de-Fourques, Béziers ZAC-de-la-Domitienne étudiés dans ce travail). Les échanges

commerciaux sont réalisés presqu'exclusivement avec les Grecs de Marseille, qui ont fondé plusieurs comptoirs sur le littoral, Nice et Agde par exemple.

1.4 De -200 au changement d'ère : la fin de l'âge du Fer et l'intégration politique au monde méditerranéen

Au « Nord », les changements économiques amorcés aux IV^{ème} et III^{ème} siècles s'accroissent au II^{ème} et surtout au I^{er} siècle avant J.-C. avec une diversification et une spécialisation des activités agricoles et artisanales. L'émergence d'une classe de commerçants est également perceptible par les importations italiques, telles que la céramique campanienne et les amphores Dressel 1. Ces amphores attestent du commerce du vin, qui était notamment consommé au cours de banquets attestés par les textes antiques et l'archéologie (Poux, 2004). Le développement du commerce est associé à la monétarisation progressive de l'économie grâce à la mise en circulation de monnaies de bronze coulé (appelées potins) et de monnaies d'argent alignées sur le denier romain (dans la zone du denier formé par les cités des Eduens, des Lingons et des Séquanes).

Contrairement aux siècles précédents, ces activités artisanales et commerciales se développent dans des agglomérations (Figure 1.15), d'abord dans des agglomérations ouvertes, puis dans des agglomérations fortifiées appelées *oppida* suivant la terminologie de César (*De bello gallico*). Les agglomérations ouvertes sont fondées en plaine à partir du début du II^{ème} siècle : les activités agricoles prédominent à Acy-Romance (Ardennes, Lambot et Méniel, 1992) et les activités artisanales à Levroux (Indre, Buchsenschutz *et al.,* 2000) et Feurs (Loire, Vaginay et Guichard 1988). Fondées à partir de la seconde moitié du II^{ème} siècle, les agglomérations fortifiées, qui sont appelées *oppida* suivant la terminologie de César (*De bello gallico*) sont souvent situées sur une hauteur ou sur un éperon à un confluent ou un méandre. (Fichtl, 2005). Ces agglomérations présentent des espaces publics, des quartiers résidentiels, des quartiers d'artisans et des espaces de culte. Leur organisation interne, leur taille et leurs fonctions diversifiées justifient de qualifier certains de ces *oppida* de villes celtiques (Fichtl, 2005 ; Kaenel, 2006). Les exemples les plus emblématiques sont le Mont-Beuvray (Bibracte, Dhennequin *et al.* 2008), le Titelberg (Luxembourg, Metzler 1995) et Manching (Bavière,

Sievers 2003). De nombreux fours ou foyers étudiés en archéomagnétisme lors de ce doctorat proviennent d'*oppida* : Mont-Beuvray, Gondole et Chateaumeillant.

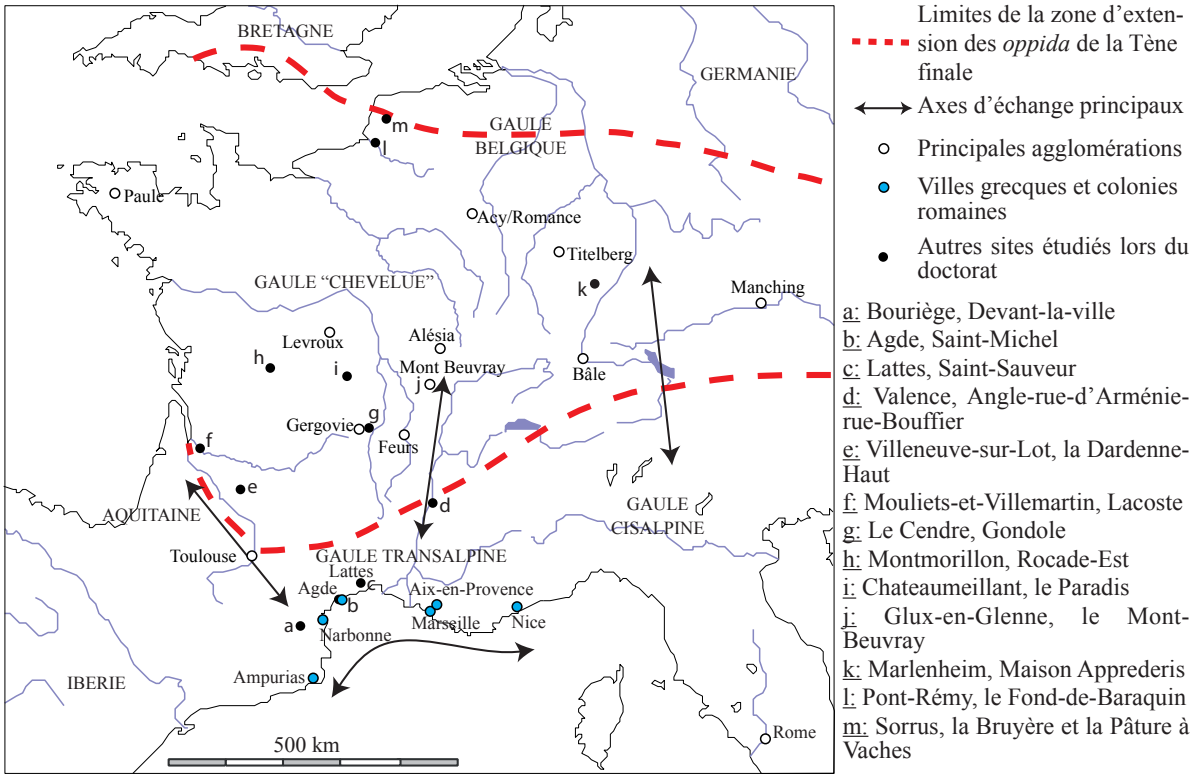


Figure 1.15 : Carte synthétique de l'âge du Fer en « France » entre 200 et 0 av. J.-C. avec localisation des sites étudiés par archéomagnétisme (d'après Buchsenchutz, 2007).

Cette urbanisation du monde celtique pendant la Tène finale témoigne d'une organisation administrative accrue du territoire, caractérisée par la création d'unités territoriales, dont le découpage sera globalement repris par les cités gallo-romaines. (Figure 1.16). Les textes antiques mentionnent l'existence d'élites dirigeantes et la tenue d'assemblées publiques pour administrer ces nouvelles entités territoriales. Ces nouveautés du monde celtique semble être l'aboutissement d'un processus interne, amorcé dès le début de la période laténienne avec l'accroissement des activités économiques et commerciales. Mais, ces phénomènes sociaux concernent particulièrement le Centre-Est de la Gaule (notamment les cités des Bituriges, des Eduens, des Arvernes et des Séquanes). La Gaule Belgique, l'Armorique et l'Aquitaine semblent être en marge de ces nouveautés. Les très nombreuses découvertes d'enclos en archéologie préventive indiquent cependant que la Gaule celtique reste essentiellement rurale au moment de l'intégration dans le monde romain.

Figure 1.16 : Cartographie des cités gauloises à l'époque de César (d'après Fichtl, 2006, p.42). Les limites sont basées sur celles des diocèses médiévaux.

En Gaule méridionale, l'organisation politique du territoire est également perceptible avec la création de magistratures de type municipal (Verdin, 2006). Les agglomérations affichent des caractères urbains de plus en plus affirmés avec une monumentalisation des espaces publics comme à Nîmes. Les productions agricoles augmentent particulièrement avec le développement des fermes indigènes, qui préfigurent les *villae* gallo-romaines (Mauné, 1998). La création des premiers parcellaires atteste aussi de cette densification de l'espace rural en Gaule méridionale.

Les II^{ème} et I^{er} siècles marquent l'intégration progressive de la Gaule dans le monde politique romain. Les évènements historiques, bien connus par les différents

textes antiques, restent peu perceptibles en archéologie, mis à part sur les sites d'Alésia (Réddé, 2003) et de Gergovie. La Gaule méridionale est conquise entre 125 et 118 av. J.-C. suite à l'appel de Marseille menacée par ses voisins (les Salyens notamment). Une nouvelle province est créée, la Gaule Transalpine (Figure 1.16). Les textes évoquent ensuite plusieurs rébellions des populations locales, notamment lors de l'invasion des Cimbres et des Teutons entre 113 et 102 av. J.-C.. La Gaule non-méditerranéenne, qualifiée de Gaule chevelue, est conquise par les armées de César entre 58 et 51 av. J.-C. lors de la guerre des Gaules (Goudineau, 2000). Ces évènements historiques ne créent pas de rupture apparente dans l'organisation du territoire et dans la culture matérielle aussi bien dans le Midi que dans le « Nord » de la Gaule, où le développement des *oppida* se poursuit. Dans le Midi, on peut mentionner la création de colonies comme Narbonne, d'autres nouvelles villes comme Aix-en-Provence et d'une nouvelle voie de communication : la *Via Domitia*. La romanisation se produit véritablement après l'avènement d'Auguste (27 av. J.-C.), qui met en place l'organisation administrative de la Gaule en provinces divisées en cités. L'intégration rapide de la Gaule au monde romain est une preuve supplémentaire de l'importance des contacts économiques avec Rome et de l'organisation des sociétés autochtones avant la conquête.

2. Etablissement de la chronologie au premier millénaire av. J.-C. : concepts et limites

Cette « histoire de France » au premier millénaire av. J.-C. a bénéficié d'avancées archéologiques très importantes depuis une trentaine d'années, notamment au niveau de la chronologie. Deux exemples illustrent particulièrement le renouvellement de notre perception de ces sociétés. Premièrement, la chronologie de la Tène finale a été totalement remaniée suite aux fouilles extensives d'*oppida* ou d'agglomérations ouvertes de la fin du second âge du Fer (Cf. la synthèse de Colin, 1998). Deuxièmement, la statuaire protohistorique du Midi de la Gaule (Goudineau, 1998b), supposée caractéristique des III^{ème} et II^{ème} siècles av. J.-C., date finalement des VI^{ème} et V^{ème} siècles par comparaison avec les exemplaires découverts à Vix et au Glauberg (Hesse).

Le cadre chronologique du premier millénaire av. J.-C. n'est donc pas figé et est encore susceptible d'évoluer considérablement avec de nouvelles découvertes

archéologiques. La présentation du cadre historique dans la section précédente montre que l'évolution des sociétés doit être affinée et calée au mieux sur l'échelle calendaire, ce qui nécessite une amélioration des chronologies archéologiques et des méthodes de datation chronométrique. Par exemple, ceci permettrait d'une part de mieux saisir les différences régionales et d'autre part de valider ou infirmer les théories, notamment vis-à-vis du monde méditerranéen, sur l'émergence et la disparition des résidences princières, sur l'émergence ou le déclin des *oppida*. Le lien entre des évènements historiques méditerranéens et l'évolution des sociétés septentrionales est particulièrement débattu (Brun, 2008 ; Verger, 2008). Stéphane Verger propose par exemple de relier l'évolution mouvementée des différentes résidences princières à des conflits dans le monde méditerranéen, dont les conséquences sur les réseaux commerciaux semblent majeures : un exemple est la bataille d'Alalia vers 540 av. J.-C., qui voit la défaite des Phocéens de Marseille face aux Etrusques et Carthaginois. Comme le prévient l'auteur, ce schéma reste encore hypothétique au vu de l'imprécision et du caractère flottant de la chronologie nord-alpine. Cependant, l'amélioration des chronologies et la mise en place de nouvelles méthodes devraient à terme permettre de tester la fiabilité de ces théories. Un autre point crucial est la relation entre l'évolution interne des *oppida* et la conquête de la Gaule par César. Par exemple, sur le Mont-Beuvray, le complexe basilical monumental de la Pâture-du-Couvent est actuellement daté entre 60 et 30 av. J.-C. environ (Szabo *et aL*, 2007). Cette datation montre la précocité de l'adoption des techniques méditerranéennes sur cet *oppidum*, mais l'intervalle de date doit être affiné pour préciser l'antériorité, la contemporanéité ou la postériorité de la construction de cet édifice exceptionnel par rapport à la guerre des Gaules.

Mon travail de doctorat s'inscrit dans cette approche d'amélioration de la chronologie du premier millénaire av. J.-C. en « France », pour aider à mieux saisir l'évolution des sociétés protohistoriques et les relations avec les évènements historiques du monde méditerranéen. Les sections suivantes présentent l'état actuel des chrono-typologies et des méthodes chronométriques pour le premier millénaire av. J.-C.

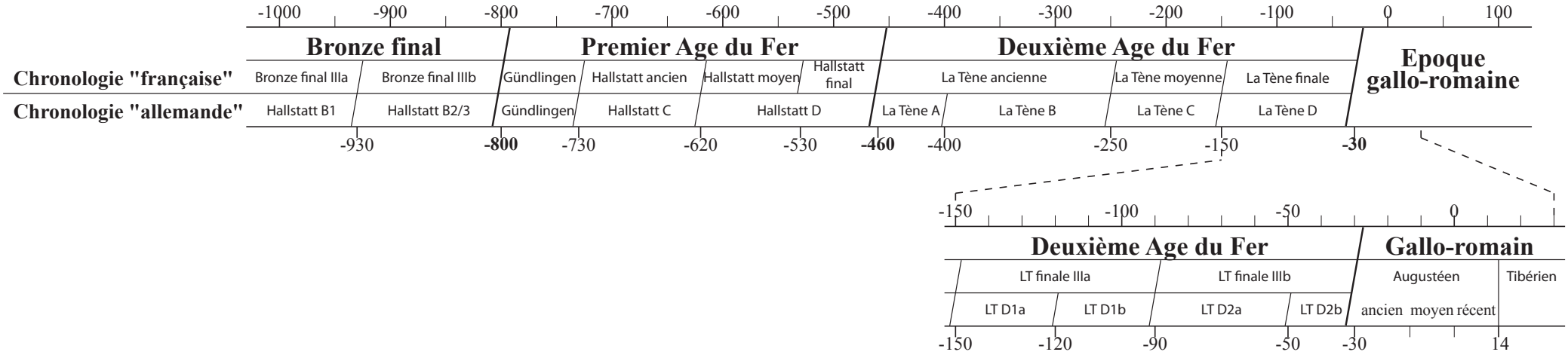
2.1 Les systèmes chronologiques du premier millénaire av. J.-C.

L'approche de la chronologie est différente dans le Midi, qui utilise préférentiellement la chronologie calendaire (Py, 1993a) et en France septentrionale, où la datation repose majoritairement sur les chronologies relatives (Figure 1.17a). Dans le Midi, le calage des chronologies relatives sur l'échelle calendaire est facilité par l'abondance des mobiliers datants, principalement constitués des céramiques fines d'importation. Une chronologie relative générale a cependant été établie (Py, 1993b, Figure 1.17b), mais elle reste peu utilisée. La chronologie définie sur le site de Mailhac (Taffanel *et al.*, 1998) sert aussi parfois de référence, particulièrement pour la première moitié du premier millénaire av. J.-C.

Au « Nord », deux systèmes chronologiques ont été mis en place depuis la fin du XIX^{ème} siècle, l'un par l'école allemande et l'autre par l'école française (Figure 1.17a). L'historiographie de ces systèmes, dont ce paragraphe tente d'en présenter un résumé, est complexe (Colin, 1998 ; Kaenel, 2008). Les sites utilisés proviennent majoritairement de la partie nord-alpine (Centre Est de la France, Suisse, moitié sud de l'Allemagne), qui est le centre de l'Europe « celtique ». D'autres systèmes sont utilisés pour les régions périphériques comme les îles Britanniques. Les deux systèmes français et allemand reposent sur la distinction entre un premier et un second âge du Fer, respectivement nommés périodes de Hallstatt et de la Tène depuis les travaux d'Hildebrand (1872). Les deux systèmes sont établis non pas par le mobilier céramique comme dans le Midi, mais par le mobilier métallique découvert dans les nécropoles (les tombes ayant l'avantage d'être des ensembles clos), telle la nécropole de Münsingen-Rain sur le plateau suisse (Hodson, 1968). Les mobiliers utilisés sont principalement les épées (surtout au premier âge du Fer) et les fibules ou autres parures (particulièrement au second âge du Fer). Pour la fin du second âge du Fer, le mobilier des sites d'habitat est aussi utilisé particulièrement dans le système français. Dans les deux écoles, les associations des mobiliers sont étudiées en fonction de la stratigraphie verticale ou horizontale (analyse de la distribution spatiale dans le temps).

Le système allemand, qui est le plus utilisé, est basé sur une division quadripartite de chaque période définie par le style des objets : Hallstatt A/B/C/D et la Tène A/B/C/D. Les Hallstatt A et B sont rattachés au Bronze final et les Hallstatt C et D au premier âge du Fer. Ce système a été mis en place par Reinecke (1902, rééd. 1965).

a) Gaule non méditerranéenne



b) Gaule méditerranéenne

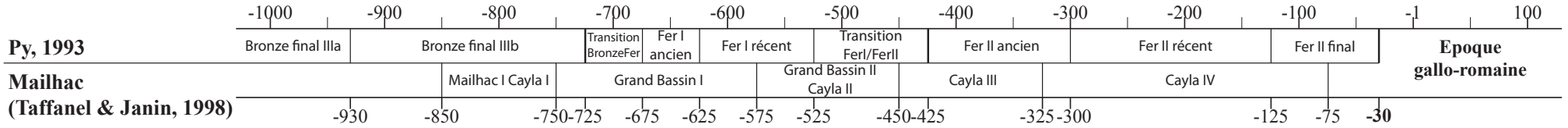


Figure 1.17 : Chronologies relatives du premier millénaire av. J.-C. pour le « Nord » et le « Midi » de la France actuelle. Les dates limites les plus couramment rencontrées dans la littérature ont été choisies.

Le système français a été établi par Déchelette (1914) à partir principalement des fibules et se base sur une division tripartite de chaque période, qui semblait alors plus adaptée à la partie occidentale de l'Europe celtique (c'est-à-dire la France). Sa nomenclature reprend celle de Reinach (1899), la Tène I/II/III, plutôt que la nomenclature de Tischler (1885), la Tène ancienne/moyenne/finale.

Les deux systèmes ont été considérablement améliorés depuis le début du XX^{ème} siècle avec la mise en place de subdivisions (Hatt et Roualet, 1977 pour le système français ; Krämer, 1962 et Polenz, 1982 pour le système allemand) et un meilleur calage calendaire des transitions entre les périodes. Ces améliorations ont été rendues possibles par l'analyse de nouveaux sites et l'utilisation de nouvelles méthodes, comme l'analyse statistique par sériation des mobiliers archéologiques (Vaginay et Guichard, 1988) et la dendrochronologie (Kaenel, 1990 ; Billamboz, 2004). La Figure 1.18 (Colin, 1998) illustre l'amélioration des chronologies relatives pour la Tène finale.

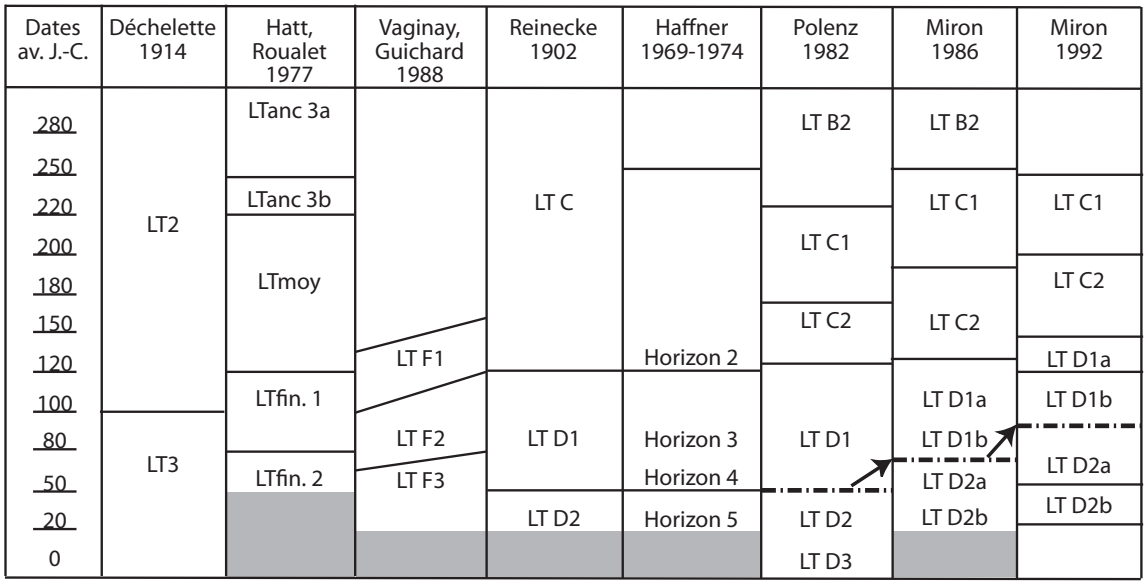


Figure 1.18 : Evolution des systèmes chronologiques de la fin de l'âge du Fer. (d'après Colin, 1998, p. 20). Le vieillissement de la chronologie laténienne est notamment illustré par les traits pointillés en gras. Les limites entre phases n'ont pas significativement varié depuis Miron (1992).

La chronologie relative de la Tène finale a considérablement été améliorée entre 1970 et 2000 grâce à des chronologies régionales comme celle de la région de Trèves (Haffner, 1974 ; Miron, 1986 et 1992). Les transitions entre les phases ont été vieillies,

particulièrement la transition La Tène D1/D2 qui a été repoussée de presque 50 ans. Les chronologies basses se fondaient principalement sur les monnaies, dont l'évolution chrono-typologique définie par Colbert de Beaulieu (1973) fixait vers 50 av. J.-C. le début de la Tène D2. Les découvertes archéologiques notamment à Bâle (Furger-Gunti, 1979) et les premières analyses dendrochronologiques (Haffner, 1979 ; Kaenel, 1990) ont remis en cause ce modèle (Polenz, 1982) et finalement les monnaies s'avèrent être plus des mobiliers à dater que des mobiliers véritablement datant (Guichard *et al.*, 1993 ; Pion, 2008).

Cet exemple de la Tène finale met ainsi en évidence, d'une part le caractère flottant des systèmes chronologiques établis avec le mobilier (particulièrement pour la Gaule non-méditerranéenne) et d'autre part l'importance de la contribution des méthodes chronométriques, en l'occurrence la dendrochronologie. Le système chronologique de la Tène finale n'a pas été remis en cause par les nouvelles découvertes depuis une quinzaine d'années et semble désormais fiable à 10 ans près (Colin, 1998 ; Kaenel, 2008). La tendance actuelle de la recherche est peut-être d'adopter une approche différente de la datation : les systèmes de phases successives présentent en effet le défaut, outre la complexité de leurs nomenclatures, d'être parfois difficiles à corréler entre eux et selon les régions. Collis (2008) propose plutôt de dater par horizon d'apparition de marqueurs spécifiques (un objet, un décor...), comme l'apparition des amphores Dressel 1b sur un *oppidum*. L'exemple de la Tène Finale permet aussi d'illustrer les confusions qui peuvent résulter de l'utilisation des différentes terminologies. Au premier millénaire av. J.-C., l'exemple le plus frappant est peut-être l'âge du Bronze final (Wirth, 2009), pour lequel il n'y a pas forcément de correspondances entre les différents systèmes chronologiques utilisés (Müller-Karpe, 1959 ; Hatt, 1961 ; Sperber, 1987).

Pour les siècles précédents du premier millénaire av. J.-C., la situation est plus contrastée et les systèmes chronologiques sont encore susceptibles d'évoluer considérablement, particulièrement aux débuts du premier (Hallstatt C) et du second âge du Fer (La Tène A et B), pour lesquels la documentation archéologique est plus lacunaire (Barral et Piningre, 2009). La chronologie absolue de l'âge du Bronze final est relativement bien connue et fiable, notamment dans l'Est de la France, le Sud de l'Allemagne et en Suisse grâce à la confrontation des analyses dendrochronologiques des

stations palafittiques et des données typologiques des nécropoles (David-Elbiali et Moinat, 2005). A la fin du premier âge du Fer (Hallstatt D), une périodisation fine peut être établie sur certains sites telle la Heuneburg (Kurz, 2006). Cependant, à plus large échelle, les dates des limites entre phases ne font pas encore l'unanimité. Par exemple, le passage du Hallstatt D3 à la Tène A1 est majoritairement daté vers 450-440 av. J.-C. (Chaume et Reinhardt, 2009), mais des dates plus anciennes sont aussi avancées vers 480 av. J.-C. (Milcent, 2007) et même vers 520 av. J.-C. (Trachsel, 2004). Les controverses sur la datation de la tombe de Vix (Rolley, 2003) et notamment la datation de ses objets importés (Verger, 2008) illustrent les faiblesses de la chronologie absolue pour cette période de transition entre les premier et second âges du Fer.

Ainsi, les systèmes chronologiques semblent plutôt fiables pour la fin du premier millénaire av. J.-C., mais restent perfectibles pour les siècles précédents. La raison principale est la rareté du mobilier datant, particulièrement dans les régions périphériques (comme le Nord de la Gaule, Masse et Toron, 2008), alors que la situation dans le Midi semble plus propice. Cette incertitude des chronologies s'explique aussi par les difficultés de mise en œuvre des méthodes chronométriques pour le premier millénaire av. J.-C.

2.2 Les méthodes chronométriques (radiocarbone et dendrochronologie) au premier millénaire av. J.-C.

Dans ce mémoire, les méthodes chronométriques désignent les méthodes également qualifiées de datation absolue ou de datation physico-chimique, qui sont des termes inappropriés car certaines méthodes dépendent de l'environnement (radiocarbone, dendrochronologie, archéomagnétisme) ou ne nécessitent pas de mesure physique ou chimique (dendrochronologie).

La méthode de datation chronométrique la plus utilisée, le radiocarbone, est moins informative pour le premier millénaire av. J.-C. que pour d'autres périodes en raison d'effets de plateaux de la courbe de calibration dendrochronologique (Reimer *et al.*, 2009) entre 800 et 400 av. J.-C., puis entre 380 et 200 av. J.-C. (Figure 1.19). Ces plateaux donnent des intervalles de date calibrée larges jusqu'à 400 ans. Cette incertitude est malheureusement intrinsèque à la méthode et une amélioration future de

la résolution des courbes de calibration ne pourra sans doute pas aboutir à une amélioration significative de la précision des intervalles de date calibrée (Blackwell *et al*, 2006). A cause de cette incertitude, le radiocarbone reste peu utilisé pour dater les sites du premier millénaire av. J.-C. Pourtant, l'accumulation d'analyses peut apporter des éléments nouveaux grâce à la « modélisation chronologique », comme le montre l'exemple de la datation de l'art celtique en Grande-Bretagne (Garrow *et al.*, 2009). Sur un seul site ou une aire géographique, la modélisation chronologique, basée sur la statistique bayésienne, synthétise les résultats de datation chronométrique ou archéologique avec les observations de chronologie relative (stratigraphie). Ce traitement permet d'obtenir une chronologie absolue aussi précise que possible et avec une quantification des incertitudes (Bayliss, 2009 ; Cassen *et al.*, 2009 ; Lanos et Dufresne, 2012).

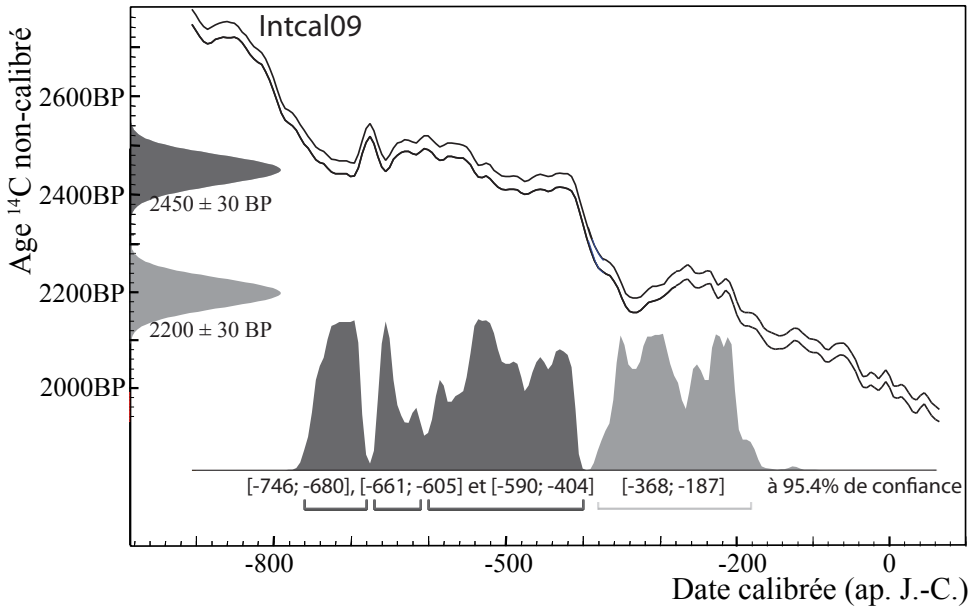


Figure 1.19 : Courbe de calibration dendrochronologique des âges radiocarbone (IntCal09, Reimer et al., 2009) et effets plateaux au premier millénaire av. J.-C.

Les effets de plateau sont dus à de fortes diminutions de la production de radiocarbone dans l'atmosphère (Figure 1.20). La variation de la production du radiocarbone est liée à la variation de l'activité solaire et à la variation du moment dipolaire. La modulation géomagnétique s'exprimerait principalement sur les variations à long-terme à des échelles de temps supérieures à 500 ans (Bard, 1998 ; Snowball et Muscheler, 2007). Pour le premier millénaire av. J.-C., les effets de plateau, corrélés à des péjorations climatiques, correspondent à des diminutions fortes et rapides de la

production de radiocarbone (Reimer *et al.*, 2004), qui sont probablement liées à l'activité solaire (Van Geel *et al.*, 1998 ; Chambers *et al.*, 2007). Mais, le manque actuel de données d'archéointensité ne permet pas non plus d'exclure l'hypothèse d'une influence conjointe du champ géomagnétique.

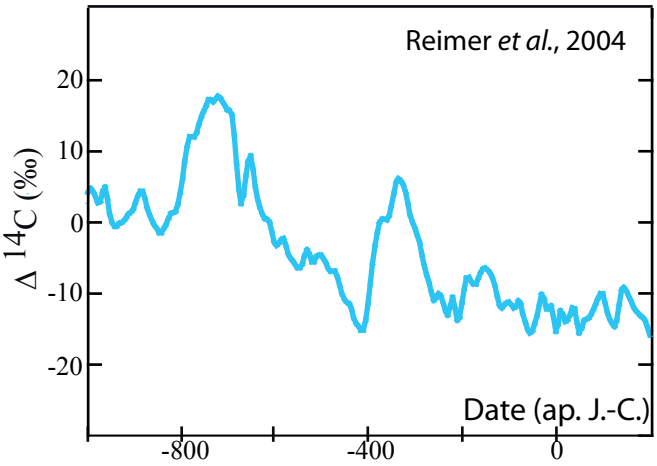


Figure 1.20 : Variation de la production du radiocarbone atmosphérique au premier millénaire av. J.-C.

La dendrochronologie nécessite pour chaque essence d'arbre la construction de référentiels régionaux. En France, le référentiel le mieux défini est celui du chêne pour le Nord et le Centre de la France car il a été récemment révisé (Durost et Lambert, 2007). Une nouvelle séquence, *Classic Oaks*, a été construite entre 546 av. J.-C. et 193 ap. J.-C. (Figure 1.21), à partir de 74 chronologies de sites acquises par 7 laboratoires. En raison d'une lacune à l'époque mérovingienne, cette chronologie a été calée sur l'échelle calendaire, par corrélation (par *wiggle matching*) avec les chronologies plus complètes du laboratoire de Trèves (Hollstein, 1980) et du sud de l'Allemagne (laboratoire de Stuttgart, Friedrich *et al.*, 2004). La qualité des données est particulièrement bonne entre 300 av. J.-C. et 100 ap. J.-C. (Durost et Lambert, 2005), ce qui permet de réaliser des analyses de dendroclimatologie ou de macro-écologie en plus de la datation.

Dans le Nord et le Centre de la France, aucun référentiel ne couvre le premier âge du Fer, qui est une période problématique en raison de la rareté des matériaux notamment dans les dépôts fluviatiles (Billamboz, 2008). Cette période est également moins documentée dans les référentiels allemands : la chronologie d'Hollstein (1980) a par exemple due être révisée à plusieurs reprises (Friedrich et Hennig, 1996). Le Bronze final et la transition avec l'âge du Fer sont en revanche mieux connus grâce aux

sépultures et aux stations palafittiques d'Allemagne méridionale et de Suisse comme Hauterive (Borello, 1993). La datation en 778 av. J.-C. de la tombe de Wehringen en Bavière (Hennig, 1995), qui est considérée d'après son mobilier comme la première tombe à char caractéristique du premier âge du Fer, est un exemple emblématique du potentiel de la dendrochronologie pour améliorer le calage des chrono-typologies sur la chronologie absolue au premier millénaire av. J.-C. (David-Elbiali et Dunning, 2005).

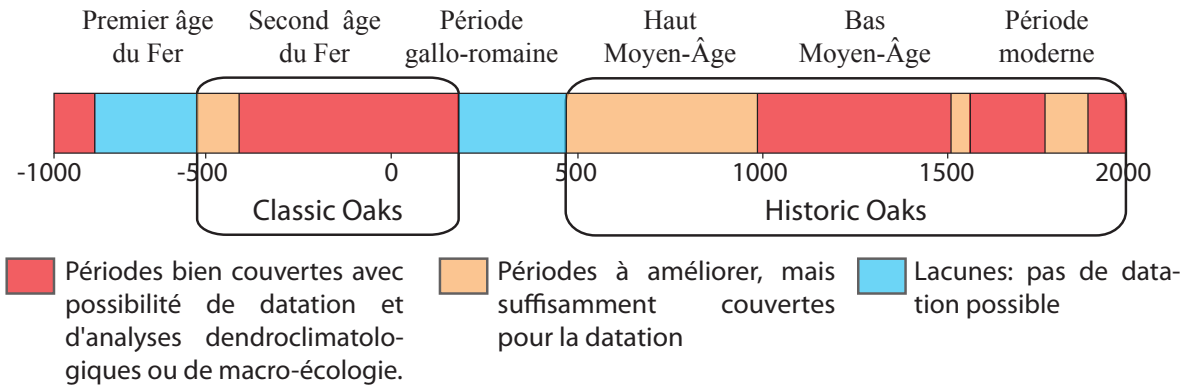


Figure 1.21 : Etat du référentiel dendrochronologique du chêne pour le Nord et le Centre de la France (d'après Lambert, 2008). Ce référentiel est le plus utilisé pour la datation dendrochronologique.

Malgré ces lacunes par rapport aux référentiels suisses et allemands, l'état de la documentation dans le Nord et le Centre de la France est dans tous les cas meilleur que dans le Midi. En effet, l'absence de référentiel dans le Midi nécessite de dater par corrélation avec les chronologies septentrionales (Guibal, 1998 ; Guibal et Pomey, 2004) et il en découle une fiabilité moindre des résultats de datation.

Conclusion : Le besoin d'un nouvel outil chronologique pour le premier millénaire av. J.-C.

Les deux méthodes chronométriques les plus utilisées en archéologie sont donc actuellement limitées pour la datation des sites du premier millénaire av. J.-C. et particulièrement du premier âge du Fer. La dendrochronologie a eu un apport fondamental dans l'amélioration récente des systèmes chronologiques de la fin de l'âge du Fer. L'extension à moyen terme du référentiel dendrochronologique du Nord et du Centre de la France à la première moitié du premier millénaire av. J.-C. aura

probablement un impact sur la chronologie aussi considérable que ceux apportés par les référentiels de Suisse et d'Allemagne du Sud notamment pour l'âge du Bronze final (David-Elbiali et Dunning, 2005). En revanche, le problème des effets de plateau, qui limitent l'efficacité de la datation radiocarbone au premier millénaire av. J.-C., ne pourra sans doute pas être résolu.

Pour mieux caler les chronologies relatives sur l'échelle calendaire et pour mieux dater les sites archéologiques pauvres en mobilier, il apparaît donc fondamental de développer un nouvel outil de datation chronométrique pour le premier millénaire av. J.-C. : l'archéomagnétisme.

Conclusion de la partie I

Objectifs de la thèse

En France et plus largement en Europe durant le premier millénaire av. J.-C., les courbes de variation séculaire sont actuellement limitées par le faible nombre de données de référence fiables. Le principal objectif de ce travail est donc l'acquisition de nouvelles données de référence pour améliorer ou étendre les courbes de variation séculaire de l'archéodirection et de l'archéointensité en France et en Europe occidentale. Les implications de ce travail sont d'ordre géomagnétique et archéologique.

Intérêts en géomagnétisme

Les données de référence déjà publiées pour le premier millénaire av. J.-C. (Gallet *et al.*, 2002 ; Hill *et al*., 2007 et 2008 ; Gallet *et al.*, 2009a) laissent supposer une très forte variation séculaire, particulièrement pour la déclinaison et l'archéointensité. L'enjeu est de contraindre ces variations : comment varient relativement l'archéodirection et l'archéointensité ? quels sont les taux de variation séculaire ?

Ces fortes variations soulèvent aussi des questions sur leur origine : Quelles sont les variations correspondantes du pôle geomagnétique virtuel et du moment dipolaire ? Quelle est la part des variations de la composante dipolaire et celles de la composante non-dipolaire ? Ces variations sont-elles liées à des mouvements de flux particuliers à l'interface noyau-manteau ?

Intérêts en archéologie

En raison de ces fortes variations, l'archéomagnétisme pourrait s'avérer être une méthode de datation très efficace pour le premier millénaire av. J.-C. et constituerait

alors une alternative aux lacunes des référentiels dendrochronologiques et aux problèmes du radiocarbone. La datation archéomagnétique serait applicable aux sites archéologiques présentant des structures foyères et pauvres en mobilier ou pour lesquels les chrono-typologies régionales restent incertaines.

D'autre part, la chronologie du premier millénaire av. J.-C. et notamment de la première moitié du millénaire reste encore discutée. L'archéomagnétisme pourrait alors apporter des informations importantes au calage des systèmes chronologiques sur l'échelle calendaire.

Données et méthodes utilisées

Quarante-sept structures provenant de 26 sites archéologiques en France ont été étudiées par archéomagnétisme dans le cadre de cette thèse (Figure 2.1 et Tableau 2.1). Les structures en place ont été prioritairement analysés : les fours et les foyers permettent en effet de caractériser les trois composantes du champ géomagnétique, inclinaison, déclinaison et archéointensité. Pour les matériaux déplacés, c'est-à-dire les terres cuites architecturales et les céramiques, seule l'archéointensité peut être déterminée.

Nous avons accordé une importance toute particulière au calage chronologique des structures étudiées. Les protocoles de traitement de l'aimantation les plus fiables ont été utilisés. Les archéodirections ont été déterminés par désaimantation thermique et/ou par champ alternatif et les archéointensités par le protocole de Thellier-Thellier. Les effets d'anisotropie et de vitesse de refroidissement ont en général été estimés et si besoin appliqués aux archéodirections et aux archéointensités.

Deuxième partie :

Données et méthodologie

Cette deuxième partie présente les différentes structures étudiées, puis la méthodologie du calage chronologique des structures, du traitement de l'aimantation rémanente naturelle et de la construction des courbes de référence. Les 47 nouvelles structures sont décrites dans le chapitre 3, intitulé **Corpus des nouveaux sites**. Le système de numérotation des structures et des spécimens est explicité en annexe 2. Le contexte archéologique et les résultats archéomagnétiques obtenus sur chacune des structures sont détaillés en annexe 3.

Le chapitre 4 intitulé **La datation des nouvelles structures de référence : enjeux, méthodes et limites** présente la méthodologie suivie pour la datation des structures de référence par des méthodes archéologiques ou chronométriques indépendantes de l'archéomagnétisme.

Le chapitre 5 aborde la méthodologie suivie pour le traitement de l'aimantation et l'obtention des archéodirections et des archéointensités. Il est constitué de l'article **Archaeomagnetic results on three Early Iron Age salt-kilns from Moyenvic (France)** publié en 2011 dans *Geophysical Journal International* (avec Elisabeth Schnepp, Annick Chauvin, Philippe Lanos et Norbert Nowaczyk). Cet article expose principalement les améliorations du protocole de Thellier-Thellier pour mieux détecter les évolutions minéralogiques, qui sont fréquentes sur le matériel protohistorique.

Comme l'ont mis en avant Chauvin *et al.* (2000) et Genevey et Gallet (2002), les archéointensités doivent être corrigées des effets de l'anisotropie de l'aimantation thermorémanente et de la vitesse de refroidissement. Cette dernière correction doit être cependant améliorée au niveau de l'estimation de la durée du refroidissement archéologique. Le chapitre 6 **Analyse expérimentale de briquettes de Sallèles-d'Aude (Aude) : investigations sur l'effet de la vitesse de refroidissement** apporte de nouveaux éléments de discussion sur cette correction et illustre la fiabilité du protocole d'archéointensité suivi à Rennes.

Enfin, le chapitre 7 intitulé **Construction des courbes de variation séculaire** compare les différentes méthodes de construction des courbes de référence en s'attachant particulièrement à la méthode hiérarchique bayésienne (Lanos, 2004 ; Lanos, 2009).

Chapitre 3

Corpus des nouveaux sites

Le corpus des sites de référence comprend 47 structures provenant de 26 sites archéologiques répartis sur l'ensemble du territoire français (Figure 2.1 et Tableau 2.1). La plupart de ces sites ont fait l'objet de fouilles de sauvetage ou de fouilles préventives, menées par des collectivités territoriales (7 structures) ou des sociétés d'archéologie préventive (AFAN : 11 structures ; INRAP : 10 structures ; Archéodunum, 1 structure). Les 18 autres structures ont été collectées sur des fouilles programmées et notamment sur des sites emblématiques du premier millénaire av. J.-C. comme Lattes Saint-Sauveur et le Mont-Beuvray.

Trente-neuf structures sont des structures dites en place, qui sont supposées, d'après les observations archéologiques et géomorphologiques, ne pas avoir bougé depuis la dernière chauffe de l'argile à haute température. Ces fours et ces foyers ont été étudiés pour l'archéodirection et quand cela a été possible pour l'archéointensité du champ magnétique terrestre. Les huit autres structures (six lots de tessons de Lattes-Saint-Sauveur et deux foyers constitués de tessons et de fragments d'argile) sont des terres cuites, qui ont été déplacées depuis leur dernière chauffe : la direction de l'aimantation n'est donc pas exploitable pour caractériser la direction du champ magnétique terrestre. Le matériel d'étude a été prélevé (ou collecté pour les matériaux déplacés) par mes soins au cours de ce doctorat entre 2008 et 2010 (23 structures) ou auparavant entre 1995 et 2008 principalement par Philippe Lanos, Philippe Dufresne

(Rennes) et Hugues Savay-Guerraz (Musée gallo-romain de Lyon). Au cours de l'été 2010, deux autres structures *a priori* datées du Ier siècle av. J.-C. ont été prélevées mais n'ont pas été analysées prioritairement, puisque les résultats acquis pour cet intervalle de temps étaient déjà suffisamment nombreux. Il s'agit d'un four de potier à Aigueperse-Avenue-de-Lattre dans le Puy-de-Dôme (fouille INRAP dirigée par Yann Deberge) et d'un four de potier à Blois-la-Croupe » dans le Loir-et-Cher (fouille Evéha dirigée par Nicolas Peyne).

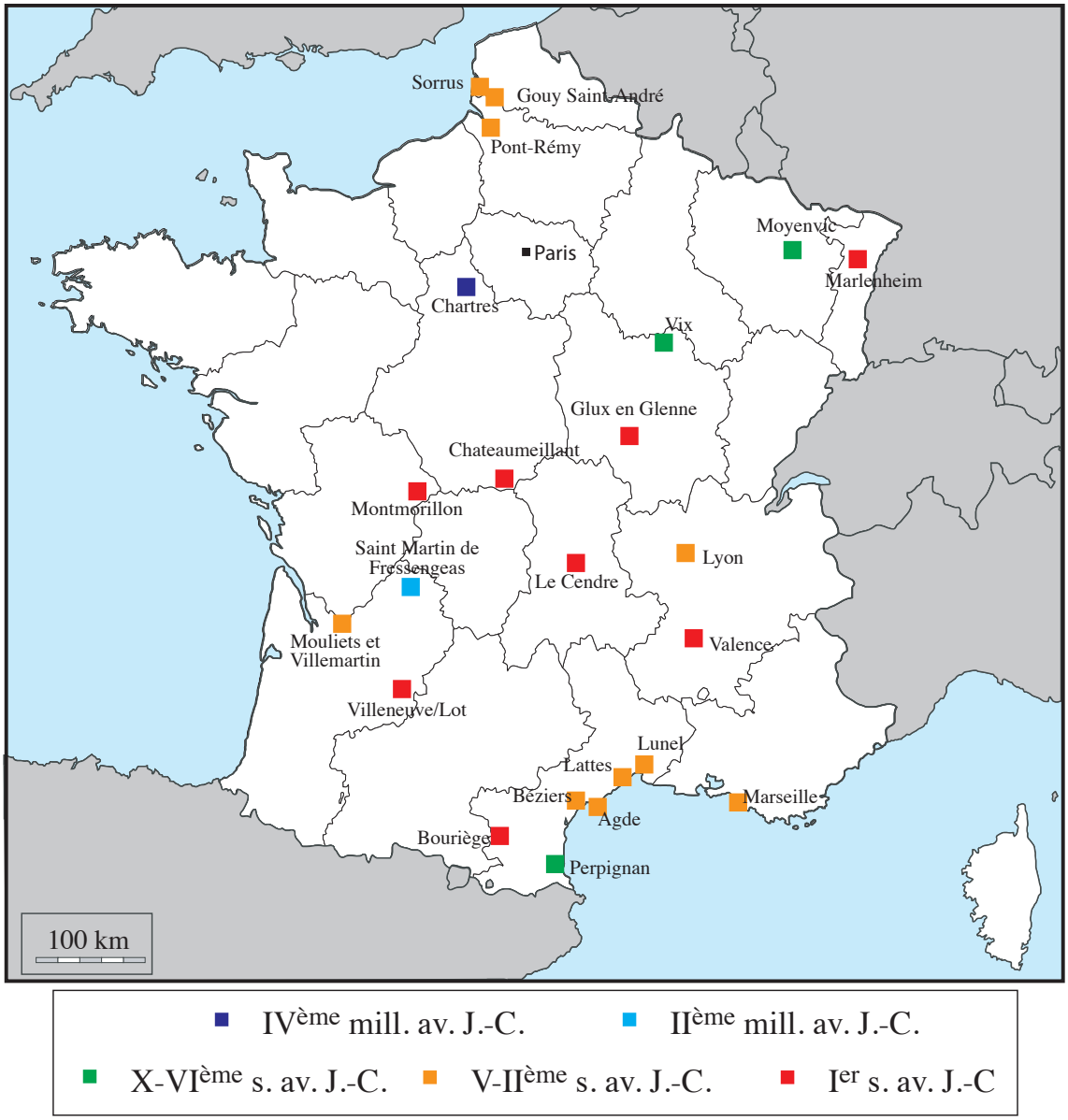


Figure 2.1 : Localisation des sites archéologiques étudiés au cours du doctorat. (Les structures prélevées à Aigueperse et Blois ne sont pas indiquées, car leur analyse n'a pas été réalisée.)

		Aire		âge du Fer													
Commune	Site	"Nord"	"Midi"	1er	2ème	Contexte du site	Lat (°N)	Long (°E)	Fouille	Archéologue	Structure	Type	Code	Datation	Meth.	Prél.	Direction	Intensité
Agde (34)	Saint-Michel		x		x	habitat rural	43.267	3.500	Prév. (AFAN)	E. Gomez	Four 2	Four à amphores	34003A	[-140;-90]	Arch.	1999	x	x
Béziers (34)	ZAC-de-la-Domitienne		x		x	?	43.330	3.250	Prév. (INRAP)	C. Olive	Four 1009	Four de potier	34032A	[-525;-350]	Arch.	2001	x	x
Bouriège (11)	Devant-la-ville		x		x	atelier	42.980	2.170	Prév. (AFAN)	P. Séjalon	Four 1	Four de potier	11045A	[-150;-50]	Arch.	1997	x	x
											Four 6	Four de potier	11045B	[-150;-50]	Arch.	1997	x	x
											Four 7	Four de potier	11045C	[-150;-50]	Arch.	1997	x	x
Chartres (28)	Beaulieu	x		Néolithique		?	48.436	1.509	Prév. (V. Chartres)	L. Coulon	Four Néolithique	Four	28085F	[-3804;-3658]	^{14}C	2010*	x	
Chateaumeillant (18)	le Paradis, zone B	x			x	*oppidum* (Tène finale)	46.930	2.317	Prog.	S. Krausz	Four 172	Four de potier	18057A	[+25;+50]	Arch.	2008*	x	x
Glux-en-Glenne (58)	Mont-Beuvray, la-Pâture-du-Couvent	x			x	*oppidum* (Tène finale)	46.950	4.020	Prog.	S. Rieckhoff	Foyer 9534	Foyer	58128C	[-100;-50]	Arch.	2005	x	
Glux-en-Glenne (58)	Mont-Beuvray, la Côme-Chaudron	x			x	*oppidum* (Tène finale)	46.950	4.020	Prog.	J.P. Guillaumet, T. Bochnak & P. Golanova	Foyer 1977	Foyer	58128D	[-66;-20]	DC, Arch.	2005	x	
											Foyer 3292	Foyer	58128E	[-120;-10]	^{14}C, Arch.	2009*	x	
											Foyer 3290	Foyer	58128F	[-120;-10]	^{14}C. Arch.	2009*	x	
											Foyer 3160	Foyer	58128G	[-90;-10]	Arch.	2009*	x	
Gouy-Saint-André (62)	le Rossignol	x			x	habitat rural	50.375	1.920	Prév. (CG 62)	A. Masse	Four 23	Fourneau à sel	62382A	[-190;-140]	^{14}C	2010*	x	
											Four 78	Fourneau à sel	62382B	[-360;-90]	^{14}C	2010*	x	x
											Four 24	Fourneau à sel	62382C	[-370;-100]	^{14}C	2010*	x	
											Four 60	Fourneau à sel	62382D	[-400;-210]	^{14}C	2010*	x	x
											Four 22	Fourneau à sel	62382E	[-390;-190]	^{14}C	2010*	x	x
Lattes (34)	Saint-Sauveur, zone 54		x		x	agglomération indigène	43.565	3.907	Prog.	T. Janin	Foyer 54567	Foyer domestique	34129A	[-300;-250]	Arch.	2009*	x	x
Lattes (34)	Saint-Sauveur		x		x	agglomération indigène	43.565	3.907	Prog.	T. Janin	zone 27, u.s. 27576	Lot de tessons	34129B	[-475;-450]	Arch.	2009*		x
											zone 27, u.s. 27345	Lot de tessons	34129C	[-425;-400]	Arch.	2009*		x
											zone 27, u.s. 27346	Lot de tessons	34129D	[-425;-400]	Arch.	2009*		x
											zone 4, u.s. 4796	Lot de tessons	34129E	[-375;-350]	Arch.	2009*		x
											zone 2, u.s. 2956	Lot de tessons	34129F	[-100;-75]	Arch.	2009*		x
											zone 30, u.s. 30118	Lot de tessons	34129G	[-100;-75]	Arch.	2009*		x
Le-Cendre (63)	Gondole	x			x	*oppidum* (Tène finale)	45.716	3.203	Prog.	Y. Deberge	Puits 209	Foyer	63069A	[-60;-20]	Arch.	2006	x	
											Four 36	Four de potier	63069B	[-60;-20]	Arch.	2006	x	
Lunel (34)	Mas-de-Fourques		x		x	?	43.691	4.135	Prév. (INRAP)	M. Ott	Four 2110	Four de potier	34145A	[-386;-201]	^{14}C	2006	x	x
Lyon (69)	Vaise, 4-6 rue-du-Mont-d'Or	x		x		agglomération ouverte	45.780	4.810	Prév. (V. Lyon)	S. Carrara	Foyer 63	Foyer domestique	69123L	[-500;-400]	Arch.	2008	x	x
Marlenheim (67)	Maison-Appredéris	x			x	habitat rural	48.620	7.500	Prév. (INRAP)	M. Châtelet	Four 70	Four de potier	67282A	[-60;-30]	Arch.	2003	x	x
Marseille (13)	9 rue Jean-François Leca		x		x	ville grecque	43.500	5.620	Prév. (AFAN)	F. Conche	Four 1	Four à amphores	13055K	[-470;-400]	Arch.	1995	x	x
Marseille (13)	place Villeneuve-Bargemon		x		x	ville grecque	43.297	5.369	Prév. (AFAN)	A. Hesnard	Foyer des ateliers	Foyer de métallurgie	13055L	[-368;-194]	^{14}C	1997	x	x
Montmorillon (86)	Rocade-Est, zone 2	x			x	habitat rural	46.410	0.892	Prév. (INRAP)	D. Guitton	Four 2008	Four de potier	86165A	[-100;0]	Arch.	2010*	x	
Mouliets-et-Villemartin (33)	Lacoste	x			x	agglomération ouverte	44.831	-0.039	Prév. (INRAP)	C. Sireix	us. 6044 et 6045	Foyer (argile et tessons)	33296A/B	[-210;-170]	Arch.	2009*		x
Moyenvic (57)	les Crôleurs	x		x		atelier	48.780	6.570	Prév. (INRAP)	J.-D. Laffitte	Four 1003	Fourneau à sel	MOA	[-761;-409]	^{14}C	1999	x	x
											Four 2086	Fourneau à sel	MOB	[-801;-543]	^{14}C	1999	x	x
											Four 3074	Fourneau à sel	MOC	[-809;-517]	^{14}C	1999	x	x
Perpignan (66)	Ruscino		x	x		agglomération indigène	42.699	2.896	Prog.	R. Marichal	Foyer 5106	Four domestique	66136E	[-640;-585]	Arch.	2001	x	x
Pont-Rémy (80)	Fond-de-Baraquin	x			x	habitat rural	50.080	1.914	Prév. (AFAN)	G. Prilaux	Four 227	Fourneau à sel	80635A	[-150;-30]	Arch.	1995	x	
Saint-Martin-de-Fressengeas (24)	Grotte des Fraux	x		âge du Bronze		grotte	45.447	0.854	Prog.	L. Carozza	Foyer 8	Foyer	24453A	[-1300;-1020]	^{14}C	2010*	x	x
Sorrus (62)	la Bruyère, zone 3	x			x	atelier	50.450	1.700	Prév. (AFAN)	Y. Desfossés	Four 1	Fourneau à sel	62799A	[-190;-140]	DC	1996	x	x
											Four 2B	Fourneau à sel	62799B1	[-292;-180]	DC	1996	x	x
											Four 2C	Fourneau à sel	62799B2	[-292;-180]	DC	1996	x	x
Sorrus (62)	la Pâture-à-vaches	x			x	atelier	50.450	1.700	Prév. (AFAN)	Y. Desfossés	Four 2	Fourneau à sel	62799C	[-250;-200]	DC	1996	x	x
Valence (26)	Angle rue d'Arménie-rue Bouffier		x		x	colonie romaine	44.934	4.895	Prév. (Archeodunum)	T. Silvino	Four 40	Four	26362A	[-50;-30]	Arch.	2008	x	x
Villeneuve-sur-Lot (47)	la Dardenne-Haut	x			x	agglomération ouverte	44.418	0.733	Prév. (INRAP)	A. Alcantara	Four 3186	Four de potier	47323A	[-125;-75]	Arch.	2009*	x	x
											Foyer 122	Foyer (argile et tessons)	47323C	[-125;-75]	Arch.	2009*		x
Vix (21)	Sondage Mont-Lassois Est 2009	x		x		site "princier" (Ha final)	47.911	4.533	Prog.	F. Cruz		Four	21711A	[-749;-393]	^{14}C	2009*	x	x

Tableau 2.1 (page précédente) : Présentation des sites archéologiques et des structures étudiés. Nom de la commune ; Nom du site archéologique ; Aire géographique, période et contexte général du site ; Latitude et Longitude ; Fouilles préventives ou programmées ; Nom de l'archéologue responsable ; Nom, type et code archéomagnétique de la structure prélevée ; Datation de la structure ; Méthode de datation employée : méthodes archéologiques (arch.) et/ou chronométriques (radiocarbone ^{14}C, dendrochronologie DC) ; Année du prélèvement ; Structure étudiée pour la direction et/ou l'intensité du champ magnétique terrestre

La majorité des structures (40) datent de la seconde moitié du premier millénaire av. J.-C. jusqu'au début du I^{er} siècle ap. J.-C., c'est-à-dire globalement de la période laténienne en Gaule non-méditerranéenne. Leur étude permet ainsi de combler la lacune du corpus de référence de Gallet *et al.* (2002). Cinq structures de Moyenvic, Vix et Ruscino complètent les données existantes pour le premier âge du Fer. Le foyer de la grotte des Fraux (Saint-Martin-de-Fressengeas, Dordogne) et le four de Chartres-Beaulieu constituent de nouveaux points de référence respectivement pour la seconde moitié du deuxième millénaire av. J.-C. (c'est-à-dire à la transition entre les âges du Bronze moyen et final) et pour le quatrième millénaire av. J.-C. (Néolithique moyen).

1. Fours de potiers et fours à amphores

Dix fours de potiers et deux fours à amphores (13055K et 34003A) ont été étudiés (Tableau 2.1). Ces fours ont été retrouvés isolés (ou apparemment isolés d'après l'état de la documentation archéologique) ou bien au sein d'un atelier de potier comme à Bouriège Devant-la-ville. La totalité de ces fours (à l'exception du four de la Maison-Apprederis à Marlenheim) est à tirage vertical avec deux chambres superposées, la chambre de cuisson et la chambre de chauffe, qui sont séparées par une sole. Ce type de four de potier est le plus courant en Gaule celtique et méditerranéenne à l'âge du Fer, mais aussi à l'époque romaine (Duhamel, 1979 ; Thuillier, 2003 ; Pastor, 2010). Le feu est alimenté à l'entrée de l'alandier, qui sépare la chambre de chauffe de la fosse d'accès au four (Figure 2.2). Le diamètre de la chambre de chauffe des fours de notre corpus varie de 1,0 à 4,4 mètres.

Les fours varient aussi par la géométrie du dispositif de soutènement de la sole perforée (Figure 2.3), qui est très rarement préservé. La sole est soutenue par un (Lunel Mas-de-Fourques 34145A ; Montmorillon Rocade-est, 86165A) ou deux (Chateaumeillant le Paradis 18057A ; Bouriège Devant-la-ville, 11045B) murets centraux (aussi appelés languettes) ou par un pilier central (Villeneuve-sur-Lot la Dardenne-Haut, 47323A). Dans ce cas, la sole est dite rayonnante. Les dispositifs de soutènement sont plus complexes dans les structures de plus grande taille, telles que les fours à amphores d'Agde Saint-Michel (34003A) et de Marseille rue Leca (13055K) avec des arcs reposant sur un muret central. La variété de ces aménagements intérieurs a donné lieu à des classifications complexes (Thuillier, 2003), qui ne sont pas reprises dans le présent travail et qui sont par ailleurs difficilement utilisables (Pastor, 2010).

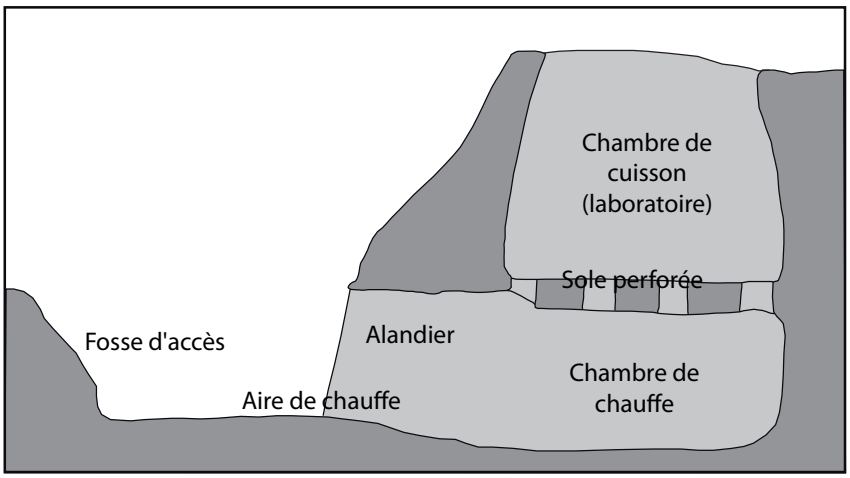


Figure 2.2 : Schéma d'un four de potier protohistorique (ou antique) à deux volumes (d'après D'Anna et al., 2002)

Le four de Marlenheim Maison-Apprederis 67282A (Figure 2.3d) se distingue des autres fours par la présence d'une seule chambre à deux alandiers opposés et à plateforme centrale sur laquelle était disposé le chargement du four. Cette morphologie particulière semble caractéristique de l'Alsace à la fin de l'époque laténienne et au début de l'époque gallo-romaine (Pastor, 2010).

Pour l'ensemble de ces fours de potiers, l'aimantation thermorémanente est supposée acquise lors de la dernière cuisson de céramiques ou d'amphores.

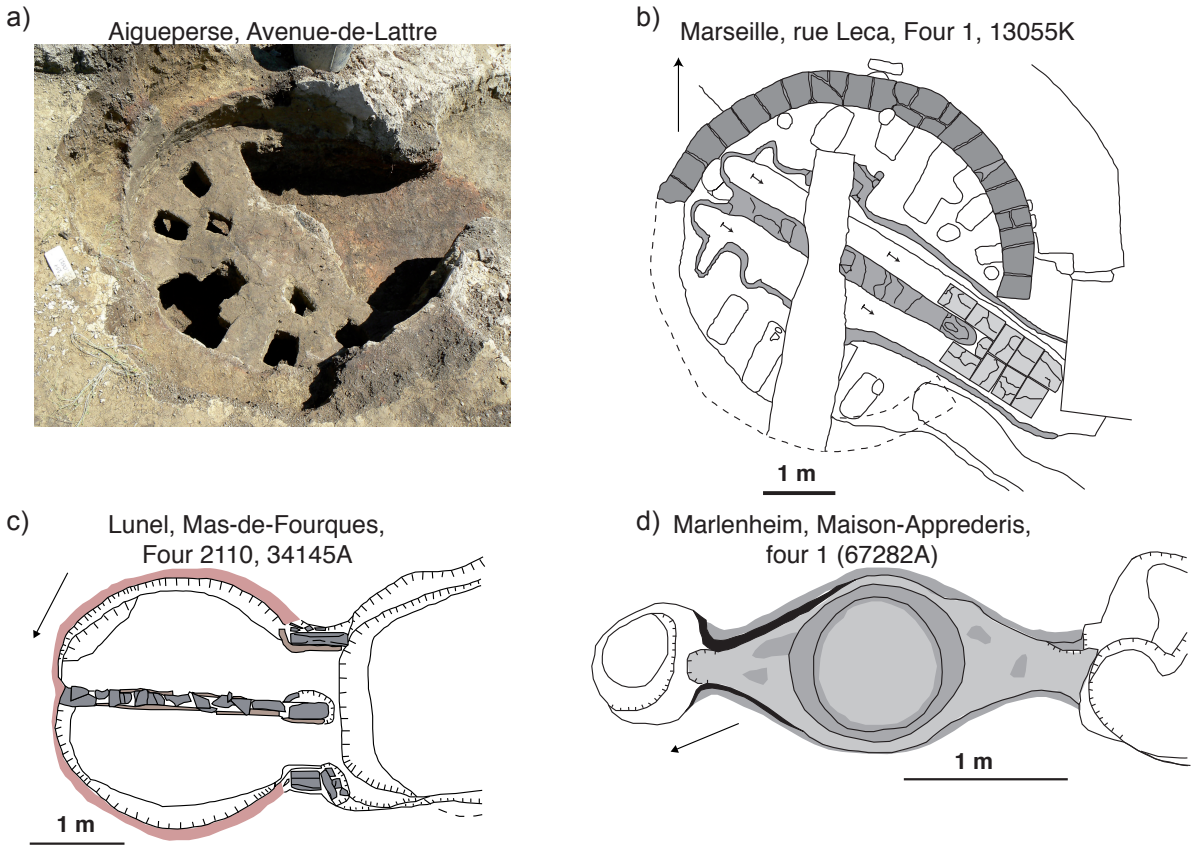


Figure 2.3 : Exemples de fours de potiers. a) Four de potier à deux volumes dont la sole rayonnante soutenue par un pilier central est en partie préservée. Le four Augustéen d'Aigueperse Avenue-de-Lattre a été prélevé en juillet 2010 (Fouilles INRAP, Y. Deberge) mais n'est pas intégré dans le corpus. b) Four à deux volumes avec un dispositif complexe de soutènement de la sole : le four à amphores de la rue Leca à Marseille (d'après Rothé et Tréziny, 2005). c) Four à deux volumes avec la sole soutenue par un muret central : le four de Lunel, Mas-de-Fourques (d'après Ott et Pancin, 2007). d) Four à un volume avec deux alandiers et une plateforme centrale : le four de la Maison-Apprederis à Marlenheim (d'après Châtelet, 2006).

2. Fourneaux à sel

Les fourneaux à sel constituent également une part importante du corpus avec 13 structures étudiées, qui proviennent de cinq sites différents. La production ignigène du sel était un artisanat florissant à l'âge du Fer (Buchsenschutz, 2007 ; Weller, 2002) attesté sur l'ensemble des littoraux de la Gaule (Daire, 2003). La production ignigène

consiste en l'évaporation de saumure dans les fourneaux pour former des pains de sel. La saumure est obtenue à partir de l'eau de mer ou de sources continentales comme dans la vallée de la Seille (Lorraine).

Les fourneaux à sel étudiés proviennent d'une part de la vallée de la Seille avec le site des Crôleurs à Moyenvic et d'autre part du Pas-de-Calais où les fouilles préventives ont révélé un grand nombre d'ateliers depuis une quinzaine d'années (Prilaux, 2000 ; Masse *et al.*, 2011) par exemple à Sorrus, Pont-Rémy et Gouy-Saint-André. Si la répartition géographique et temporelle de ces quatre sites est large, la chaîne opératoire de la production du sel est semblable (Olivier, 2009 ; Prilaux, 2000 ; Masse *et al.*, 2011). Les fourneaux, de forme allongée dans le Nord-Pas-de-Calais et en fer à cheval dans la vallée de la Seille (Figure 2.4), supportent une grille en terre cuite, sur laquelle sont posés les récipients contenant la saumure. Ces récipients, appelés godets ou moules, ont souvent des formes standardisées pour la production des pains de sel. Les déchets de la grille, des récipients et des pièces de calage constituent les briquetages.

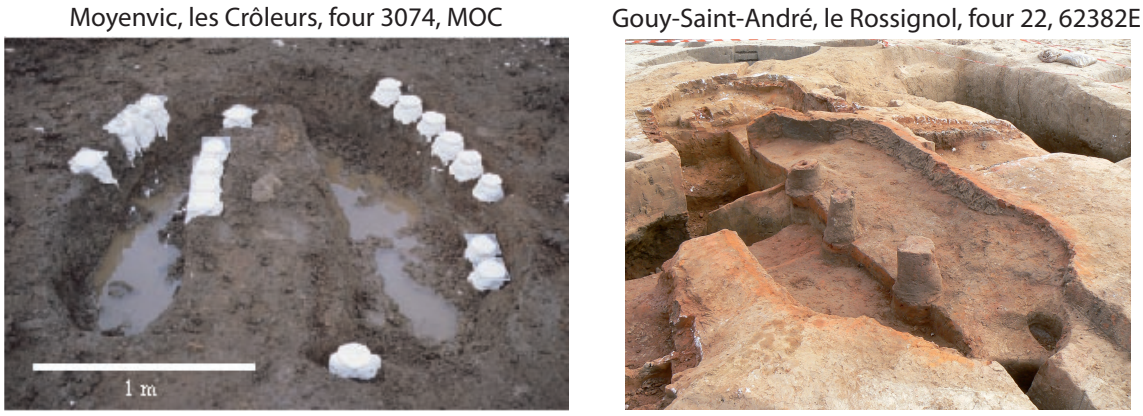


Figure 2.4 : Exemples de fourneaux à sel caractéristiques de la vallée de la Seille (à gauche, cliché Ph. Dufresne) et du Nord-Pas-de-Calais (à droite).

Pour les fourneaux à sel, le moment d'acquisition de l'aimantation n'est pas strictement la dernière chauffe du four. Les températures nécessaires à l'évaporation de la saumure (environ 100°C) ne permettent que l'acquisition d'une aimantation thermorémanente (ATR) partielle, dont il est très difficile de retrouver la direction. En revanche, des températures très élevées (supérieures à 600°C) sont atteintes lors de la fabrication en place de la grille et du matériel de briquetage. L'ATR dont on détermine la direction n'est donc pas acquise lors de la dernière utilisation du four, mais lors de la

dernière construction de grille. Comme les grilles sont très fragiles et supposées être renouvelées régulièrement voire même après chaque fournée (Prilaux, 2000), les deux moments peuvent être considérés contemporains (à l'année près) au vu des incertitudes des datations archéologiques. La méthode utilisée pour le calage chronologique du moment d'acquisition de l'ATR est donc identique à celle utilisée pour les fours de potiers.

3. Autres fours

Trois structures sont des fours dont la fonction domestique ou artisanale n'a pu être identifiée. Il s'agit des fours de Vix (21711A), de Valence-angle-rue-d'Arménie-et-rue-Bouffier (26362A) et du four Néolithique de Chartres-Beaulieu (28085F). Ce dernier a pu servir au traitement des céréales, aux cuissons alimentaires, à la production de braises ou de céramiques (Coulon *et al.*, 2011). La vocation domestique du four de Perpignan-Ruscino est plus évidente en raison de sa position à l'intérieur de l'habitat. Comme pour les fours de potiers, l'aimantation thermorémanente (totale ou au moins partielle) est supposée acquise lors de la dernière chauffe des fours.

4. Foyers

Les foyers (définis comme des structures ouvertes sans voûte) constituent également une part importante du corpus avec 12 structures. Les foyers étudiés sont de taille variable entre 0,4 et 1,0 m de diamètre ou de long. Ils sont formés d'une couche d'argile cuite (sole), parfois construite sur un radier :

- de tessons céramiques : Lattes, Saint-Sauveur, foyer 54567, 34129A ; Mouliets-et-Villemartin, Lacoste, foyer 180, 33296A ; Villeneuve-sur-Lot, la Dardenne-Haut, foyer 122, 47323B
- de tessons d'amphores : Le Cendre, Gondole, foyer du puits 209, 63069A ; Mont-Beuvray, la Côme-Chaudron, foyer 3292, 58128F
- de galets : Mont-Beuvray, la Côme-Chaudron, foyers 3290 (58128E, Figure 2.5) et 3160 (58128G) ; Lyon, Vaise, 4-6 rue du Mont-d'Or, foyer 63, 69123L

Mont-Beuvray, la Côme-Chaudron, Foyer 3292, 58128E

Mouliets-et-Villemartin, Lacoste, Foyer 180, 33296A

Figure 2.5 : Exemples de foyers analysés, à gauche le foyer 3290 (58128E) du site de la Côme-Chaudron au Mont-Beuvray et à droite le foyer du site de Lacoste (cliché Ch. Sireix) constitué d'une fine sole d'argile sur un radier de tessons. Ce foyer a été considéré comme un matériau déplacé.

La sole est rubéfiée sur une épaisseur variable de 2 cm (foyers du Mont-Beuvray et de la grotte des Fraux) à 5 cm. La sole du foyer 54567 de Lattes (34129A) a la particularité d'être décorée sur son pourtour par des motifs géométriques. Ce type de décors est courant sur le littoral méditerranéen entre le V^{ème} et le III^{ème} siècle av. J.-C. (Roux et Raux, 1996) et atteste de l'importance du foyer au sein de l'habitat. D'autres foyers, tels celui de la place Villeneuve-Bargemon à Marseille et celui de la Pâture-du-Couvent au Mont-Beuvray, sont utilisés pour des activités artisanales et plus précisément métallurgiques. Dans d'autres cas, la fonction domestique (chauffage, éclairage, cuisson) ou artisanale du foyer est plus difficile à attribuer. C'est par exemple le cas des quatre foyers de la Côme-Chaudron au Mont-Beuvray, qui est un quartier d'artisans spécialisés (Guillaumet et Dhennequin, 2008).

Les foyers domestiques des sites de Lacoste (Mouliets-et-Villemartin, 33296A) et de la Dardenne-Haut (Villeneuve-sur-Lot, 47323B) ont été considérés comme des matériaux déplacés : la sole d'argile, installée sur un radier de tessons céramiques posés à plat, est conservée sous forme de fragments susceptibles d'avoir bougé depuis la dernière chauffe (Figure 2.5). Pour ces deux foyers, les fragments d'argile et les tessons ont donc été collectés pour étudier uniquement l'archéointensité.

Comme pour les fours, le moment d'acquisition de l'aimantation de ces 12 foyers est la dernière chauffe. Les échantillons partiellement constitués des tessons céramiques ou amphoriques du radier sont susceptibles de porter deux composantes d'aimantation : d'une part une composante primaire acquise lors de la cuisson de la céramique ou de l'amphore et d'autre part une composante secondaire acquise en place pendant la dernière chauffe.

5. Lots de tessons céramiques

Les tessons de céramiques et d'amphores constituent généralement le mobilier le plus abondant sur les sites archéologiques. Ils sont donc couramment utilisés pour reconstituer la variation passée de l'intensité du champ magnétique terrestre (Genevey *et al.*, 2009 par exemple en France). Le choix des tessons doit être réalisé judicieusement pour avoir le calage chronologique le plus pertinent possible : des précautions particulières doivent être envisagées pour ce type de matériau déplacé par rapport aux structures en place.

Pour retracer la variation d'archéointensité au cours de la seconde moitié du premier millénaire av. J.-C., six lots de tessons (chacun constitué de 11 ou 12 tessons) du site de Lattes Saint-Sauveur (Hérault) ont été collectés. L'ampleur des fouilles réalisées sur cette agglomération depuis 1983 permet une bonne connaissance de la stratigraphie et de la chrono-typologie du mobilier, qui ont justifié le choix de ce site. Seuls des tessons de céramique commune montée au colombin et produite à proximité ont été sélectionnés : plus précisément, il s'agit des céramiques nommées CNT-LOR (Céramique-Non-Tournée-du-Languedoc-Oriental) dans la classification de Lattes (Py, 1993). Ce sont des céramiques culinaires, dont la texture de la pâte est grossière par rapport aux autres tessons du site. Deux raisons justifient le choix de cette catégorie céramique très courante (entre 50 et 60% des tessons de vaisselle, Gailledrat, 2008).

- Premièrement, cette céramique est produite soit sur place, soit dans l'environnement immédiat (Py, 2009). Les analyses archéométriques des dégraissants ont permis de vérifier cette hypothèse. A l'inverse, le lieu de production des céramiques fines reste en général inconnu ou bien est situé en dehors de la France actuelle (campanienne A par exemple).

- Deuxièmement, la CNT-LOR est une céramique culinaire. Son utilisation très fréquente (sans doute quotidienne) rend très probable une courte durée de vie (Rice, 1987). Le moment d'acquisition de l'aimantation des tessons, soit pendant la cuisson initiale de la poterie dans un four, soit lors de son utilisation domestique dans l'habitat, peut donc être considéré comme contemporain de la formation de l'unité stratigraphique dans laquelle sont contenus les tessons. Cette affirmation est cependant exacte seulement si les tessons ne sont ni résiduels, ni intrusifs. L'unité stratigraphique doit par conséquent présenter une homogénéité chronologique. Par conséquent, il faut éviter les remblais. A l'inverse, les céramiques importées sont peu propices à la construction de la courbe de référence de l'archéointensité, car ils peuvent rester en circulation sur de plus longues périodes. C'est particulièrement le cas des amphores massaliètes dont la production a été mise en évidence à Marseille par les analyses archéométriques (Fillières, 1978).

Cet exemple de sélection illustre les limites de l'analyse archéomagnétique des tessons et plus généralement des matériaux déplacés, pour établir la courbe de variation séculaire de l'archéointensité. La catégorie céramique la plus adaptée du point de vue chronologique est indubitablement la céramique culinaire non-tournée. Mais on verra dans le chapitre 9 que les résultats du protocole de Thellier-Thellier sont peu encourageants sur ce type de matériel.

Chapitre 4

La datation des structures de référence : enjeux, méthodes et limites

L'aimantation thermorémanente (ATR) est acquise lors de la dernière chauffe des fours et des foyers, qui constituent la majeure part de notre corpus. Cette propriété est le principal avantage de l'archéomagnétisme par rapport à d'autres méthodes chronométriques (Ferdière, 2007) : le moment daté est intrinsèque à la structure étudiée et correspond à l'arrêt de son fonctionnement. La correspondance entre la chronologie relative de la structure et la chronologie absolue est donc plus fiable qu'avec le radiocarbone et la dendrochronologie, dont l'instant daté, la mort de l'élément organique ou de l'arbre, n'est qu'indirectement associé au fonctionnement de la structure. A l'échelle des temps archéologiques, le moment d'acquisition de l'aimantation peut-être considéré comme instantané, car l'aimantation est acquise au maximum sur quelques jours (Cf. Chapitre 6 sur la vitesse de refroidissement).

La première étape de la construction d'une courbe de référence est la datation calendaire de cet instant. Par rapport aux coulées volcaniques récentes, les matériaux archéomagnétiques ont l'avantage de pouvoir être datés de manière indépendante plus facilement et avec un plus grand nombre de méthodes chronométriques ou archéologiques. La datation des structures archéomagnétiques de référence est fondée sur l'interprétation stratigraphique des vestiges archéologiques, qui permet

l'établissement d'une chronologie relative. Le passage en chronologie absolue est assuré par la datation des mobiliers archéologiques et/ou par les données chronométriques.

Dans le cas de notre corpus (Tableau 2.1), le calage chronologique a été réalisé par le mobilier archéologique pour 21 fours et foyers et les six lots de tessons de Lattes. La datation de la dernière chauffe du four a généralement été réalisée par les équipes archéologiques. Dans le cas des cinq foyers du Mont-Beuvray, j'ai étudié le mobilier des couches associées dans le cadre d'un stage encadré par Sylvie Barrier (céramologue, doctorante à l'université de Tours et à l'université de Lausanne). Le calage chronologique des 20 autres fours et foyers a été réalisé avec des méthodes chronométriques, le radiocarbone (^{14}C) pour 15 structures et la dendrochronologie (DC) pour 5 structures.

1. Les enjeux du calage chronologique

Le calage chronologique des structures de référence a d'importantes conséquences sur la précision et la fiabilité des courbes de variation séculaire. La précision correspond à la largeur de l'intervalle de date à un niveau de confiance fixé (95% dans notre cas). Cette précision conditionne la résolution des courbes de variation séculaire. La fiabilité de l'intervalle de date est définie comme sa capacité à contenir la date « vraie » de la dernière chauffe du four ou du foyer. Ces deux définitions indiquent que deux erreurs peuvent affecter l'intervalle de date de la dernière chauffe de la structure et doivent alors être prises en compte lors de la construction des courbes de référence : une erreur intrinsèque liée à l'imprécision de la date et une erreur extrinsèque, qui peut être liée à une mauvaise interprétation du contexte ou du mobilier archéologique.

Dans les premiers temps du développement de la méthode, les archéomagnéticiens ont eu tendance à réclamer, sans réelle discussion sur leur pertinence, des intervalles de date très précis « à 10 ou 20 ans » près (Thellier, 1976). Une telle précision est envisageable pour l'époque moderne (Genevey *et al.*, 2009 ; Hartmann *et al.*, 2011), mais pour les périodes plus anciennes (le premier millénaire av. J.-C. par exemple), des datations « très précises » sont plus susceptibles d'avoir une erreur extrinsèque importante.

Les discussions de plus en plus détaillées dans la littérature archéomagnétique (Jane-Clelland et Batt, 2010 ; Ben-Yosef *et al.*, 2009 ; Gomez-Paccard *et al*, 2006) mettent en évidence le soin grandissant apporté au calage chronologique par les archéomagnéticiens. En effet, il apparaît nécessaire de pouvoir contrôler et estimer la fiabilité de la datation proposée par l'archéologue en analysant de manière détaillée l'ensemble du contexte archéologique. Couplée à des outils statistiques adaptés, cette approche est nécessaire pour construire des courbes de variation séculaire à la fois précises et fiables.

2. Le calage chronologique : analyse critique du contexte archéologique

2.1 Mise en contexte stratigraphique de l'instant enregistré

La première étape du calage chronologique consiste à replacer la dernière chauffe du four dans son contexte stratigraphique. Les principes de la stratigraphie archéologique moderne ont été établis au Royaume-Uni par Harris dans les années 70 (Harris, 1989). En France, ces travaux ont été formalisés principalement par Michel Py à Lattes avec le système Syslat (Py, 1997) et plus récemment par Bruno Desachy avec le Stratifiant (Desachy, 2008). L'unité de base est l'unité stratigraphique (u.s.), qui est soit positive (une couche) soit négative (une interface). L'analyse détaillée de l'ensemble des relations d'antériorité, de postériorité ou de contemporanéité entre les différentes unités permet de construire des diagrammes ou matrices de Harris, qui récapitulent la chronologie relative du site.

Les unités stratigraphiques sont regroupées au sein de Faits qui constituent un ensemble cohérent du point de vue structurel ou fonctionnel. Un four ou un foyer forment un fait, chronologiquement caractérisé par une période de construction, une période d'utilisation et une période d'abandon. A l'échelle d'un site ou plus souvent d'une zone, d'une pièce, les Faits sont regroupés en phases, qui constituent un moment de vie de cet espace (Py, 1997). Des modifications profondes de l'espace déterminent les changements de phase. Dans notre cas, une phase correspond à la durée de vie d'un four, de sa construction à son abandon. Pour un foyer, cela correspond à la durée de vie de l'habitat domestique ou artisanal auquel le foyer est associé.

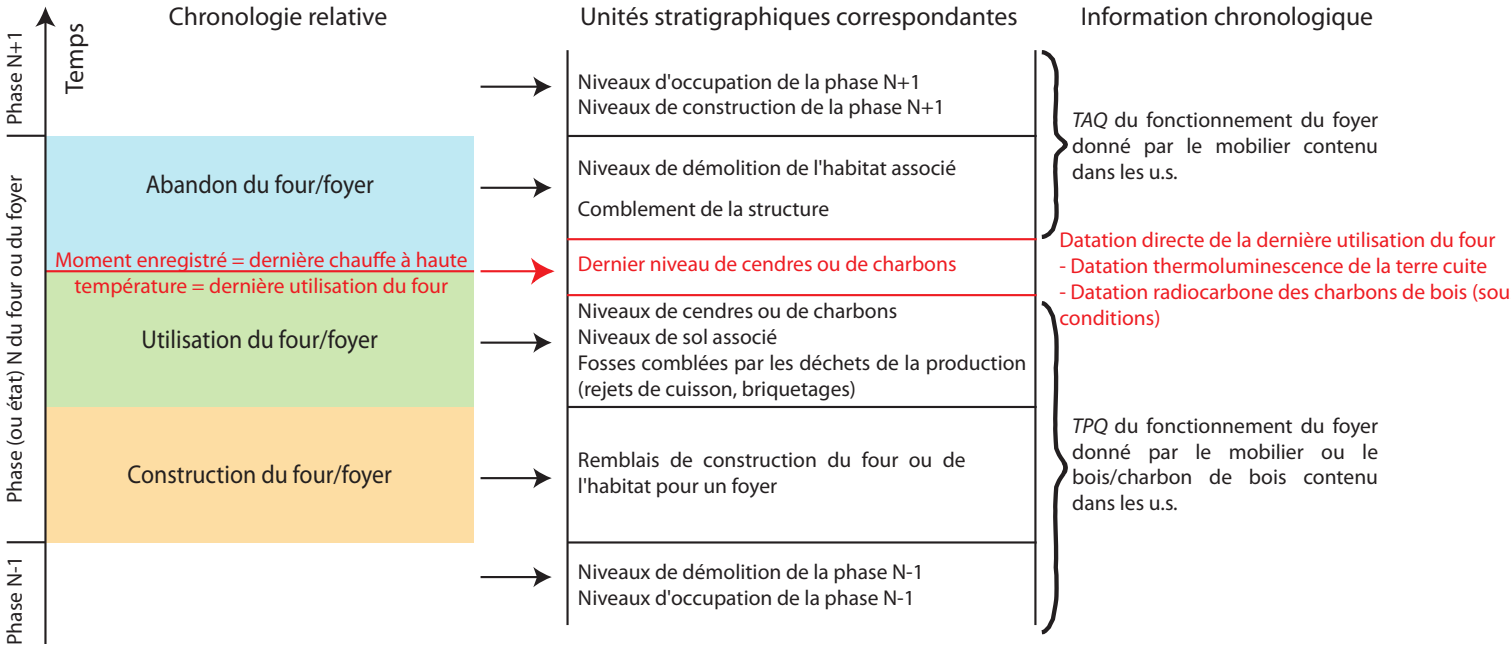


Figure 2.6 : Principe du calage chronologique de la dernière chauffe d'une structure en place (four, foyer) : présentation de la stratigraphie et des unités stratigraphiques correspondantes, dont le mobilier sensu lato (céramiques, métal, restes organiques) permet de définir le Terminus Post Quem (TPQ) et le Terminus Ante Quem (TAQ) de la dernière chauffe.

La Figure 2.6 récapitule la chronologie relative simplifiée qui peut être établie pour chaque four ou chaque foyer. A chacun des évènements construction, utilisation et abandon de la structure ou de l'habitat, correspond une ou des unités stratigraphiques. La relation d'antériorité ou de postériorité du dépôt de ces u.s. par rapport à l'instant d'enregistrement de l'aimantation (la dernière chauffe du four) est la première étape du calage chronologique. Quelque soit la méthode ensuite envisagée, la fiabilité de la datation repose essentiellement sur la connexion stratigraphique du matériau ou du mobilier daté avec le four, le foyer ou le lot de tessons analysés.

2.2 Datation « directe » par thermoluminescence

L'instant daté par la thermoluminescence (TL) est la dernière chauffe de la terre cuite et par extension de la paroi ou de la sole d'un four ou d'un foyer. Cette méthode semble donc la plus adaptée pour assurer le calage chronologique des structures archéomagnétiques (Sapin *et al.*, 2008). Cependant, cette méthode n'a pu être mise en

œuvre dans le cadre de notre étude principalement en raison des contraintes techniques qu'elle nécessite. La TL est une méthode dosimétrique, qui repose sur la mesure de la dose de radioactivité ambiante (Aitken, 1985) : des dosimètres doivent être laissés en place dans la structure pendant plusieurs mois, ce qui rend la méthode assez peu compatible avec les calendriers serrés de l'archéologie préventive. De plus, les analyses sont longues (plusieurs mois) et les moyens financiers et humains nécessaires n'ont pu être mis en œuvre dans le cadre de cette étude. La TL a aussi une précision en général entre ±5 et ±10%, c'est-à-dire d'environ ± 250 ans (à 1σ) pour le premier millénaire av. J.-C. Elle n'est donc pas très adaptée à cette période. En revanche, elle est très utile pour les périodes plus récentes (Moyen-Âge, Blain, 2009) ou pour la Préhistoire (± 10 000 ans). Mais elle peut contribuer à ouvrir des « fenêtres de temps » lorsqu'aucune autre information n'est disponible.

2.3 Le radiocarbone : une datation « directe » sous certaines conditions

L'instant daté par radiocarbone est la mort du végétal, qui constitue le charbon de bois associé au fonctionnement du four ou du foyer. Lorsque plusieurs conditions sont respectées lors de l'échantillonnage, une datation radiocarbone peut aussi être considérée comme une datation « directe » de la fin du fonctionnement du four.

Premièrement, en raison de la possible longue durée de vie de la structure, le charbon de bois doit être prélevé dans une couche dont le dépôt est contemporain de la dernière utilisation du four. Deuxièmement, il est nécessaire d'analyser des échantillons de bois dont la mort (instant zéro de la décroissance du radiocarbone) précède de peu le dépôt du charbon de bois dans la couche archéologique. Il faut éviter l'effet « vieux bois », qui provoque un décalage systématique de la datation radiocarbone par rapport à la vraie date (Sapin *et al.*, 2008), en travaillant sur du petit bois, car la durée de stockage et de conservation est limitée. Les analyses par accélérateur couplé à un spectromètre de masse (AMS) permettent d'analyser avec fiabilité des charbons de très petite taille.

Ces conditions de contemporanéité ont été prises en compte pour les 15 structures de notre corpus datées par radiocarbone. A Gouy-Saint-André et à Moyenvic, les charbons de bois proviennent des premiers niveaux de comblement du fourneau, qui sont corrélés à la fin de son fonctionnement. Les foyers de la place Villeneuve-Bargemon

à Marseille (13055L) et de la grotte des Fraux à Saint-Martin-de-Fressengeas (24453A) sont datés par des charbons inclus dans la surface de la sole. Pour le fourneau 23 (62382A) de Gouy-Saint-André, le charbon provient des niveaux de construction du fourneau. On peut cependant considérer que la date exacte de la dernière chauffe du fourneau est comprise dans l'intervalle de date calibré en raison d'une part de la courte durée de vie supposée de tels fourneaux (Prilaux, 2000) et d'autre part de la largeur de cet intervalle.

En effet, les intervalles de date calibrée à 95% de confiance des fours de Gouy-Saint-André, Lunel, Marseille-place-Villeneuve-Bargemon, Moyenvic et Vix sont larges (avec une étendue jusqu'à environ 350 ans) à cause des effets de plateau sur la courbe de calibration dendrochronologique entre 800 et 500 av. J.-C. puis entre 380 et 150 av. J.-C. (Cf. Chapitre 2, page 65). La probabilité n'est cependant pas uniforme sur l'intervalle de date à 95%. Pour le four de Vix par exemple (Figure 2.7), l'intervalle le plus probable se situe avec une probabilité de 77% entre 568 et 393 av. J.-C. Pour le calage chronologique, on pourrait envisager de ne retenir que cet intervalle (qui réduit de presque 200 ans l'intervalle de date à 95%) d'autant plus qu'il est cohérent avec les rares éléments de datation donnés par le mobilier (Hallstatt D2/D3). Mais l'intervalle large doit être conservé pour travailler à un niveau de confiance élevé de 95%.

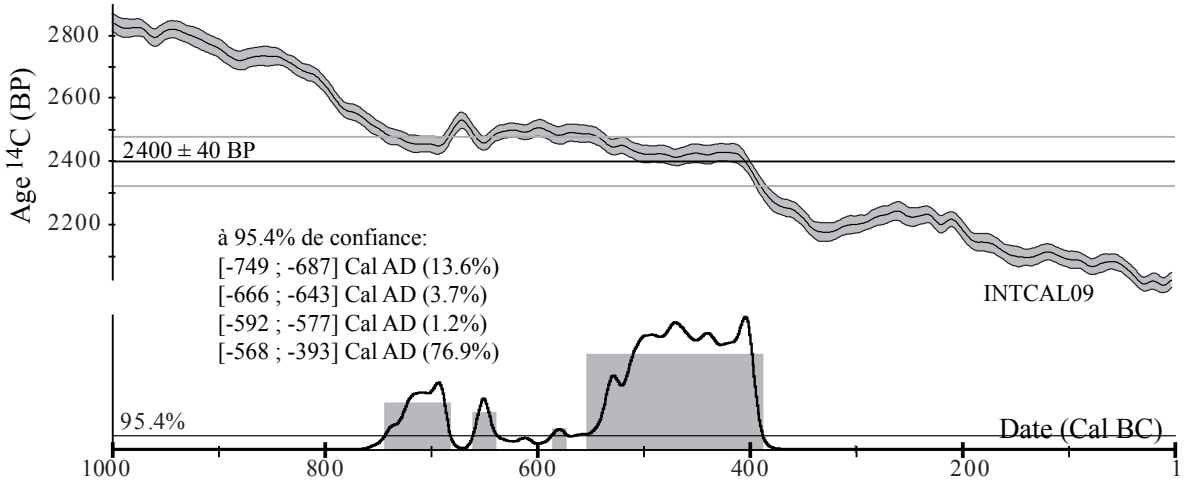


Figure 2.7 : Datation radiocarbone du four de Vix (21711A).

De fait, la construction bayésienne des courbes de référence par le logiciel Rencurve permet de prendre en compte la densité de probabilité de date *a priori* complète. Comme le problème des effets de plateau ne pourra sans doute pas être résolu (Blackwell *et al.*, 2006), une telle construction de la courbe sans aucune perte d'information peut minimiser la perte de résolution dû à l'effet de plateau.

Pour mieux identifier la possible erreur systématique due à l'effet vieux bois ou à une contamination des échantillons, il est utile d'analyser plusieurs charbons de bois d'une même couche. Par exemple, deux charbons ont été analysés pour le foyer de la place Villeneuve-Bargemon à Marseille et quatre pour le four Néolithique de Chartres-Beaulieu (28085F). Le développement des logiciels statistiques bayésiens comme OxCal (Bronk Ramsey, 2001 et 2006) et RenDateModel (Lanos, 2004 ; Lanos et Dufresne, 2012) permet de combiner les résultats des datations individuelles.

La Figure 2.8 présente les résultats obtenus pour le four de Chartres-Beaulieu après calcul sur RenDateModel. Les quatre charbons sont regroupés au sein d'un « Fait » (Sapin *et al.*, 2008) : les quatre évènements datés appartiennent à un groupe d'évènements proches dans le temps sans être forcément strictement contemporains. Cette définition permet de tenir compte du caractère hors-tendance éventuel d'une des datations. Le « Fait » se différencie ainsi de la combinaison (c'est-à-dire le produit) des quatre densités de probabilité, qui est utilisée par le logiciel Oxcal et qui suppose une contemporanéité stricte. Le calcul du « Fait » appliqué au four de Chartres-Beaulieu permet de vérifier la cohérence entre les quatre analyses et d'obtenir un intervalle de date fiable plus précis de 146 ans à 95% de confiance.

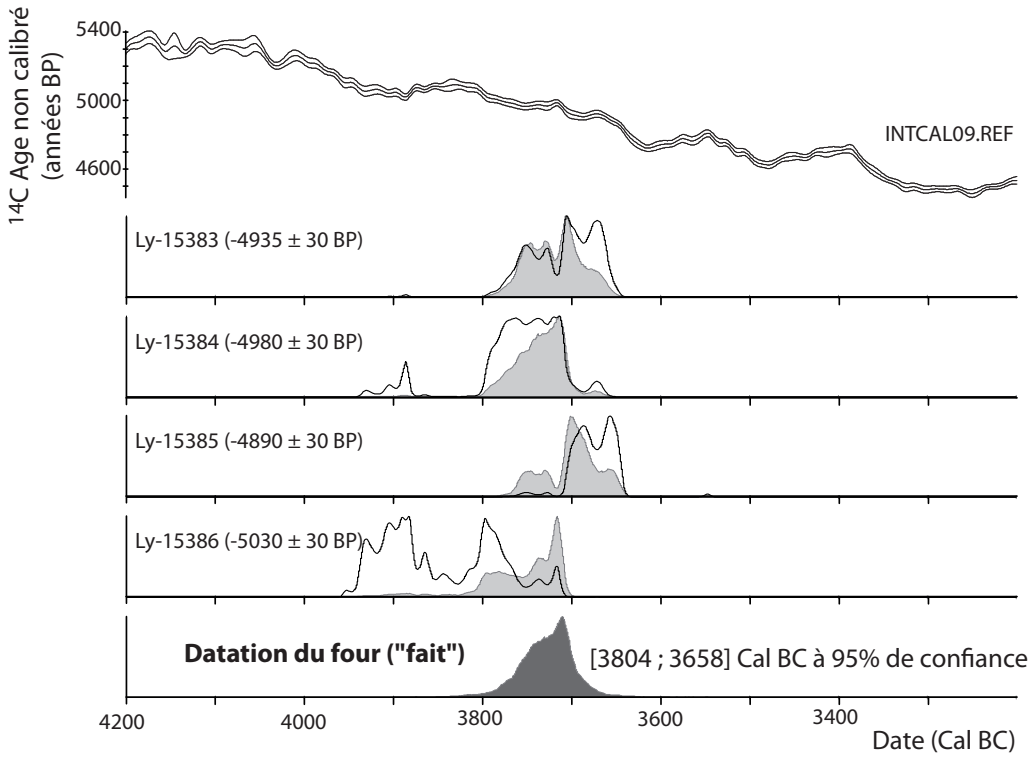


Figure 2.8 : Datation radiocarbone du four néolithique de Chartres-Beaulieu. En haut, courbe de calibration dendrochronologique des âges radiocarbone (INTCAL09, Reimer et al., 2009). En bas, résultats de la calibration des quatre échantillons et du « fait » prenant en compte ces 4 résultats. La courbe noire représente la distribution de probabilité de chaque charbon de bois après calibration et avant calcul du « fait ». La surface en gris clair représente la distribution de probabilité de chaque échantillon après calcul du « fait ». La surface en gris foncé est la distribution de probabilité du « fait », qui est utilisée pour le calage chronologique, à des fins d'étalonnage du champ magnétique terrestre.

2.3 Datation « indirecte » par le contexte archéologique

L'utilisation de la thermoluminescence ou du radiocarbone (dans les conditions évoquées précédemment) n'est pas toujours possible et le calage chronologique de la dernière chauffe est alors défini indirectement par la datation des unités stratigraphiques antérieures et postérieures au fonctionnement du four ou du foyer (Figure 2.6). La datation de ces u.s. est réalisée par l'analyse de leur mobilier archéologique ou de leur matériau chronométrique. Le matériel des couches sous-jacentes permet de déterminer un *Terminus Post Quem* (*TPQ*) à la dernière chauffe de la structure et celui des couches sus-jacentes un *Terminus Ante Quem* (*TAQ*). Le *TPQ* est la

date à partir de laquelle l'évènement s'est produit (date plancher) et le *TAQ* est la date avant laquelle l'évènement s'est produit (date plafond). Le *TPQ* et le *TAQ* constituent les bornes de l'intervalle de date de la dernière chauffe.

Cette approche de calage chronologique par le mobilier est la plus couramment utilisée en archéomagnétisme (Bucur, 1994 ; Gomez-Paccard *et al.*, 2006b). Dans le cas de notre corpus, sont concernés les six lots de tessons de Lattes Saint-Sauveur, 21 structures datées par le mobilier céramique et 5 structures datées par la dendrochronologie.

La datation par le mobilier, principalement céramique, est d'abord définie d'une part par l'association des différents objets, qui permet de rattacher l'ensemble des mobiliers et donc le dépôt de l'u.s. à une chrono-typologie régionale. La présence de mobiliers caractéristiques bien datés comme les céramiques d'importation permet aussi de caler le dépôt de l'u.s. sur l'échelle calendaire. Les principes de cette datation par le mobilier sont explicités de manière détaillée dans trois exemples en section suivante.

Dans le cas de la dendrochronologie, l'instant daté est la mort de l'arbre (qui ne peut être déterminée que si l'aubier est conservé), avant qu'il ne soit utilisé dans une structure (charpente, paroi, cuvelage de puits). Autrement dit, la dendrochronologie fournit un *TPQ* à la construction de cette structure. Si le nombre de bois analysés est important, le *TPQ* a plus de probabilité de se rapprocher de la date exacte de construction. La dendrochronologie a été utilisée dans le cas des fourneaux à sel de Sorrus. Le *TPQ* de leur fonctionnement est donné par les nombreux bois retrouvés dans le (ou les) puits associé à la production du sel (Cf. Annexe 3 pour des détails supplémentaires). Le *TAQ* du fonctionnement du puits et donc de la production de sel dans les fourneaux repose sur l'hypothèse d'une longévité maximale de 40 à 50 ans du cuvelage d'un puits (Bernard, 1993).

3. Exemples de calage chronologique

Cette section développe trois exemples de datation « indirecte » effectuée par le mobilier archéologique.

3.1 Le foyer 9534 de la Pâture-du-Couvent au Mont-Beuvray (58128C)

La datation des foyers du Mont-Beuvray a été réalisée en 2009 et 2010 en collaboration avec les équipes archéologiques des chantiers de la Pâture-du-Couvent (équipe de Sabine Rieckhoff) et de la Côme-Chaudron (équipe de Jean-Paul Guillaumet, Gilles Hamm, Tomasz Bochnak et Petra Golanova). Le traitement du mobilier céramique a été suivi dans le cadre d'un stage au Centre Archéologique européen du Mont-Beuvray encadré par Sylvie Barrier.

Le système chronologique du Mont-Beuvray suit l'approche présentée dans la section précédente avec quelques spécificités locales (Paunier et Luginbühl, 2004). L'utilisation de la base de données du Mont-Beuvray nommée « bdb » (créée par Raphaël Moreau et Anne Chaillou) permet d'établir les diagrammes stratigraphiques des unités stratigraphiques (u.s.) voisines du foyer. Au Mont-Beuvray, les u.s. sont formées d'une ou plusieurs unités de fouilles (UF), sur lesquelles est fondée la collecte du mobilier. La Figure 2.10 présente une version simplifiée du diagramme qui a été établi pour le foyer 9534 (B2006.9.9534). Ce foyer est situé dans la pièce 30 de l'angle Nord-Ouest de l'îlot-des-Grandes-Forges (Figure 2.9) à la Pâture-du-Couvent. Le foyer est rattaché au deuxième état de la première phase de cette zone, qui est caractérisée par un bâtiment en bois à portique. Le mobilier de deux couches associées au fonctionnement du foyer (couches de sol [9621] et [9699]), de cinq couches sous-jacentes et d'une couche sus-jacente a été analysé. Ces couches ont été sélectionnées pour leur nombre de tessons céramiques élevé, c'est-à-dire pour leur nombre de restes (NR). Les couches sous-jacentes correspondent aux couches de construction du niveau d'occupation associé au foyer [9709] et aux niveaux d'occupation [9715] et de démolition [9727] de l'état précédent. La couche au-dessus du foyer est un remblai de construction de la phase 2 du bâtiment.

Pour ce foyer et plus généralement sur l'ensemble du Mont-Beuvray, la datation repose sur le mobilier céramique, puisque les mobiliers amphorique (Olmer, 2003) et numismatique (Gruel et Popovitch, 2007 ; Gruel et Haselgrove, 2006) apportent des informations moins complètes. La catégorie et éventuellement la forme et le type des tessons céramiques sont d'abord identifiés : la *catégorie* correspond à un groupe technique qui est défini par les matières premières sélectionnées, la technique de montage, le traitement de la surface. La catégorie est aussi parfois rattachée à une

origine de production (comme dans le cas des céramiques campaniennes). La *forme* (pot, coupe, assiette...) est définie sur des critères morphologiques comme la hauteur ou l'ouverture de la céramique. Certains éléments caractéristiques, la morphologie des lèvres particulièrement, permettent d'identifier un *type* particulier au sein d'une forme. L'étape suivante du traitement du mobilier est la quantification des catégories en nombre de restes (NR) et en nombre minimum d'individus (NMI, défini par le nombre minimal de bords ou de fonds) selon les normes admises par la communauté archéologique française (Arcelin et Tuffreau-Libre, 1998).

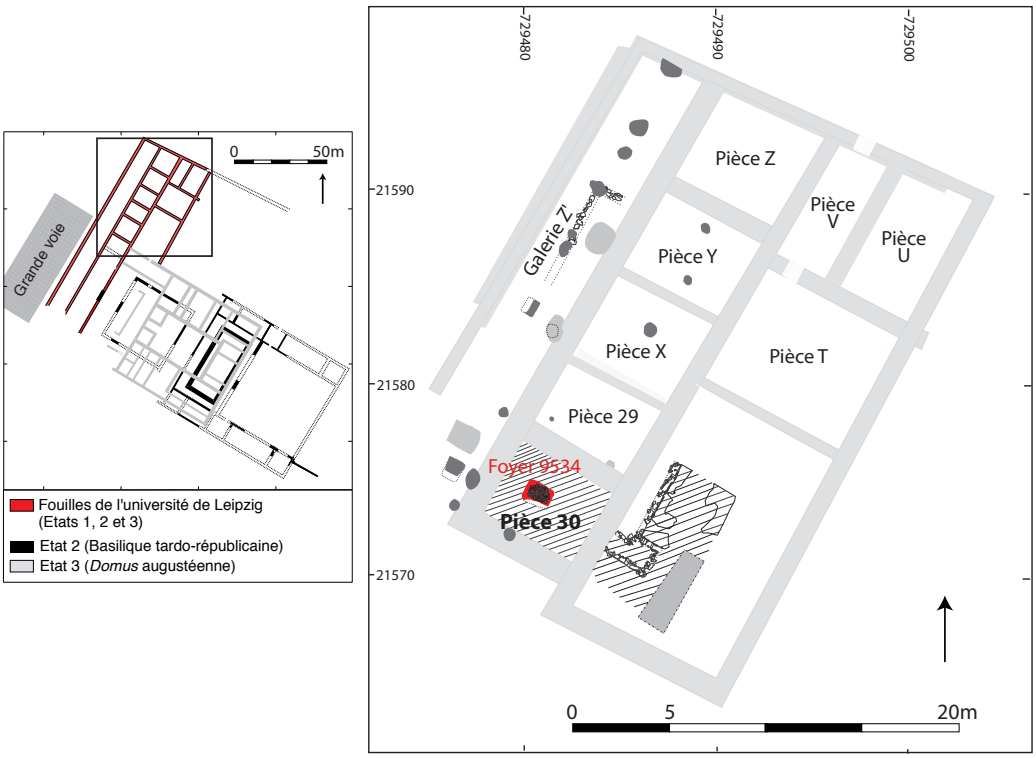
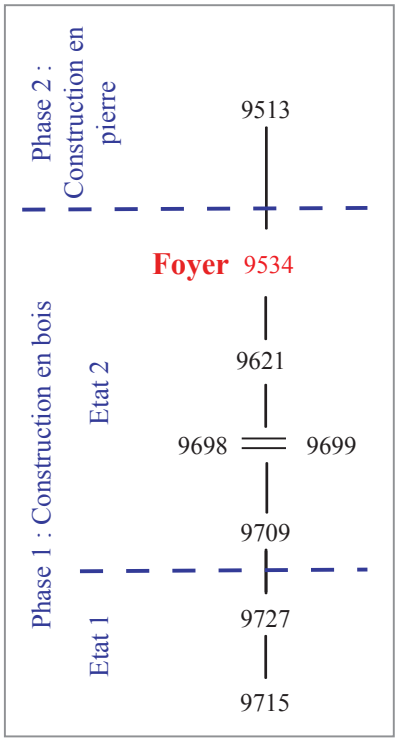


Figure 2.9 : Plan général des fouilles de la Pâture-du-Couvent (fouilles M. Szabó - Université de Budapest et S. Rieckhoff - Université de Leipzig) et plan détaillé de la phase 1 de l'angle Nord-ouest de l'ilot des Grandes-Forges. Le foyer 9534 (B2005.9.9534) est localisé dans la pièce 30. (D'après Rapport annuel d'activité 2009 p 64 et Rapport annuel d'activité 2006 p.84)

Pâture du Couvent - UF 9513 (B2005.9.9513)	
Description	Remblai de construction
NR	240
NMI	52
Faciès céramique	Faciès hétérogène probablement LTD2 (Présence de PGFINH et de PGFINTN non présentes à LTD1, proportion importante de PGFINLF et de mi-fines). Présence de mobilier résiduel caractéristique de LTD1(PEINTA, PEINTB, PSFIN). Perturbations par du matériel intrusif Augustéen (présence de EIRA et de marmites M1 et M5a, absence de céramiques fines PRETS et TSIT).
Mobilier amphorique	Dressel 1
Mobilier métallique	6 monnaies (2 potins LTD1, 1 potin LTD2, 1 potin LTD, 2 illisibles)
TPQ	Vers -30 (EIRA-A17a, PSGROS-M1 et M5a)
TAQ	Vers +15 (Absence de TSGA)
Datation générale	**Environ 90 av. J.-C. à 30 av. J.-C..**

Pâture du Couvent - UF 9621 (B2006.9.9621)	
Description	Sol associé au foyer
NR	28
NMI	11
Faciès céramique	Faciès LTD2a (CAMPB, MIFIN, Cruche 1). Attribution délicate (NR faible)
Mobilier amphorique	Dressel 1
Mobilier métallique	Non porteur d'informations chronologiques
TPQ	Vers -90 (CAMPB)
TAQ	NMI trop faible
Datation générale	**Environ 90 av. J.-C. à 50 av. J.-C..**

Pâture du Couvent - UF 9699 (B2006.9.9699)	
Description	Couche d'occupation
NR	102
NMI	22
Faciès céramique	Faciès LTD2a (PEINTA avec décor végétal, CAMPC, PARFINA, PGFINH). L'élément PRETS, caractéristique de LTD2b, est considéré intrusif.
Mobilier amphorique	Dressel 1
Mobilier métallique	Non porteur d'informations chronologiques
TPQ	Vers -50 (PRETS)
TAQ	Vers -50 (Absence de TSIT)
Datation générale	**Environ 90 av. J.-C. à 50 av. J.-C..**



Pâture du Couvent - UF 9709 (B2006.9.9709)	
Description	Couche d'épandage (construction?)
NR	322
NMI	29
Faciès céramique	Faciès de transition LTD1 - LTD2a (Attribution difficile en raison de la quasi absence de céramiques de tradition méditerranéenne). Présence de catégories anciennes (PEINTA, PSFIN, PCLUSTR) en position résiduelle. Présence de marqueurs de LTD2a (PGFINTN, PEINTB avec décors végétaux ou géométriques, augmentation des PGFINLF, mi-fines).
Mobilier amphorique	Dressel 1 (Albinia, fin LTD1)
Mobilier métallique	5 monnaies (non identifiables)
TPQ	Vers -80 (PGFINTN)
TAQ	Vers -50 (Absence de TSIT)
Datation générale	**Environ 100 av. J.-C. à 50 av. J.-C..**

Pâture du Couvent - UF 9727 (B2006.9.9727)	
Description	Remblai de démolition
NR	183
NMI	22
Faciès céramique	Faciès LTD1b (PEINTA, PEINTB, PGCAT, PGLUSTR, PCLUSTR, PSFINA, PSFINB) avec des indices de débordement vers LTD2a (proportions de céramiques mi-fines et de PGFINLF). Absence cependant de marqueurs de LTD2a (PGFINH, PGFINTN)
Mobilier amphorique	Dressel 1 (Italie du Sud, Albinia)
Mobilier métallique	1 fibule de Nauheim (LTD1b)
TPQ	Vers -150 (PEINTA, PEINTB, PGCAT)
TAQ	Vers -80 (Absence de PGFINH, PGFINTN)
Datation générale	**Environ 120 av. J.-C. à 80 av. J.-C..**

Pâture du Couvent - UF 9715 (B2006.9.9715)	
Description	Couche d'occupation
NR	99
NMI	16
Faciès céramique	Faciès fin LTD1b - début LTD2a. Présence de catégories LTD1 (PEINTA, PEINTB, PSFINB). Rares fragments de catégories apparaissant à LTD2a (MIFIN, PGFINTN).
Mobilier amphorique	Dressel 1
Mobilier métallique	1 monnaie (non identifiable)
TPQ	Vers -80 (PGFINTN: 1 fragment de panse)
TAQ	NMI trop faible
Datation générale	**Environ 120 av. J.-C. à 80 av. J.-C..**

Figure 2.10 : Diagramme stratigraphique simplifié de la pièce 30 de l'angle Nord-ouest de l'îlot des Grandes-Forges et tableaux synthétiques des datations chrono-typologiques des UF. Seules les UF contenant suffisamment de mobilier céramique sont représentées. La légende des catégories céramiques est présentée en annexe 3.

Le mobilier céramique fournit deux informations chronologiques sur la couche archéologique. Premièrement, les proportions des catégories céramiques donnent le faciès de l'ensemble, qui est comparé à la chrono-typologie générale du Mont-Beuvray (Paunier et Luginbühl, 2004) elle-même rattachée à la chronologie laténienne (Figures 1.15 et 1.16). Par exemple pour la couche [9727], l'association des céramiques peintes (PEINTA et PEINTB), des parois fines à pâte sombre (PSFINA et PSFINB) et des pichets catalans (PGCAT) est caractéristique d'un faciès de la fin de la Tène D1.

Certaines catégories ou certains types de tessons bien datés donnent aussi un *TPQ* et un *TAQ* à la formation de l'u.s.. Le *TPQ* est défini par la date d'apparition la plus récente des types, en l'occurrence les céramiques peintes pour la couche [9727] (150 av. J.-C. environ). Le *TAQ*, plus difficile à déterminer, est défini par l'absence des catégories céramiques emblématiques des faciès plus récents. Le *TAQ* ne peut donc être défini qu'à partir d'un nombre de tessons statistiquement suffisant (NR au moins supérieur à 100 tessons). Pour la couche [9727], le *TAQ* est défini en 80 av. J.-C. du fait de l'absence de catégories très fréquentes à la Tène D2 comme la céramique *terra nigra* (PGFINTN) et la céramique fine à pâte grise homogène (PGFINH).

L'homogénéité du faciès et la cohérence de la date donnée par le faciès avec les *termini* permettent d'apprécier la fiabilité de la datation proposée pour l'u.s.. Cette analyse a été réalisée pour chacune des u.s. sélectionnées. Le mobilier des niveaux d'occupation ([9621] et [9699]) associés au foyer de la Pâture du Couvent est daté de la Tène D2a entre 90 et 50 av. J.-C. La datation légèrement plus ancienne des trois couches sous-jacentes est cohérente avec cet intervalle de date. En théorie, le *TPQ* du foyer pourrait être fixé en 90 av. J.-C. Cependant, comme le nombre de tessons des couches [9621] et [9699] reste limité, le *TPQ* de la dernière chauffe du foyer (100 av. J.-C.) a plutôt été choisi en fonction de la datation de la couche [9709]. Le *TAQ* de la dernière chauffe a été défini *a silentio* en 50 av. J.-C. par l'absence presque totale de marqueurs caractéristiques de la Tène D2b dans les niveaux d'occupation [9621] et [9699]. La datation du *TAQ* ne peut pas être précisée par le mobilier très hétérogène de la couche [9513].

3.2 Le foyer 2022 de la Côme-Chaudron au Mont-Beuvray (58128D) : utilisation conjointe du mobilier et de la dendrochronologie

Pour le calage chronologique de la dernière chauffe de ce foyer, l'analyse du mobilier céramique a été utilisée en combinaison avec la dendrochronologie. Le foyer est construit au centre de la pièce 1977, dont les parois en bois ont été conservées suite à un incendie (Figure 2.11). L'analyse dendrochronologique fournit un *TPQ* en 66 av. J.-C. à la construction de la pièce et donc à la dernière chauffe du foyer. Le *TAQ* (20 av. J.-C.) de cet instant est donné par le mobilier céramique retrouvé dans les couches de démolition (Cf Annexe 3 pour plus de détails). Dans le cas de ce foyer, la dendrochronologie apporte un *TPQ* absolu très fiable et très précis, qui vient pallier le manque de mobilier de la couche d'occupation [1751].

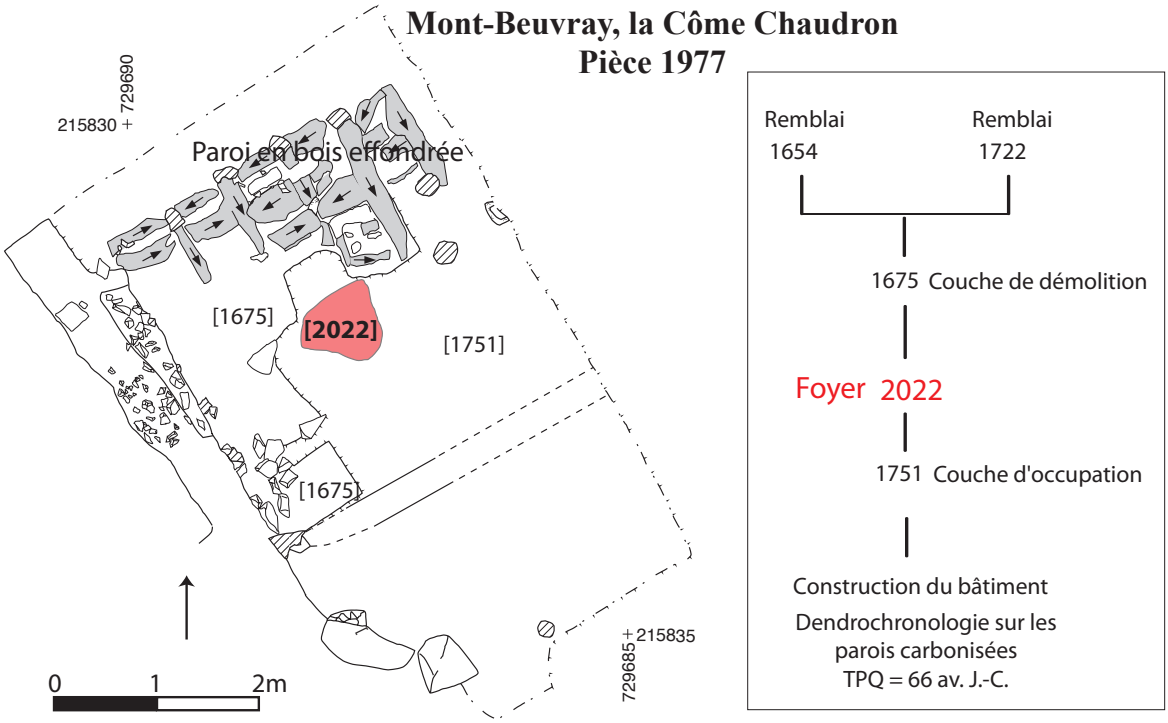


Figure 2.11 : Calage chronologique de la dernière chauffe du foyer 2011 de la pièce 1977 sur le site de la Côme-Chaudron au Mont-Beuvray. Plan (d'après Rapport annuel d'activité 2004, Fig. 11 page 182) et diagramme stratigraphique simplifié de la pièce 30.

3.3 La datation des lots de tessons de Lattes Saint-Sauveur : un cas particulier

Au sein de notre corpus, la datation des lots de tessons de Lattes est un cas particulier, car ce sont des matériaux déplacés depuis le moment d'acquisition de l'aimantation. La datation du lot de tessons coïncide avec la datation chrono-typologique de l'unité stratigraphique, qui est réalisée avec le logiciel Syslat (Py, 1997) à partir des datations des mobiliers recensés dans la base de données Dicocer (Py, 1993). A Lattes, l'échelle calendaire est divisée en intervalles de 25 ans et les unités stratigraphiques (u.s.) sont datées dans des intervalles de 25 ou 50 ans en fonction de la quantité de mobilier.

Pour chaque u.s., plusieurs datations sont proposées suivant la chrono-typologie du mobilier, suivant les associations des catégories de tessons (datation euclidienne, Cf. ci-dessous) et enfin en tenant compte de la stratigraphie. Premièrement, la datation par la chrono-typologie du mobilier, qui est définie avec les types porteurs d'informations chronologiques, est exprimé par un *TPQ* noté TPM et un *TAQ* noté TAM. La figure 2.12 présente l'exemple de la datation de l'u.s. 27345. Le TPM est défini par la date d'apparition la plus récente des types identifiés, en l'occurrence 425 av. J.-C. par le bord de coupe skyphos attique à figure rouge AT-FR Ky16b. Le TAM est équivalent à la date de disparition la plus ancienne, égale à 400 av. J.-C. avec la coupe à tige attique à figures rouges AT-FRKyB, la coupe à anses à pâte claire massaliète CL-MAS 425, le mortier étrusque COM-ETR 3 et l'amphore massaliète A-MAS bd4. Certains types sont probablement résiduels : le cratère GR-MONO 7C en grise monochrome est l'exemple le plus évident.

Un deuxième intervalle de date est défini par la « datation euclidienne ». Les proportions des différentes catégories céramiques de l'u.s. sont comparées à une chronologie relative de référence définie à l'échelle du site et divisée en intervalles de 25 ans. L'intervalle de date euclidien à 25 ans [TPE ; TAE] est l'intervalle avec lequel les proportions des catégories l'u.s. se rapproche le plus, c'est-à-dire l'intervalle pour lequel la distance euclidienne (racine carrée de la somme des carrés des différences entre les proportions de chaque catégorie céramique) est la plus faible.

Us 27345
Secteur: 2; année: 1999; phase: 27F3

Nature de l'Us: remblai de limon.
Description: Couche épaisse de limon jaune avec traces grises (adobes et liant). Peu de charbons et de restes organiques; tessons dispersés. Présence à la base du remblai remblai d'un dépot (?): mortier (étrusque ?) et deux objets en fer (DP27354).La base du remblai est nette sur un ou des sols mais difficile àdéterminer sur des creusements et autres zones perturbées (notamment dans la partie nord-est du secteur.
Interprétation: Remblai de réaménagement à base de matériau de démolition (adobes).

–*Inventaire: Faune:* 72 os; 6 coquillages. *Bronze:* 1 fibule; 1 arc de fibule. *Terre:* 1 galet poli; 1 fusaïole; 1 fr. d'enduit peint. *Pierre:* 1 bloc de calcaire taillé. *Verre:* 1 fr. de perle à décor ocelé. *Divers:* bébé : 6. *Céramique:* 1 trou de reparation sur CNT-Lor; 1 trou de reparation sur MORT-E; 1 trou de reparation sur AT-VN [portoirs 2549, 2550, 4020, 2617, 1743, 2532, 2533, 2013].

–*Comptages:* 8 fragments de céramique grise monochrome; 26 fragments de céramique à pâte claire peinte; 14 fragments de céramique attique; 43 fragments de céramique à pâte claire; 9 fragments de céramique commune tournée du Languedoc oriental; 1 fragment de mortier massaliète; 2 fragments de céramique commune ibérique; 2 fragments de mortier étrusque; 25 fragments d'amphore étrusque; 632 fragments d'amphore massaliète; 6 fragments d'amphore ibérique; 1 fragment d'amphore punique; 366 fragments de céramique non tournée régionale; 69 fragments de dolium. Total: 1204 fr.
–*Statistiques: Sur le total des fragments:* vaisselle 39.1%, amphores 55.1%, dolium 5.7%. *Sur les fragments de vaisselle:* tournée fine 10.2%, tournée commune 12.1%, non tournée 77.7%

–*Typologie:*
attique à fig. rouges: 1 bord de coupe-skyphos AT-FR Ky16b; 1 fond de coupe à tige AT-FR KyB; 1 fond de coupe à tige AT-FR KyC
attique à vernis noir: 1 bord de Castulo cup AT-VN 469-473; 1 fond
céramique à pâte claire ancienne: 1 bord, 1 fond et 2 anses de cruches CL-MAS
céramique à pâte claire peinte: 1 bord de coupe carénée CL-MAS 222; 1 bord de coupe à une anse CL-MAS 412; 1 bord de coupe à anses CL-MAS 425; 1 bord de cruche CL-MAS 530/560; 2 fonds de coupes CL-MAS; 3 fonds
com. tournée Lang. or.: 1 bord de jatte CCT-LOR 4; 3 fonds et 1 décor d'urnes CCT-LOR
commune ibérique: 1 fond
céramique non tournée Lang. or.: 11 bords de coupes CNT-LOR C1; 2 bords de coupes CNT-LOR C2; 1 bord de coupe CNT-LOR C3; 3 bords de coupelles CNT-LOR C5; 1 décor CNT-LOR incision-fine; 3 bords de jattes CNT-LOR J1c; 1 bord de jatte CNT-LOR J1d; 8 bords d'urnes CNT-LOR U2; 1 bord d'urne CNT-LOR U4; 9 bords d'urnes CNT-LOR U5; 1 bord d'urne sans col CNT-LOR U6a3; 4 bords de couvercles CNT-LOR V2a; 1 bord de couvercle CNT-LOR V2c; 10 fonds; 13 décors d'urnes CNT-LOR; 1 fond de couvercle CNT-LOR
grise monochrome: 1 bord de cratère GR-MONO 7c; 4 décors
mortier massaliète: 1 bord de mortier CL-MAS 621
mortier étrusque: 1 bord de mortier COM-ETR 3
amphore ibérique: 1 bord d'amphore A-IBE
amphore massaliète: 2 bords A-MAS bd3; 1 bord A-MAS bd4; 1 bord A-MAS bd5; 5 bords A-MAS bd5; 8 bords A-MAS bd6; 14 anses d'amphores A-MAS
amphore étrusque: 1 bord et 1 anse d'amphores A-ETR 4; 1 bord d'amphore A-ETR 4A
dolium: 5 décors de jarres DOLIUM.

–*Datation:* -425/-400.

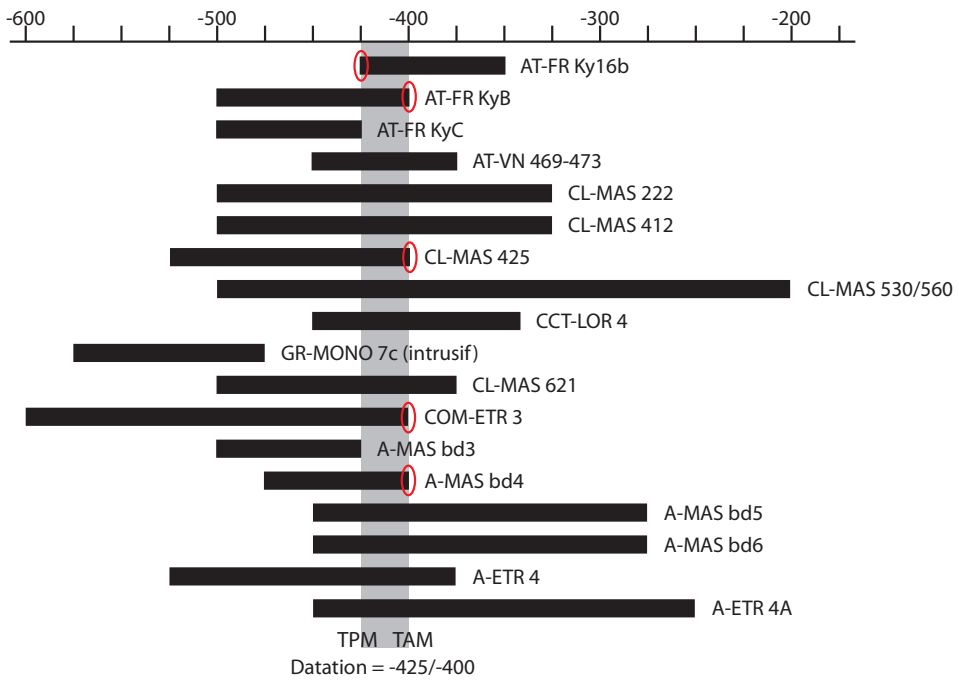


Figure 2.12 (page précédente) : Datation de l'u.s. 27345 de Lattes Saint-Sauveur. Onze tessons de céramique no- tournée du Languedoc Oriental ont été analysés. En haut, tableau récapitulatif de l'u.s. d'après Syslat. En bas, datation par le mobilier (Les intervalles de date sont fournis par Dicocer, Py, 1993). Les ellipses indiquent les types utilisés pour définir le TPM et le TAM.

Un troisième intervalle de date, noté [TPF ;TAF] (pour *TPQ* et *TAQ* de la formation) est proposé à partir de la stratigraphie. Ces trois intervalles de date sont confrontés pour aboutir à un unique intervalle de date [*TPQ* ;*TAQ*] pour la formation de la couche. L'intercomparaison permet d'obtenir des datations plus fiables. Dans le cas de notre travail, la cohérence des intervalles de date obtenus selon les trois méthodes a été un critère de sélection des u.s.. Le fonctionnement du foyer 54567 de Lattes (34129A) a également été daté suivant cette procédure.

4. Limites du calage chronologique

L'analyse détaillée du contexte archéologique et chronologique selon les principes développés en section 2 est nécessaire pour assurer le meilleur calage chronologique possible. Le cas idéal (Figure 2.6) est une datation directe de la fin du fonctionnement du four ou du foyer, par la thermoluminescence ou par le radiocarbone (sur plusieurs charbons de petit bois provenant du niveau de cendres associé à la dernière utilisation du four). Cette datation directe peut être confortée par la datation chrono-typologique des unités stratigraphiques antérieures et postérieures à cette dernière utilisation.

Alors que les résultats chronométriques « absolus » donnent en général des résultats pérennes (Evin, 2008 pour le radiocarbone), la datation par le mobilier est plus susceptible d'évoluer du fait des améliorations des chrono-typologies. Comme l'illustrent les exemples précédents, il est aussi plus difficile de s'assurer de la fiabilité d'une datation chrono-typologique, car elle dépend de nombreux facteurs : l'interprétation correcte du contexte stratigraphique, le nombre de tessons datants, l'homogénéité de l'ensemble, l'état de la chrono-typologie régionale, mais également l'expérience du céramologue (Rivet, 2007). Au cours de notre étude, plusieurs

problèmes se sont posés pour les structures dont la dernière chauffe est calée chronologiquement par le mobilier :

Problème 1 : la datation par les importations méditerranéennes

Comme le montrent les exemples précédents du Mont-Beuvray et de Lattes, la datation par la chrono-typologie des céramiques repose essentiellement sur les céramiques fines d'importation méditerranéenne (céramiques étrusques, marseillaises, grecques ou italiques). Ces catégories sont peu fréquentes sur les sites archéologiques et il apparaît nécessaire d'avoir un nombre de tessons datants important pour avoir un calage chronologique fiable. Par exemple, le four 5106 de Perpignan-Ruscino est daté par les archéologues du dernier quart du VII^{ème} siècle av. J.-C. grâce à un tesson de *bucchero nero* (céramique fine étrusque) et huit tessons d'amphores étrusques (Marichal et Rébé, 2003). Sans remettre en cause la date centrale de cet intervalle, nous en avons doublé la largeur, [-640 ;-585].

De plus, les céramiques d'importation sont plus susceptibles d'avoir une longue durée d'utilisation (Morel, 1990). Le risque d'un décalage significatif entre la date de production et la date d'arrivée sur le site n'est donc pas nul. Cependant, comme les sites de production sont le plus souvent mal localisés ou inconnus, les intervalles de date donnés par ces céramiques sont généralement définis sur les sites d'utilisation et correspondent à la date de circulation de ces céramiques.

Problème 2 : le passage de la chronologie relative à la chronologie absolue

Une autre difficulté du calage chronologique par le mobilier est le passage de la chronologie relative à l'échelle calendaire. Si dans le Midi les archéologues travaillent en date calendaire, les datations dans l'aire non-méditerranéenne sont généralement abordées selon la chronologie hallstattienne et laténienne (Figure 1.15). Cette chronologie reste particulièrement « flottante » et susceptible d'être modifiée, à l'exception peut-être de la fin du premier millénaire av. J.-C. (Cf. Chapitre 2, page 62) et des régions riches en palafittes comme le Jura (Cf. Chapitre 2, page 63). Par exemple, le fonctionnement du foyer 63 du 4-6 rue-du-Mont-d'Or à Lyon-Vaise est daté de la transition entre le Hallstatt D3 et la Tène A1, dont le calage sur l'échelle calendaire est

très discuté même s'il est placé vers -450/-440 par la majorité des chercheurs (Cf. Chapitre 2, page 64). Toujours par précaution, nous avons décidé de dater le moment d'acquisition de l'aimantation dans un intervalle plus large [-500 ;-400]. Ces intervalles plus larges peuvent être ultérieurement réduits en fonction des nouvelles données archéologiques, comme le montre l'étude archéomagnétique du site d'Albinia (Hill *et al.*, 2007, Cf. chapitre 8, *Appendix* B).

Problème 3 : la datation par le mobilier du comblement du four

Parfois, un four peut être isolé comme sur les sites de Béziers ZAC-de-la-Domitienne (34032A) et Lunel Mas-de-Fourques (34145A). La datation chrono-typologique repose uniquement sur le comblement du four et de sa fosse d'accès. à Lunel, les 696 tessons (NMI=140) retrouvés dans le comblement du four constituent un ensemble céramique homogène, dont la datation est placée dans le dernier quart du III^{ème} siècle av. J.-C. par la céramique campanienne A (16 tessons pour un NMI de 7 individus). Mais la dernière utilisation d'un four peut précéder de plusieurs années son comblement et donc la datation chrono-typologique (Bellanger et Husi, 2011). La datation du comblement d'un four isolé ne peut être conforté par les autres unités stratigraphiques du site, contrairement aux sites d'habitat comme Lattes Saint-Sauveur. Dans ce cas, il semble préférable d'assurer (si c'est possible) le calage chronologique par une datation radiocarbone, même si l'intervalle de date est plus large. A Lunel Mas-de-Fourques, l'analyse radiocarbone d'un charbon de bois retrouvé à la base du comblement de l'alandier donne un intervalle de date à 95% de confiance entre 386 et 201 av. J.-C., cohérent avec la datation chrono-typologique.

4.3 Comment traiter les erreurs systématiques ?

A cause de ces différents problèmes, les datations par le mobilier sont susceptibles d'être entachées d'une erreur systématique (c'est-à-dire d'une erreur extrinsèque). L'effet vieux bois des datations radiocarbone, même s'il semble minimisé pour le premier millénaire av. J.-C. en raison des effets de plateau sur les courbes de

calibration dendrochronologique, constitue aussi une erreur systématique. Plusieurs solutions peuvent être proposées pour tenir compte des erreurs systématiques.

Solution 1 : Multiplication des structures de référence, des aires géographiques et des méthodes de datation

La confrontation des résultats archéomagnétiques obtenus sur des structures datées par des méthodes variées permet de vérifier la cohérence et la fiabilité du corpus de référence (Cf. Chapitre 8, Figure 12). Pour la même raison, il paraît judicieux d'analyser pour chaque période (pour chaque siècle par exemple) des sites de plusieurs régions. Les chrono-typologies varient en effet régionalement et la dispersion géographique des sites de référence limite le risque d'une erreur systématique due à une mauvaise attribution sur l'échelle calendaire d'une seule chrono-typologie flottante régionale. Ce principe est globalement respecté dans le cas de notre corpus. On peut également remarquer que la chronométrie est utilisée préférentiellement pour l'aire non-méditerranéenne, le premier âge du Fer et le début du second âge du Fer, qui sont les régions et les périodes pour lesquelles les chronotypologies établies restent incertaines. Le risque d'erreurs systématiques paraît alors considérablement diminué.

Solution 2 : Prise en compte de la possibilité d'une erreur systématique lors de la construction de la courbe de référence

Le logiciel Rencurve de construction des courbes de référence par la statistique bayésienne, développé à Rennes par Philippe Lanos (Lanos, 2004) prend en compte la possibilité d'une erreur systématique en incluant chaque datation *a priori* d'une structure de référence dans un « Fait » (Lanos et Dufresne, 2012). Cette notion de « Fait » ajoute un degré de liberté sur la datation (Cassen *et al.*, 2009). Autrement dit, les bornes des intervalles de date *a priori* ne sont plus limitatives. A la différence d'une courbe construite par moyenne mobile, cette approche statistique bayésienne permet ainsi d'obtenir des courbes de référence beaucoup moins sensibles aux erreurs systématiques.

De plus, cette approche statistique permet de tenir compte de la stratigraphie des structures. Cette information supplémentaire, qui réduit le nombre de degrés de liberté

des datations *a priori*, permet de construire des courbes de référence plus précises et plus fiables. L'exemple le plus éloquent est la courbe de Lübeck établie à partir de 25 fours de boulanger superposés (Schnepp *et al.*, 2009). Malheureusement, de tels contextes archéologiques sont rares et pour notre corpus, les relations stratigraphiques n'ont pu être prises en compte que pour les cinq fourneaux à sel de Gouy-Saint-André (62382A-B-C-D-E), pour les deux états du fourneau 2 de Sorrus-la-Bruyère (62799B1-B2) et pour les deux foyers superposés de la Côme-Chaudron au Mont-Beuvray (58128E-F).

Conclusion

La résolution et la fiabilité des courbes de référence dépendent essentiellement du calage chronologique des structures de référence. Toute l'information chronologique associée à la construction, à l'utilisation et à l'abandon du four ou du foyer doit être utilisée pour chercher à mieux contraindre le moment d'acquisition de l'aimantation, comme l'illustre l'exemple du foyer 9534 de la Pâture-du-Couvent au Mont-Beuvray. Le problème des possibles erreurs systématiques sur le calage chronologique des structures de référence et donc sur la courbe de référence, est évité en :

- multipliant, sur une aire géographique large, le nombre de points datés par différentes méthodes.
- utilisant des outils statistiques bayésiens, qui prennent en compte l'ensemble de l'information archéologique comme la stratigraphie. La possibilité d'erreurs systématiques est résolue par la notion de « Fait ».

Ces principes ont été appliqués à notre corpus de sites de référence autant que le rendaient possible la documentation archéologique et les limites des méthodes de datation. En ce qui concerne les données archéomagnétiques précédemment acquises (Thellier, 1981 ; Bucur, 1994 ; Gallet *et al.*, 2002), leur calage chronologique est susceptible d'avoir évolué en fonction des progrès des méthodes de datation. Même si la notion de « Fait » permet de tenir compte des éventuels décalages des datations, il serait utile de vérifier le contexte stratigraphique de ces structures pour mieux s'assurer de la fiabilité de ces anciennes données.

Chapitre 5

Protocole d'acquisition des archéodirections et des archéointensités :

Article : Archaeomagnetic results on three Early Iron Age salt-kilns from Moyenvic (France)

Ce chapitre est constitué d'un article publié en 2011 dans *Geophysical Journal International*, co-écrit avec Elisabeth Schnepp, Annick Chauvin, Philippe Lanos et Norbert Nowaczyk. L'analyse des trois fourneaux à sel du site de Moyenvic illustre les difficultés rencontrées pour l'obtention de l'archéodirection et surtout de l'archéointensité. Les archéodirections sont déterminées par désaimantation thermique et par champ alternatif. Les archéointensités sont déterminées par le protocole de Thellier-Thellier (1959), qui nécessite une minéralogie magnétique stable et constituée de grains monodomaines. Or, les évolutions minéralogiques s'avèrent courantes sur les structures protohistoriques et cet article montre que le meilleur moyen de les détecter est d'appliquer le champ du laboratoire dans une direction éloignée de celle de l'aimantation rémanente naturelle (ARN). Cette amélioration du protocole de Thellier-Thellier permet ainsi d'obtenir des archéointensités plus fiables. En raison des évolutions minéralogiques, les archéodirections et les archéointensités des fourneaux de Moyenvic n'ont pas été corrigés des effets de l'anisotropie et de la vitesse de refroidissement (Chauvin, 2000). Aussi, le principe et le protocole de ces corrections sont abordés dans les chapitres 6, 8 et 9.

Geophysical Journal International

Geophys. J. Int. (2011) **185,** 144–156 doi: 10.1111/j.1365-246X.2011.04933.x

Archaeomagnetic results on three Early Iron Age salt-kilns from Moyenvic (France)

Gwenaël Hervé,[1,3] Elisabeth Schnepp,[2] Annick Chauvin,[3] Philippe Lanos[1,3] and Norbert Nowaczyk[4]

[1]*Centre de Recherches en Physique Appliquée à l'Archéologie, UMR* 5060*, Université de Bordeaux* 3*, CNRS, et UMR* 6118*, Université de Rennes* 1*, CNRS, Campus de Beaulieu, CS* 74205*,* 35042 *Rennes Cedex, France. E-mail: gwenael.herve@univ-rennes1.fr*

[2]*Paleomagnetic Laboratory Gams, Chair of Geophysics, University of Leoben, Gams* 45*, Frohnleiten* A8170*, Austria*

[3]*Géosciences-Rennes, UMR 6118, Université de Rennes* 1*, CNRS, Campus de Beaulieu, Bat* 15*, CS* 74205*, Rennes Cedex* 35042*, France*

[4]*GeoForschungsZentrum Potsdam, Section* 5.2*—Palaeoclimate & Landscape Evolution Helmholtz-Zentrum Potsdam Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ Telegrafenberg Haus* C321*, Potsdam D-*14473*, Germany*

Accepted 2010 December 26. Received 2010 December 17; in original form 2010 June 23

SUMMARY

Variations of the Earth's magnetic field during the first millennium BC in western Europe remain poorly constrained, especially archaeointensity changes. Three salt-kilns (MOA, MOB and MOC) sampled in Moyenvic (Lorraine, eastern France) have been studied to provide new reference data. Each kiln has been dated by radiocarbon to originate from the Early Iron Age or Hallstatt period (between VIII and Vth Century BC). Rock magnetic experiments and hysteresis results suggest the predominance of pseudo-single domain (PSD) Ti-poor magnetite. Archaeomagnetic directions obtained by thermal and alternating field demagnetizations have high mean inclination (close to 70°) and declination (between 19 and 31°). A first set of classical Thellier–Thellier experiments was conducted on 46 samples with a laboratory field almost parallel to the direction of the characteristic remanent magnetization (ChRM). Only 24 of these specimens present a linear NRM–TRM plot. For other specimens, NRM–TRM plots are concave-up with positive pTRM checks. The very large dispersion observed between the determined palaeointensity values suggests some artefacts have not been fully recognized. A second set of Thellier experiments was conducted on 34 sister specimens with the laboratory field applied quasi-perpendicular to the ChRM. In these cases, mineralogical evolutions during heating and chemical remanent magnetization acquisitions have been clearly recognized, despite positive pTRM checks. The concave-up shapes of NRM–TRM plots appear mainly due to mineralogical alteration rather than to the presence of PSD–MD grains. For the entire set of samples the success rate of the palaeointensity determinations is very low with 80 per cent of the samples rejected. Nevertheless, reliable mean archaeointensities have been obtained for two of the three kilns (MOA, 80.1 ± 14.5 μT and MOB, 86.6 ± 6.9 μT at the latitude of Paris). The high field strength and the archaeomagnetic directions determined, combined with previous published data, provide further evidence for important changes of the Earth magnetic field in Europe during the first half of the first millennium BC. These large variations of the geomagnetic field during the Iron Ages indicate that archaeomagnetism is highly suitable for dating of structures from this period.

Key words: Archaeomagnetism; Magnetic field; Palaeointensity; Palaeomagnetic secular variation.

1 INTRODUCTION

Knowledge of the secular variation of the geomagnetic field in Western Europe has been considerably improved over recent years using archaeodirections (e.g. Gallet *et al.* 2002; Schnepp & Lanos 2005; Gomez-Paccard *et al.* 2006; Tema *et al.* 2006; Zananiri *et al.* 2007) as well as archaeointensities (Gomez-Paccard *et al.* 2008; Genevey *et al.* 2009, Schnepp *et al.* 2009). These new data have allowed considerable improvement in geomagnetic field models, on both global (ARCH3k, Korte *et al.* 2009) and regional (SCHA.DIF.3k, Pavon-Carrasco *et al.* 2009) scales. Archaeomagnetic dating has also become increasingly applicable in many European countries (Lanos 2004). In France and in Germany, directional secular variation curves cover, respectively, the last 2500 and 3000 yr. (Gallet

© 2011 The Authors
Geophysical Journal International © 2011 RAS

et al. 2002; Schnepp & Lanos 2005). However, the resolution of these curves only permits reliable archaeomagnetic dating of archaeological structures for the last two millennia. Archaeomagnetic dating is not yet sufficiently developed for the first millenium BC, that is, for the Iron Age.

The archaeointensity reference curve of Gomez-Paccard *et al.* (2008), established with western Europe data, covers only the last two millenia. Archaeointensity data for the first millennium BC were mainly obtained on sites from the Mediterranean area (Hill *et al.* 2007, 2008; Gallet *et al.* 2009) and eastern Europe (De Marco *et al.* 2008; Kovacheva *et al.* 2009). The number of data from northwestern Europe has to be increased to improve geomagnetic field model for this time period.

Moreover, all preliminary European data for the first millenium BC indicate very strong variations of the Earth's magnetic field, especially for declination and archaeointensity. Accordingly, this period appears very interesting for both understanding the evolution of the geomagnetic field and increasing the resolution of archaeomagnetic dating. As radiocarbon is not very precise for this period due to plateau effects on the dendrochronological calibration curve, archaeologists need another effective chronometric dating method. The aim of this study is to provide new reference data contributing to the French and German databases for the first millenium BC. It represents a new step to build secular variation curves useful for archaeomagnetic dating.

2 ARCHAEOLOGICAL CONTEXT

The village of Moyenvic is located in the Seille Valley, in the Lorraine region (eastern France, Fig. 1). The Seille valley is known as the most important centre of salt production in Northern Europe during the Early Iron Age (Bertaux 1987). Because of leaching of Triassic evaporitic layers, all springwaters in the area present a high salinity. Salt was produced in kilns during the Early Iron Age by the 'briquetage' technique (Daire 2003), which begins with an evaporation step, followed by the agglomeration of salt crystals at higher temperatures (700–750°C). It is in that latter step that kiln walls acquired a thermoremanent magnetization (TRM).

The survey excavation at the archaeological site of 'les Crôleurs' (48.80°N, 6.6°E) was undertaken by J.-D. Laffitte in 1999 and completed in 2001 (Laffitte 2002). 15 salterns and 40 salt-kilns were identified over 1 ha. Like most other kilns in this area, the three kilns we sampled, identified here as kilns MOA, MOB and MOC (Fig. 1) are underground and horseshoe shaped. Sampled kilns are

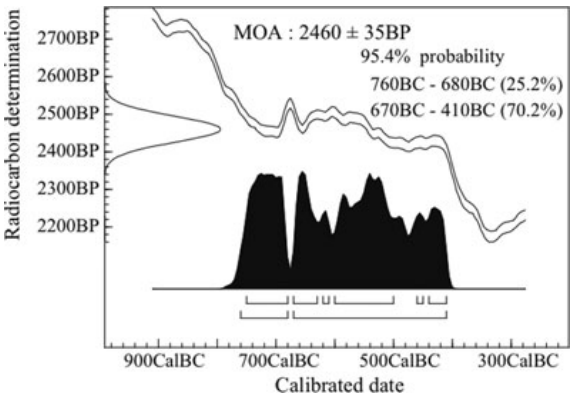


Figure 2. Example of radiocarbon dating on charcoal found in kiln MOA. Despite accurate uncalibrated ^{14}C-age, the presence of a plateau on the calibration curve during the Early Iron Age leads to large intervals on date estimate.

1.50–2.50 m long. Kiln walls seem to be have been well heated, particularly the central pillar.

The use period of the three kilns has been dated by radiocarbon analysis on charcoals found in each one of them. These analyses were carried out at the Groningen laboratory. Calibration of radiocarbon ages was realized with the Intcal04 curve (Reimer *et al.* 2004), using Oxcal software (v. 3.10, Bronk Ramsey 2005). Although the uncalibrated radiocarbon ages are precise, the calibrated date intervals are large, due to the long plateau in the calibration curve during the Early Iron Age (Fig. 2). Table 1 presents uncalibrated ages and calibrated dates at 95 per cent confidence for the three kilns. The absence of stratigraphic relationships between these kilns does not permit to reduce the intervals of calibrated dates.

3 SAMPLE PREPARATION AND MEASUREMENTS

29 large blocks samples on MOA, 23 on MOB and 18 on MOC were collected. They were oriented by placing plaster hats on the top surface (levelled horizontal using a bubble) and oriented using a magnetic compass and if possible a sun compass (MOB and MOC).

The block samples were very brittle and have been consolidated with waterglass. Two slices of 20 mm thickness, designated A and B, were cut from each block. One slice of each block has been

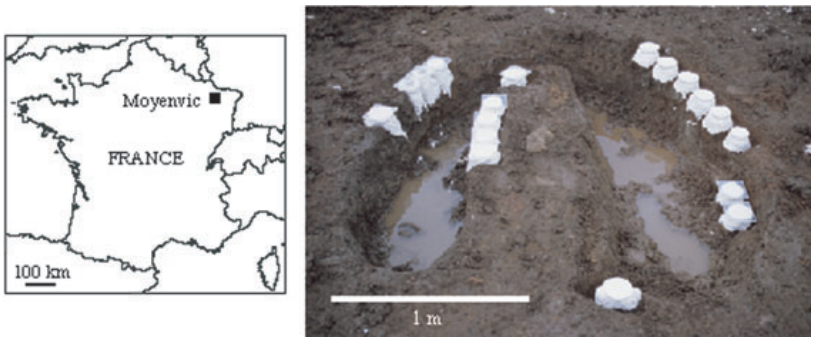


Figure 1. Location of the archaeological site Moyenvic les Crôleurs (48.780°N, 6.570°E) in Lorraine, Eastern France (left-hand side) and field photograph of horseshoe kiln MOC during sampling (right-hand side).

© 2011 The Authors, *GJI*, **185,** 144–156
Geophysical Journal International © 2011 RAS

Table 1. Results of radiocarbon dating on charcoal sampled in each kiln. Calibrated ^{14}C dates are obtained with Oxcal software (Bronk Ramsey 2005) using the IntCal04 calibration curve (Reimer *et al.* 2004).

Kiln	Uncalibrated ^{14}C age (years BP)	Calibrated ^{14}C dates at 95.4 per cent confidence (CalBC)	^{14}C Age used in Fig. 13 (years BC)
MOA	2460 ± 35	[760; 680] and [670; 410]	585 ± 176
MOB	2550 ± 30	[800; 740], [690; 660] and [650; 540]	672 ± 129
MOC	2550 ± 50	[820; 510]	665 ± 155

further processed in the palaeomagnetic laboratory of Geosciences Rennes (France) and the other half was treated in the palaeomagnetic laboratory Grubenhagen of the LIAG (Germany) and in the palaeomagnetic laboratory Gams of the University of Leoben (Austria). Slices were cut into cubes of 8 cm^3 that were weighed.

Natural remanent magnetization (NRM) was measured with a 2G cryogenic magnetometer (Rennes, GAMS and Grubenhagen) or a Molspin spinner magnetometer (Rennes). Bulk susceptibility was measured with a Minikappa (Grubenhagen) or a Bartington MS2 (Rennes). In Rennes, thermomagnetic curves were obtained with a KLY3 Agico susceptibility meter with fitted furnace by heating–cooling cycles successively up to 350 and 650°C. In the palaeomagnetic laboratory of the GFZ Potsdam, hysteresis loop measurements have been carried out in a Princeton Micromag AGFM on small chips (a few milligrams) and for 11 additional chips isothermal remanent magnetization (IRM) acquisition and backfield curves were determined. First-order reversal curve (FORC) diagrams (Pike *et al.* 1999; Roberts *et al.* 2000) were measured at Potsdam.

Pilot alternating field demagnetizations were carried out using a Magnon demagnetizer up to 200 mT (Grubenhagen) or in a 2G-AF demagnetizer in line with the 2G cryogenic magnetometer. One specimen per sample was used, sometimes two. Thermal demagnetization was performed with a Magnon thermal demagnetizer (Grubenhagen) and a Magnetic Measurements Thermal Demagnetization (MMTD) oven (Rennes) for one specimen per sample and steps of 50°C from 150 to 600°C. A Thellier viscosity test (Thellier & Thellier 1944) was performed in Grubenhagen by storing two specimens per samples during 14 d with the $+Z$ and then the $-Z$ direction aligned with the Earth's magnetic field direction.

The classical Thellier–Thellier method (Thellier & Thellier 1959) with partial thermoremanent magnetization (pTRM) checks was used to estimate archaeointensity. Heating steps were realized in air in a MMTD oven in the laboratory of Rennes. At each temperature step, specimens were heated and cooled twice, first in a laboratory field $+F_{\rm Lab}$ and second in the opposite field $-F_{\rm Lab}$. Only specimens whose AF or thermally demagnetized sisters-specimens presented a single component of magnetization have been chosen. First, specimens of the three kilns were heated in a laboratory field of 60.0 μT applied along their Z-axis. In a second step, new Thellier experiments have been conducted with a laboratory field of 70 μT applied along the X-axis of the specimens. Eight to 12 temperature steps were performed from 100 to 560°C. Low-field susceptibility was measured after each heating step.

4 ROCK MAGNETIC RESULTS

4.1 Koenigsberger ratios

NRM intensity is plotted versus bulk susceptibility in Fig. 3(a) together with lines of increasing Koenigsberger ratios (Q defined as the ratio of NRM to the induced magnetization, a field of 40 A m^{-1} was used). In most cases, Q values are above 10 showing that these specimens acquired a TRM during the use of the kilns. For kiln MOA, the position of the block with respect to the combustion chamber is indicated by colour variations. Here most specimens (black crosses in Fig. 3) from blocks taken in the inner part of the kiln have higher NRM and susceptibility values comparable with those of the other kilns. The material of kiln MOA is very inhomogeneous and contains fragments of baked clay and some potsherds. Presumably this contributes to the large scatter in NRM intensities and in bulk susceptibilities. Generally, specimens from blocks sampled in the outer parts of the kiln (grey crosses) have Q-ratios below 5, suggesting that they acquired a weak partial thermoremanence.

4.2 Viscosity index

The viscosity index is defined as the ratio of the viscous remanent magnetization acquired within 14 days of storage in the laboratory field to that of the NRM (Thellier & Thellier 1944). Here it is mostly below 5 per cent (Fig. 3b), thus indicating little viscous contribution to a stable NRM. Only a very weak directional change of NRM directions is obtained after removing these small viscous components. No viscosity tests were performed on blocks MOA 12–29, because a partial thermoremanence is expected for these samples.

4.3 Magnetic stability

Figs 3(c) and (d) show the median destructive temperatures (MDT) and median destructive fields (MDF) for thermal and AF demagnetization, respectively. Usually the values of MDT lie above 350°C indicating high unblocking temperatures. Most MDF values are between 15 and 30 mT. These properties suggest the predominance of a magnetic carrier close to a magnetite composition.

4.4 Curie points

Furthermore, a Curie point close to 580 °C is observed on most of the 28 thermomagnetic curves (Fig. 4) suggesting that the predominant magnetic carrier is magnetite. However, in several specimens (e.g. MOB7 and MOB3), a Curie point around 200 °C is also observed. In addition, some specimens like MOB15 carry a ferrimagnetic phase with a Curie temperature of 620°C, which could indicate the presence of partially oxidized titanomagnetite or titanomaghemite. Most thermomagnetic curves are reversible for heating up to 350–400 °C but irreversible for heating up to 600 °C, especially for kiln MOC.

4.5 Hysteresis

In total, 24 IRM hysteresis curves have been measured with maximum fields of 1 T or 2 T. The results are plotted (Fig. 5) in a

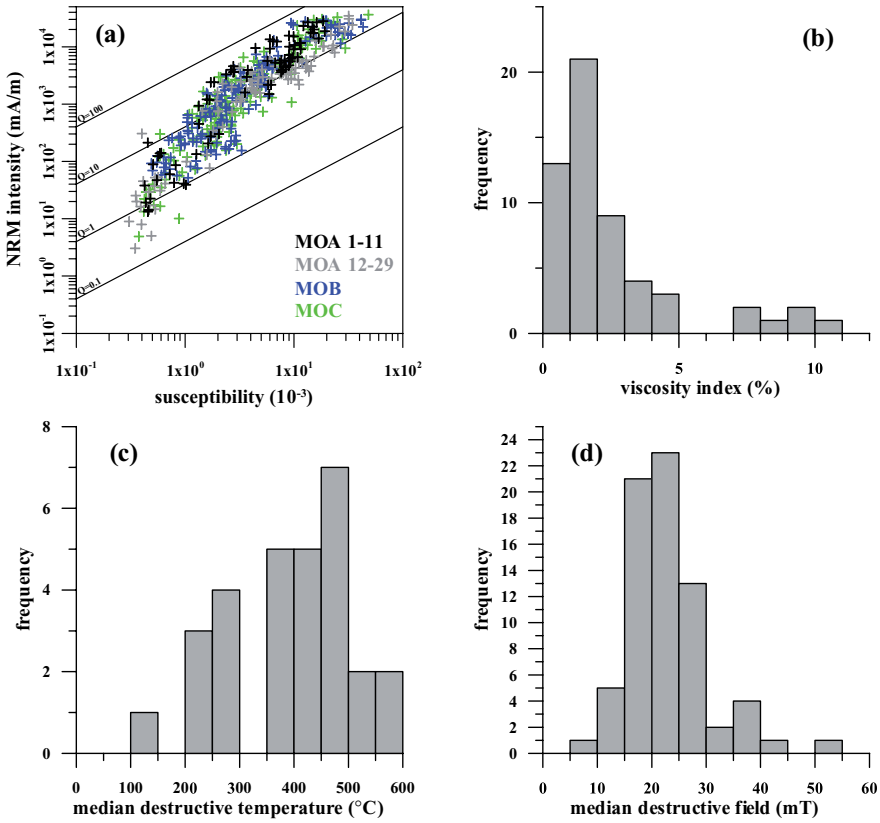


Figure 3. Rock magnetic parameters of the kilns. (a) Intensity of natural remanent magnetization (NRM) is plotted versus bulk susceptibility. Lines indicate constant Koenigsberger ratios between 0.1 and 100. Kiln MOA was divided into inner (1–11) and outer part (12–29). (b) Viscosity index obtained from experiments according to (Thellier & Thellier 1944). (c) Median destructive temperature. (d) Median destructive field obtained from thermal and alternating field demagnetization, respectively.

Day diagram (Day *et al.* 1977) showing that the domain state is pseudo-single domain (PSD). All specimens are far away from the single domain (SD) field, but some are close to the multidomain (MD) region. Specimens with accepted results of palaeointensity are marked green, rejected are marked red. No systematic trend is observed between the position in the Day plot and the success in palaeointensity determination. Two specimens from MOB kiln have wasp-waisted hysteresis loops and therefore contain a considerable fraction of hematite. All other specimens plot close to lines determined by Dunlop (2002) for mixtures of SD and MD pure magnetite. As other ferromagnetic crystals are present in our samples, those experiments should be considered with caution.

For two specimens, first-order reversal curves (FORC) measurements have been carried out which demonstrate that the magnetic carriers are populations of MD and small PSD or SD grains (Fig. 5). According to Carvallo *et al.* (2006), SD particles are associated with closed concentric contours with a central peak in the FORC distribution. This is seen in the right diagram for the sister specimen of a successful Thellier experiment. Nevertheless there is also another fraction giving diverging contours along the H_b-axis and representing MD grains. For a sister specimen of a rejected Thellier experiment (left diagram) only open contours occur. Additionally, the vertical spread of the distribution indicates magnetostatically interacting grains.

5 DIRECTION AND STABILITY OF NRM

Although many specimens have scattered NRM directions a well-defined cluster can be seen at about 30° declination and 70° inclination (Fig. 6) for MOB and the inner part of kiln MOA (block samples 1–11). Samples from the outer part of MOA (12–29) and MOC show a considerable scatter and many aberrant directions. Such aberrant directions are very often correlated with low Q-factors.

AF demagnetization has been carried out for one specimen from each block representing various Koenigsberger ratios and also aberrant directions. Eight to 13 steps were performed in most cases with maximum fields of 120 mT. Additional thermal demagnetization of one specimen per block was performed for kiln MOA on chosen specimens with high Q-factor. Generally stable directions are observed, except for many specimens from the outer part of kiln MOA. Fig. 7 shows examples of demagnetization experiments. For MOA (Figs 7a and b) each orthogonal projection diagram shows a comparison of thermal and AF demagnetizations. In Fig. 7(a), two examples are shown which have no secondary component. Such a behaviour was found for three further specimens all coming from the inner part of the kiln MOA. Fig. 7(b) represents 12 specimens from the inner part and some from the outer part, which have only very weak secondary components removed by 10–20 mT or 150°C. Most specimens from the outer part showed an unstable behaviour or aberrant directions, and some had strong secondary components.

© 2011 The Authors, *GJI*, **185,** 144–156
Geophysical Journal International © 2011 RAS

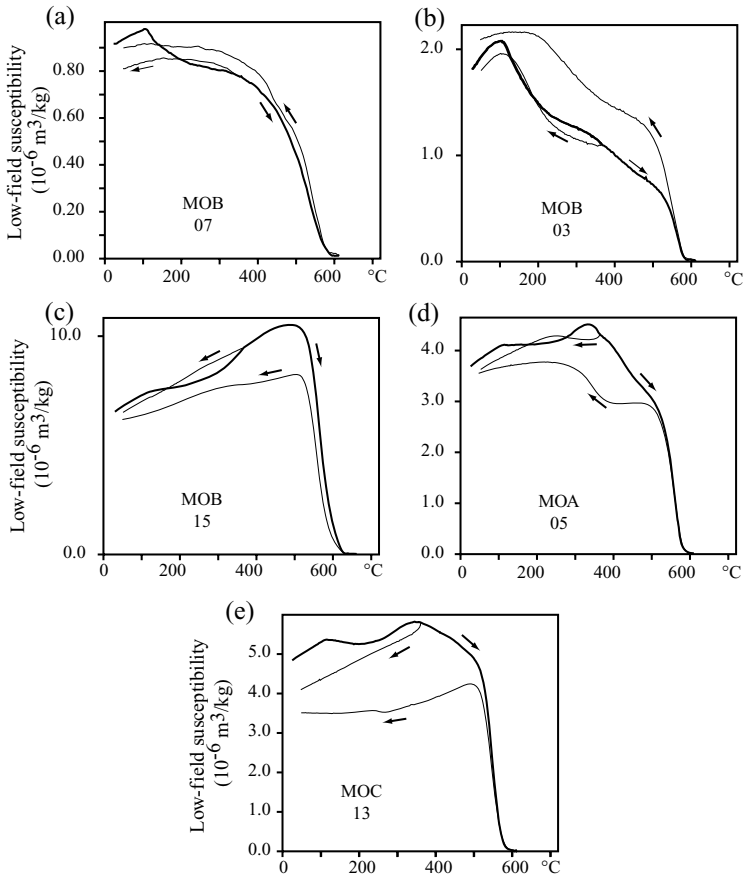


Figure 4. Examples of thermomagnetic curves: archaeointensity results of some sisters specimens are described later. Specimen (a) represents reliable archaeointensity results without mineralogical changes. Mineralogical alteration appears at 350–450°C for specimens (b), (c) and (d), but also before these temperatures, especially for specimens of kiln MOC (e).

Kiln MOB is characterized mainly by weak secondary components (Fig. 7c) and only three specimens needed more than 15 mT to reach the characteristic remanent magnetization (ChRM) direction. The resulting ChRM directions are well concentrated except for one outlier. Kiln MOC shows behaviour similar to MOA (Fig. 7d) with five specimens yielding no stable direction, secondary components removed after 20–25 mT on six specimens, and the rest of the samples with only weak secondary components (two examples are shown in Fig. 7d). The resulting ChRM directions are well concentrated except for one outlier.

Fig. 8(a) shows equal area projections of specimen ChRM directions for which principal component analysis (PCA, Kirschvink 1980) was possible. Some obvious aberrant ChRM directions (three from MOA with negative inclination and one from MOC with zero inclination) were not taken into account. Four specimens of MOA and MOC, respectively, did not allow application of PCA. While kilns MOB and MOC show well-concentrated archaeodirections, with only one outlier for MOC, the directions of MOA are much more scattered. To identify aberrant directions, which are caused by incomplete heating and/or inefficient demagnetization, an outlier test (McFadden 1982) was calculated for all directions (16) lying outside of the grey circle drawn in the diagram. This circle was drawn where most ChRM directions are concentrated. Eight directions were finally rejected.

The mean directions of the accepted ChRM directions were then derived for each sample block. Mean directions are shown in Fig. 8(b) and the highest scatter remains for kiln MOA. The structure mean directions and parameters of the Fisher statistics (Fisher 1953) are listed in Table 2. For MOB and MOC, higher precision parameters and smaller α_{95} radii have been obtained but the result from MOA can still be considered as reliable. To test, if these three directions are significantly different on a statistical basis, an *F*-test (McFadden & Lowes 1981) has been calculated and results are listed in Table 3. All three mean directions are significantly different, at the 95 per cent confidence level.

6 DETERMINATION OF ARCHAEOINTENSITY

The classical Thellier–Thellier protocol (Thellier & Thellier 1959) was only carried out on specimens whose AF or thermally demagnetized sisters-specimens presented a single component of magnetization. Almost all 46 specimens of the three kilns that were heated with a laboratory field applied along their *Z*-axis (i.e. along

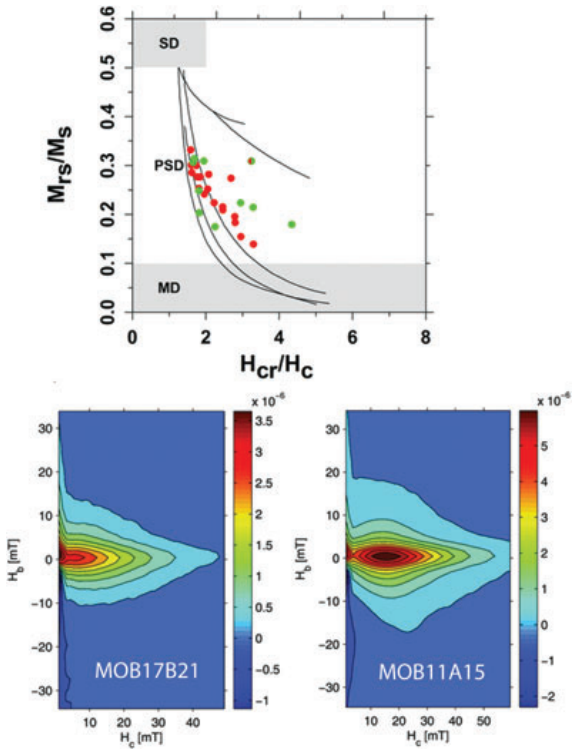


Figure 5. Day diagram (top panel): ratio of saturation magnetizations is plotted versus ratio of coercivities. The black lines were obtained according to Dunlop (2002) for mixtures of various amounts SD and SP (upper two curves) or MD magnetite (lower three curves). The successful outcome of Thellier experiments on sister specimens is indicated by green/red dots for accepted/rejected results. FORC diagrams (bottom panel) for two selected specimens from kiln MOB.

a subparallel direction to NRM) have positive pTRM checks. Following Chauvin *et al.* (2000), pTRM checks have been considered positive if, at a given temperature step, the difference between the original pTRM and the pTRM check does not exceed 10 per cent of the total TRM acquired. Positive pTRM checks should prove that specimens have not acquired a chemical remanent magnetization (CRM) during laboratory heating.

However, Fig. 9 illustrates the diversity of observed behaviours during the Thellier–Thellier experiments, especially for kiln MOC. Only a few specimens (24) presented the ideal linear behaviour on NRM–TRM diagrams, which is theoretically only observed for non-interacting SD grains (Thellier & Thellier 1959). The other specimens present strong concave-up behaviours (Fig. 9). In such cases, Chauvin *et al.* (2005) showed that widely different palaeointensities (overestimations or underestimations) could be obtained depending on which line segment is chosen.

Concavity cannot be explained by the existence of two components of magnetization. Moreover, high values of Koenigsberger ratio Q suggests that the magnetization is a TRM and not a thermochemical remanent magnetization (TCRM, see Fabian 2009).

The presence of PSD or MD grains (see e.g. Levi 1977; Coe *et al.* 2004; Chauvin *et al.* 2005; Dunlop *et al.* 2005; Biggin 2010) also results in concave-up NRM–TRM plots. Hysteresis results show the presence of a PSD or MD grain fraction, which could have affected the archaeointensity results. However, hysteresis properties studied

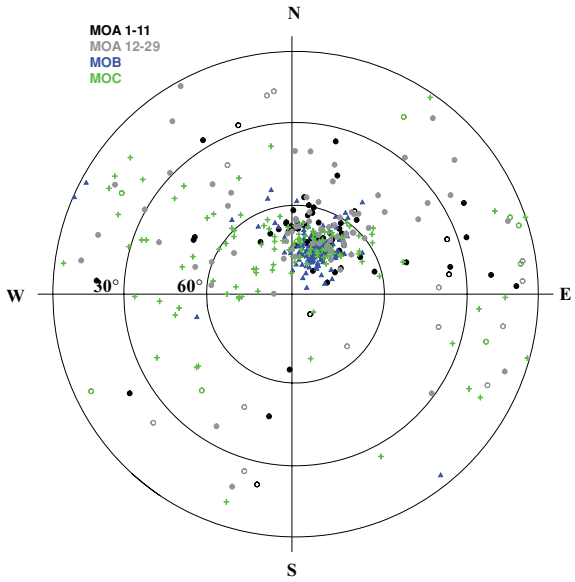


Figure 6. Directions of natural remanent magnetization (NRM) plotted in equal area projection. Kilns are indicated by different colours. Kiln MOA was divided into inner (block samples 1–11) and outer part (12–29).

for some sister-specimens do not show a systematic trend between linear/concave-up behaviour and position on the Day plot (Fig. 5). For MD grains, Biggin (2010) also observed no correlation between hysteresis results and concavity of NRM–TRM plots. FORC experiments show the difference in the grain assemblages for the linear and the concave-up Thellier experiments. Linear behaviour of the specimen (MOB17B21) is associated with SD particles. FORC distribution showing magnetostatically interacting grains correspond to a specimen with concave-up NRM–TRM plot (MOB11A15). In consequence, PSD–MD effects could explain non-ideal behaviour of some specimens, although these two examples are not sufficient to define a systematic trend. Moreover, numerous experimental and theoretical studies indicate that in the case of concave-up NRM–TRM diagrams induced by MD magnetic grains, the slope of the line through the initial and the final points yields the expected field strength (see e.g. Levi 1977; Fabian 2001; Coe *et al.* 2004; Chauvin *et al.* 2005). In Moyenvic samples, this approach yields a huge scatter of archaeointensities (30–110 μT) at the site level (Fig. 9), suggesting that curvature of NRM–TRM diagrams is not the result of MD magnetic grain effects.

Because thermomagnetic curves show strong alteration above 400 °C, concavity of NRM–TRM plots might be explained by mineralogical alteration, not detected by pTRM checks. CRM acquired during a Thellier experiment induces a deviation of NRM direction toward the laboratory field direction. However, if the laboratory field is subparallel to NRM, CRM acquisition may not cause a significant variation of NRM direction. Accordingly, 34 further Thellier experiments were carried out with a laboratory field of 70 μT applied along the X-axis of specimens, that is, quasi-perpendicular to NRM direction.

6.1 Angle between laboratory field and NRM

Fig. 10 presents two sisters-specimens heated with F_{Lab} applied along theirs Z (Fig. 10a) and X axes (Fig. 10b). For the latter, a

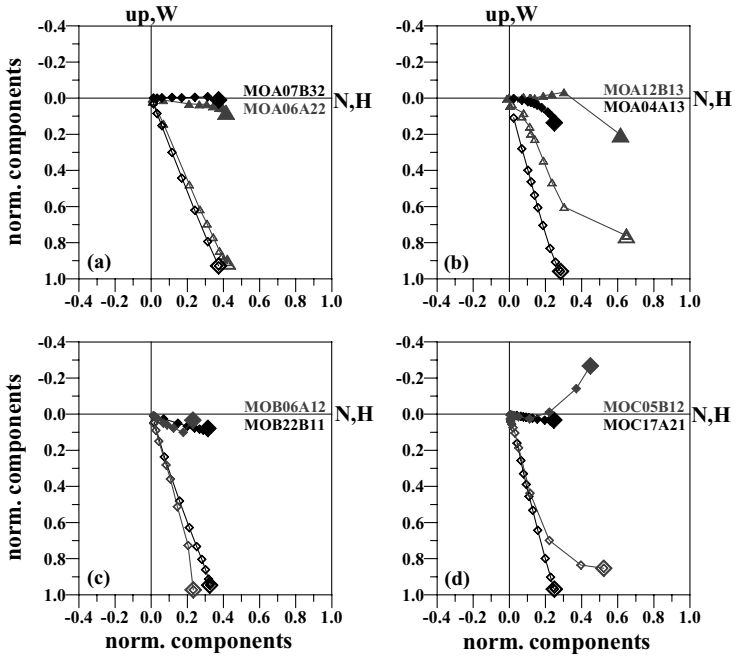


Figure 7. Demagnetization examples for kilns MOA (a and b), MOB (c) and MOC (d). Diagrams show normalized components of magnetization, triangles (diamonds) indicate thermal (AF) demagnetization. Closed (open) symbols are projection on the horizontal (vertical) plane (H corresponds to inclination). Specimen names are colour-coded to correspond to lines of the same colour in each diagram.

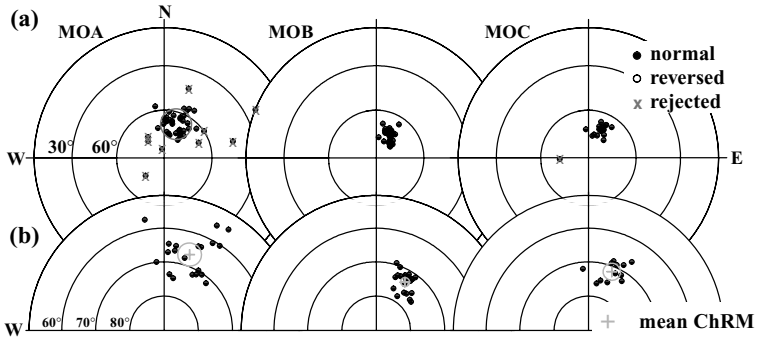


Figure 8. (a) Directions of characteristic remanent magnetization (ChRM) obtained from each thermal or AF demagnetization experiment plotted in equal area projection. For kiln MOA directions lying outside the grey circle were tested with the outlier test (McFadden & Lowes 1981), they are marked by a grey 'x', when rejected. (b) Mean ChRM directions. Black dots are mean directions of each block samples. The grey cross is the site-mean ChRM direction surrounded by the α_{95} circle in grey.

Table 2. Palaeomagnetic results of kilns from Moyenvic (48.780°N, 6.570°E): name, number of block samples, number of demagnetization experiments with alternating field (AF) or thermal (th), number of ChRM directions on block level, mean declination, inclination, precision parameter of Fisher statistics and radius α_{95} of error cone.

Abb.	n	AF/th	N	D (°)	I (°)	K	α_{95} (°)
MOA	29	26/21	20	18.6	66.6	92.0	3.4
MOB	23	30/4	22	30.9	73.6	538.2	1.3
MOC	18	16/3	12	21.8	71.6	306.8	2.5

Table 3. Results of the F-test (McFadden & Lowes 1981): combination of tested structures, parameter of f-distribution f_1 and f_2, significantly different on 95 per cent probability level, when $f_1 > f_2$.

Combination	f_1	f_2	Different?
MOA & MOB	0.394574	0.077769	Yes
MOA & MOC	0.158127	0.105014	Yes
MOB & MOC	0.153949	0.098139	Yes

strong deviation of the NRM direction toward that of the applied field is seen on the Zijderveld diagram and proves acquisition of a CRM during the Thellier experiment. CRM acquisition is also suggested by a weak deviation of the vertical component starting at 425°C for the other specimen from the same block (Fig. 10a), which presents the same variation of low-field susceptibility and decrease of NRM with temperature (Figs 10c and d). 18 specimens heated with F_{Lab} applied along their X-axis present the same deviation of the NRM direction. Accordingly, concave-up NRM–TRM diagrams are mostly explained by important mineralogical alteration, even

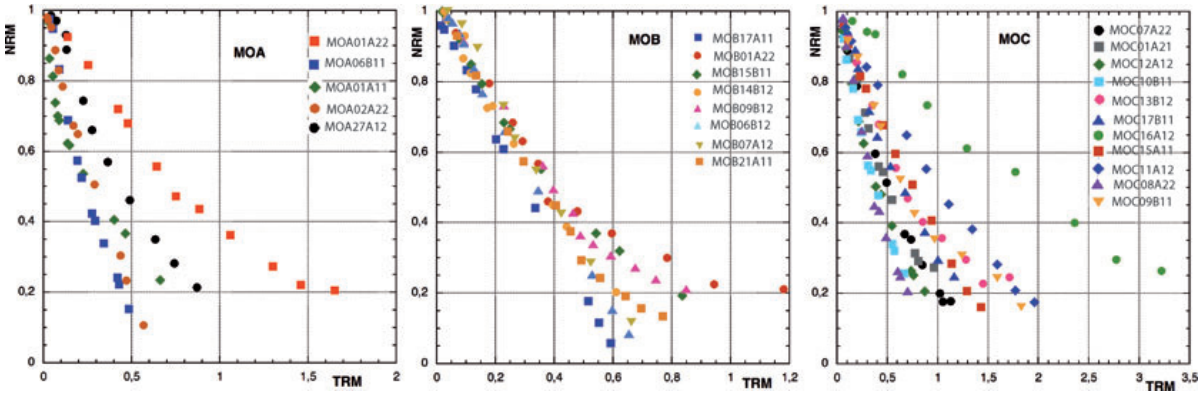


Figure 9. Composite NRM–TRM diagrams. Each panel shows the behaviour of samples (only with positive pTRM checks) from the same site (laboratory field 60 μT). In each composite Arai diagram, each symbol represents a particular specimen. Laboratory field was applied along the *Z*-axis of specimens.

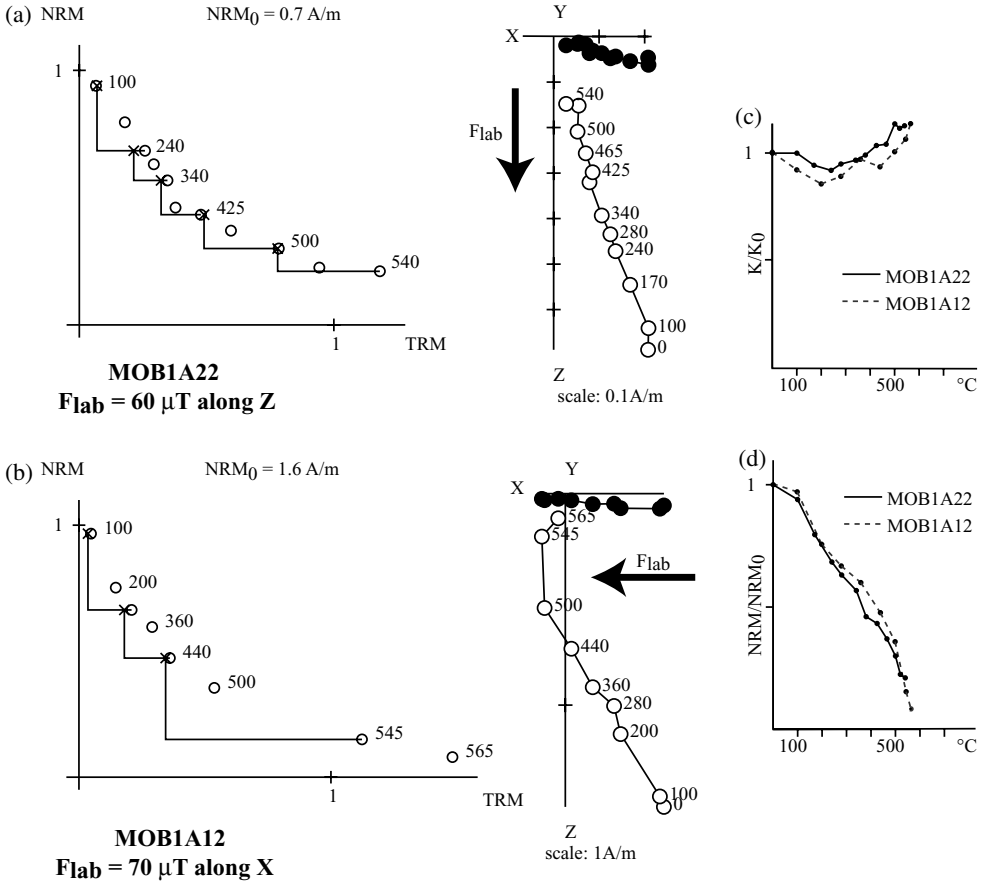


Figure 10. Comparison of NRM–TRM (left-hand side) and Zijderveld (middle) diagrams of sister's specimens heated with F_{Lab} applied along *Z*-axis (a) or *X*-axis (b) of the specimens. Directions in the Zijderveld diagrams are shown in specimen coordinates. Open (solid) circles are projections upon vertical (horizontal) planes. NRM–TRM diagrams are normalized to the initial NRM intensity. (c) Variation of low-field susceptibility for both specimens during successive heating steps. (d) NRM decrease with temperature for both specimens.

if neither negative pTRM checks nor high variation of low-field susceptibility have been observed.

Consequently, it was decided to retain only the specimens without significant deviation of their NRM directions toward that of the applied field. Mineralogical changes sometimes occurred from the first temperature steps (Fig. 10b); consequently, 35 specimens were rejected. The thermal stability of the specimens is lower than that expected according to the Koenigsberger ratio,

© 2011 The Authors, *GJI*, **185,** 144–156
Geophysical Journal International © 2011 RAS

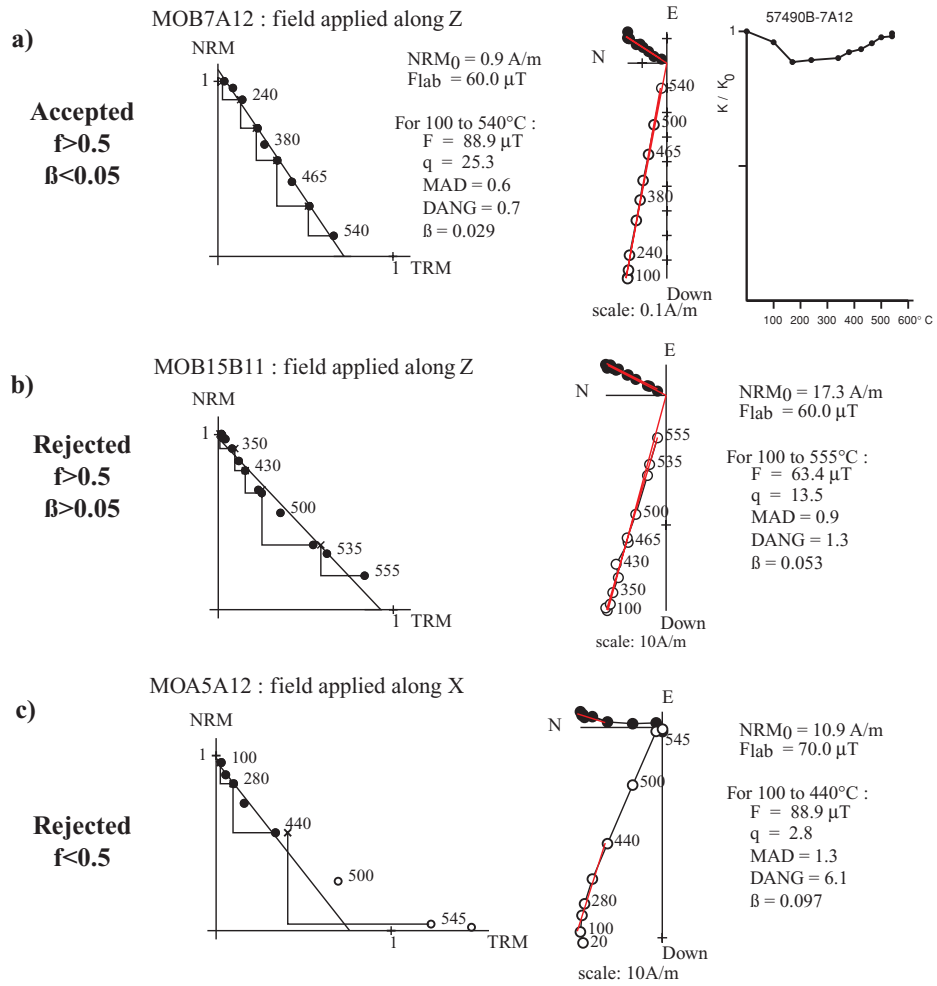


Figure 11. Examples of archaeointensity results for specimens that do not present significant deviation of NRM direction towards laboratory field direction. Directions on Zijderveld diagrams (right-hand side) are *in situ* coordinates. Open (solid) circles are projections upon vertical (horizontal) planes. NRM–TRM diagrams (left-hand side) are normalized to the initial NRM intensity. Variation of low-field susceptibility during successive heating steps is also provided in Fig. 11(a).

viscosity index and K-T experiments. This may be explained by an insufficient archaeological heating to stabilize magnetic mineralogy.

pTRM checks do not seem to be always sufficient criteria to detect mineralogical changes. Despite strong deviation of NRM direction, the fact that positive pTRM checks are observed may be explained by a low and continuous evolution at each temperature step. The best way to detect acquisition of a CRM seems to be the distortion of the NRM direction toward the laboratory field direction during successive heating steps. To be observed, this requires a large angular deviation between the applied F_{Lab} direction and the NRM direction.

6.2 Choice of criteria

Fig. 11 shows three examples of Thellier experiments on specimens for which no CRM acquisition is seen. Many authors (Biggin & Thomas 2003; Chauvin *et al.* 2005; Ben-Yosef *et al.* 2009) showed that a high NRM fraction (f factor, Coe *et al.* 1978) must be used to obtain reliable archaeointensity results. As recommended by Biggin & Thomas (2003) and Xu & Dunlop (2004), we rejected specimens with f values lower than 0.5 (Fig. 11c).

Three others parameters were used to select specimens with acceptable Thellier experiments. First, the maximum angular deviation (MAD, Kirschvink 1980), which measures the scatter in NRM directions, has to be lower than 5°. Second, the deviation angle (DANG, Selkin & Tauxe 2000) has to be also lower than 5°. However, it should be noted that the deviation angle is an inefficient rejection criterion if NRM direction and laboratory field are subparallel during the Thellier experiment. Third, we used β, the ratio of the standard error of the slope to the absolute value of the best-fit slope for the data on the NRM–TRM plot. An upper limit of 0.05 (Gee *et al.* 2010; Shaar *et al.* 2010) has been chosen (Fig. 11b) rather than 0.10 (Ben-Yosef *et al.* 2009) because specimens with ß higher than 0.05 (i.e. with slightly concave-up plots) tend to have scattered archaeointensities (Fig. 12).

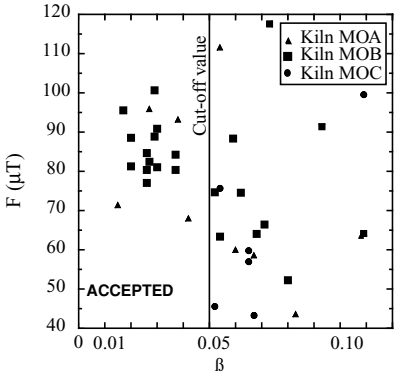


Figure 12. Distributions of archeointensities F versus ß (ratio of the standard error of the slope to the absolute value of the slope). Selected specimens do not present a strong distortion of NRM direction along laboratory field direction.

The chosen set of criteria (no significant deviation of NRM direction, positive pTRM checks, $f > 0.5$, MAD $< 5^\circ$, DANG $< 5^\circ$ and $\beta < 0.05$) finally led to the acceptance of linear NRM–TRM diagrams only (Fig. 11a), that is, four specimens of kiln MOA, 12 of MOB and none of MOC (Table 4). The rejection rates of this study are thus very high (88 per cent for kiln MOA, 73 per cent for MOB and 100 per cent for MOC), but all the accepted data have high quality factor q (Coe *et al.* 1978) ranging from 10 to 50.

6.3 Archaeointensity results

Table 4 shows that archaeointensities determined on specimens heated with F_{Lab} applied along their X-axis are slightly, but systematically lower than those obtained on sister-specimens with F_{Lab} applied along their Z-axis. This could be explained by TRM anisotropy. As mean archaeointensities were computed using all specimens heated with laboratory field along Z- or X-axis, TRM anisotropy is taken account. Because specimens are prone to alteration it seems unlikely that TRM anisotropy checks would significantly reduce the scatter around mean archaeointensities per site.

The mean archaeointensity per site was determined using the weighting factor proposed by Prévot *et al.* (1985). This gives an archaeointensity weighted mean of 80.1 ± 14.5 μT for kiln MOA and 86.6 ± 6.9 μT for kiln MOB (Table 4). Considering the strong magnetic physicochemical changes of the specimens during heating steps, cooling-rate corrections were not performed.

7 RESULTS

Site-mean directions and available directional reference data, all relocated to Paris by Virtual Geomagnetic Poles (VGP), were compared (Fig. 13). Inclination and declination results are consistent with the French (Gallet *et al.* 2002) and the Bayesian German (Schnepp & Lanos 2005) archaeomagnetic secular variation curves. Apparent discrepancies in inclination between MOA and MOB sites and the French curve are probably due to the low number of published reference sites.

Table 4. Archeointensity results. Kiln name; block sample number; specimen name; intensity of initial NRM; initial low-field susceptibility (10^{-6} SI); field: direction of laboratory field along Z- or X-axis of specimen; $T_{min} - T_{max}$: temperature interval used to determine intensity; $F \pm \sigma$: archaeointensity with associated standard deviation; n: number of heating steps within $T_{min} - T_{max}$ interval; MAD: maximum angular deviation; DANG: deviation angle; f: NRM fraction; g : gap factor; q: quality factor (Coe *et al.* 1978); ß : ratio of the standard error of the slope to the absolute value of the slope; F_{mean}: arithmetic average; F_w: weighted mean archaeointensity (Prévot *et al.* 1985); σ : standard deviation; VDM (VADM): virtual (axial) dipole moment.

Kiln	Sample	Specimen	NRM (A m^{-1})	K	Field	$T_{min} - T_{max}$(°C)	$F \pm \sigma$ (μT)	n	MAD (°)	DANG (°)	f	g	q	ß
MOA	2	MOA02A12	12.0	6.9	X	100 – 565	93.2 ± 3.5	8	2.0	1.5	1.01	0.76	20.3	0.038
	2	MOA02A22	11.3	7.6	Z	100 – 555	95.9 ± 2.6	12	1.3	1.5	0.88	0.85	27.6	0.027
	6	MOA06B22	1.6	1.6	X	100 – 565	71.4 ± 1.1	8	1.2	0.9	0.92	0.83	49.4	0.015
	27	MOA27A11	2.6	4.1	X	100 – 440	68.0 ± 2.9	5	1.6	4.5	0.64	0.66	10.0	0.042
						$F_{mean} + \sigma = 82.1 \pm 14.5$ μT								
						$F_w \pm \sigma = 80.1 \pm 14.5$ μT								
						VADM = 12.6 (10^{22} A m^2)								
						VDM = 12.6 (10^{22} A m^2)								
MOB	6	MOB06B11	2.8	3.5	X	100 – 565	81.3 ± 1.6	8	1.6	0.7	0.93	0.76	35.2	0.020
	6	MOB06B12	2.1	2.4	Z	100 – 540	88.6 ± 1.8	11	0.9	0.3	0.88	0.84	36.7	0.020
	7	MOB07A12	0.9	1.6	Z	100 – 540	88.9 ± 2.6	9	0.6	0.7	0.85	0.86	25.3	0.029
	9	MOB09B11	7.6	6.6	Z	100 – 555	100.7 ± 2.9	12	1.0	0.8	0.66	0.88	20.0	0.029
	9	MOB09B21	5.8	6.6	X	100 – 565	81.1 ± 2.4	8	1.4	1.0	0.82	0.82	22.5	0.030
	10	MOB10B11	3.2	6.4	Z	100 – 465	82.5 ± 2.2	7	1.0	2.2	0.54	0.82	16.4	0.027
	13	MOB13B21	21.1	28.8	Z	100 – 555	80.4 ± 3.0	12	0.6	0.9	0.73	0.81	15.6	0.037
	14	MOB14B11	16.9	12.5	X	100 – 565	77.1 ± 2.0	8	1.0	0.2	0.85	0.75	24.5	0.026
	14	MOB14B12	20.5	18.8	Z	100 – 555	84.3 ± 3.1	12	1.8	2.3	0.80	0.84	18.0	0.037
	17	MOB17A11	22.3	9.1	Z	100 – 555	95.6 ± 1.6	12	0.8	0.5	0.92	0.83	46.5	0.017
	17	MOB17A12	24.1	9.4	X	100 – 565	90.9 ± 2.7	8	1.2	0.7	1.00	0.71	23.4	0.030
	21	MOB21A11	0.3	0.7	Z	100 – 465	84.7 ± 2.2	8	1.2	1.2	0.68	0.84	22.1	0.026
						$F_{mean} \pm \sigma = 86.3 \pm 6.9$ μT								
						$F_w \pm \sigma = 86.6 \pm 6.9$ μT								
						VADM = 13.6 (10^{22} A m^2)								
						VDM = 12.4 (10^{22} A m^2)								

© 2011 The Authors, *GJI*, **185,** 144–156
Geophysical Journal International © 2011 RAS

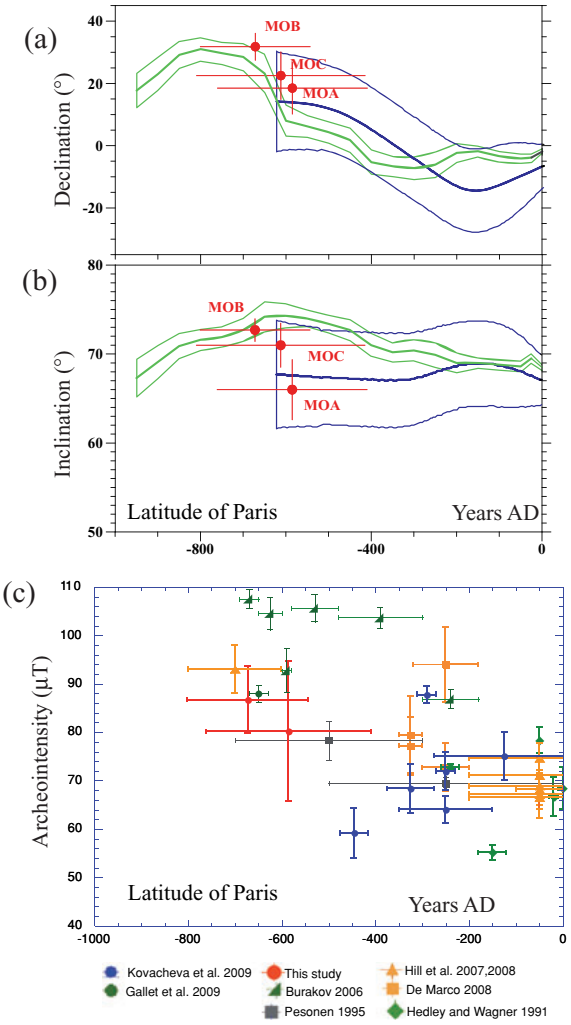


Figure 13. Comparison of Moyenvic declination (a), inclination (b) and archaeointensity (c) with archaeodirections reference curves of France (green) and Germany (blue) or sites from Europe. Archaeointensities based on Thellier's method with pTRM checks only. Data are relocated to Paris (48.85°N, 2.30°E), via VGP for directional data and VADM for archaeointensity data.

No archaeointensity reference curve is yet published for protohistoric times in western Europe. Data acquired with the Thellier method, including pTRM checks and anisotropy corrections, are only available for France (Hedley & Wagner 1991), Switzerland (Kovacheva 2009), Mediterranean Europe and Finland (Pesonen *et al.* 1995). These published data were corrected for anisotropy using either TRM or magnetic susceptibility (AMS) or anhysteric remanent magnetization (ARM) or IRM. Only data published by Hill *et al.* (2007, 2008), De Marco (2008) and Gallet *et al.* (2009), were corrected for TRM anisotropy and cooling rate effects. Our archaeointensity results are consistent (Fig. 13c) with Italian (Hill *et al.* 2008; Gallet *et al.* 2009) data. The Spanish data (Burakov *et al.* 2006) obtained from potsherds present somewhat higher values that could be explained by the fact that their data were corrected for anisotropy using AMS which give usually a lower correcting factor than TRM anisotropy (Chauvin *et al.* 2000). Moreover cooling-rate effects were not corrected for these data but are relevant for such material (Genevey & Gallet 2002). Finally, discrepancies between data in Fig. 13(c) could be explained by some dating inaccuracy and/or differences in the methods used to correct for anisotropy and cooling rate effect. However our new data confirm high archaeointensity values (about twice the present day field value) during the first half of the Early Iron Age.

8 CONCLUSION

In this study a full magnetic field vector analysis was performed on three salt kilns from Moyenvic (East France), dated by radiocarbon analysis on charcoals. The mean archaeomagnetic directions were obtained after thermal and AF demagnetizations and the original Thellier method was used to obtain high-quality archaeointensity results. The interpretation of the archaeointensity experiments, performed on 80 samples, was particularly complex. This might be explained by insufficient archaeological heating to stabilize magnetic mineralogy, a common situation on archaeomagnetic sites from the first millennium BC. 75 per cent of the studied specimens present concave-up NRM–TRM plots with positive pTRM checks, a behaviour commonly attributed to coarse grains effects predicted by hysteresis and FORC analysis. However, PSD–MD grains effects do not seem the main cause of failures of the palaeointensity experiments. The obvious distortion of NRM direction towards the laboratory field direction proves the occurrence of strong mineralogical alteration, not detected by pTRM checks. Moreover, for similar large f factors, archaeointensities of concave-up plots are significantly lower than archaeointensities of linear NRM–TRM plots, which would not be expected for MD grains.

Consequently, we advise to apply the laboratory field in a direction at a large angle from that of the NRM, to detect mineralogical alterations and, ultimately, to avoid the incorrect interpretation of concavity on NRM–TRM plots as only due to coarse grains effects.

High values of eastern declination and strong field archaeointensities were obtained, providing further evidence for important changes of the Earth's magnetic field in Europe during first half of the first millennium BC.

This study provides new reliable reference data for the data sets of Germany and France. Further studies have to be carried out for the first millennium BC, to better characterize these strong variations of the Earth's magnetic field. Such variations suggest that archaeomagnetism would provide an effective tool to date accurately archaeological structures of the Early Iron Age, especially during the long plateau found in the radiocarbon calibration curve (Hajdas 2008) lasting from 750 to 400 BC.

ACKNOWLEDGMENTS

J.D. Laffitte (INRAP) is kindly acknowledged for providing archaeological information about the site and the kilns. We thank Philippe Dufresne for his help during sampling and sample preparation, Guillame Dupont-Nivet for his attentive reading and Pierrick Roperch for helpful and animated discussions. Dry cutting of the B-slices and demagnetization of strong B-specimens have been carried out in the Palaeomagnetic Laboratory of the LIAG (Hannover), Christian Rolf is kindly acknowledged for his support. E.S. has been supported by the Austrian science fund FWF grant P19370-N19. This

work was partly financed by the CNRS/INSU Paléo2 programme. We are grateful to Jan Hus and an anonymous reviewer for their constructive comments on this paper.

REFERENCES

Ben-Yosef, E., Tauxe, L., Levy, T.E., Shaar, R., Ron, H. & Najjar, M., 2009. Geomagnetic intensity spike recorded in high resolution slag deposit in Southern Jordan, *Earth planet. Sci. Lett.*, **287,** 529–539, doi:10.1016/j.epsl.2009.09.001.

Bertaux, J.P., 1987. La fabrication du sel à l'époque protohistorique par la technique du briquetage, in *L 'Âge du Fer en Lorraine*, pp. 85–100, Musée de Sarreguemines, Sarreguemines.

Biggin, A.J., 2010. Are systematic differences between thermal and microwave Thellier-types palaeointensity estimates a consequence of multidomain bias in the thermal results?, *Phys. Earth planet. Inter.*, **280,** 16–40, doi:10.1016/j.pepi.2010.03.005.

Biggin, A.J. & Thomas, D.N., 2003. The application of acceptance criteria to results of Thellier palaeointensity experiments performed on samples with pseudo-single-domain-like chararcteristics, *Phys. Earth planet.Inter.,* **138,** 279–287.

Bronk Ramsey, C., 2005. Improving the resolution of radiocarbon dating by statistical analysis, in: *The Bible and Radiocarbon Dating: Archaeology, Text and Science*, pp. 57–64, eds Levy, T.E. & Higham, T.F.G., Equinox, London.

Burakov, K.S., Nachasova, I.E. & Mata, C., 2006. Geomagnetic field intensity in the first millenium BC from data on ceramics of the Los Villares archaeological monument (Spain), *Fizika Zemli,* **11,** 84–92. [Izvestiya Physics of the Solid Earth, 42(11), 942–950].

Carvallo, C., Roberts, A.P., Leonhardt, R., Laj, C., Kissel, C. & Camps, P., 2006. Increasing the efficiency of palaeointensity analyses by selection of samples using first-order reversal curve diagrams, *J. geophys. Res.,* **111,** B12103, doi:10.1029/2005JB004126.

Chauvin, A., Garcia, Y., Lanos, Ph. & Laubenheimer, F., 2000. Palaeointensity of the geomagnetic field recovered on archaeomagnetic sites from France, *Phys. Earth planet.Inter.,* **120,** 111–136.

Chauvin, A., Roperch, P. & Levi, S., 2005. Reliability of geomagnetic palaeointensity data : the effects of the NRM fraction and concave-up behaviour on palaeointensity determinations by the Thellier method, *Phys. Earth planet.Inter.,* **150,** 265–286.

Coe, R.S., Gromme, S. & Mankinen, E.A., 1978. Geomagnetic palaeointensities from radiocarbon-dated lava flows on Hawaii and the question of the Pacific non-dipole low, *J. geophys. Res.,* **83,** 1740–1756.

Coe, R.S., Riisager, J., Plenier, G., Leonhardt, R. & Krasa, D., 2004. Multidomain behaviour during palaeointensity experiments: results from the 1915 Mt Lassen flow, *Phys. Earth planet.Inter.,* **147,** 141–153.

Daire, M.Y., 2003. *Le sel des Gaulois*, p. 152, Errance, Paris.

Day, R., Fuller, M. & Schmidt, V.A., 1977. Hysteresis properties of titanomagnetites, grain size and compositional dependence, *Phys. Earth planet.Inter.,* **13**(4), 260–267.

De Marco, E., Spataras, V., Gomez-Paccard, M., Chauvin, A. & et Kondopoulou, D., 2008. New archaeointensity results from archaeological sites and variation of the geomagnetic field intensity for the last 7 millenia in Greece, *Phys. Chem. Earth,* **33**(6–7), 578–595.

Dunlop, D., 2002. Theory and application of the day plot (Mrs/Ms versus Hcr/Hc), 2: application to data for rocks, sediments and soils, *J. geophys. Res.,* **107**(B3), EPM 5-1–EMP 5-15.

Dunlop, D.J., Zhang, B. & Özdemir, Ö., 2005. Linear and nonlinear Thellier palaeointensity behaviour of natural minerals, *J. geophys. Res.,* **110,** B01103, doi:10.1029/2004JB003095.

Fabian, K., 2001. A theoretical treatment of palaeointensity determination experiments on rocks containing pseudo-single or multi domain magnetic particles, *Earth planet. Sci. Lett.,* **168,** 45–58.

Fabian, K., 2009. Thermochemical remanence acquisition in single-domain particle ensembles: a case for possible overestimation of the geomagnetic palaeointensity, *Geochem. Geophys. Geosyst.,* **10,** Q06Z03, doi:10.1029/2009GC002420.

Fisher, R.A., 1953. Dispersion on a sphere, *Proc. R. Soc. Lond.,* **A-127**, 295–305.

Gallet, Y., Genevey, A. & Le Goff, M., 2002. Three millenia of directional variation of the Earth's magnetic field in western Europe as revealed by archeological artefacts, *Phys. Earth planet.Inter.,* **131,** 81–89.

Gallet, Y., Genevey, A., Le Goff, M., Warmé, N., Gran-Aymerich, J. & Lefèvre, A., 2009. On the use of archaeology in geomagnetism, and vice-versa: recent developments in archeomagnetism, *C.R. Physique*, **10,** 630–648, doi:10.1016/j.crhy.2009.08.005.

Gee, J.S., Yu, Y. & Bowles, J., 2010. Palaeointensity estimates from ignimbrites: an evaluation of the Bishop Tuff, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, **11,** Q10007, doi:10.1029/2009GC002888.

Genevey, A. & Gallet, Y., 2002. Intensity of the geomagnetic field in Western Europe over the past 2000 years: new data from ancient French pottery, *J. geophys. Res.,* **107**(B11), 2285, doi:10.1029/2001JB000701.

Genevey, A., Gallet, Y., Rosen, J. & Le Goff, M., 2009. Evidence of rapid geomagnetic field intensity variation in western Europe over the past 800 years from new French archeointensity data, *Earth planet. Sci. Lett.,* **202**(1–2), 132–143.

Gomez-Paccard, M. et al. & Archeological working group, 2006. A catalogue of Spanish archaeomagnetic data, *Geophys. J. Int.,* **166,** 1125–1143.

Gomez-Paccard, M., Chauvin, A., Lanos, P. & Thiriot, J., 2008. New archeointensity data from Spain and the geomagnetic dipole moment in western Europe over the past 2000 years, *J. geophys. Res.,* **113,** B09103, doi:10.1029/2008JB005582.

Hajdas, I., 2008. Radiocarbon dating and its applications in Quaternary studies / Die Radiokohlenstoffmethode und ihre Anwendung in der Quartärforschung, *Quaternary Sci. J. (Eiszeitalter und Gegenwart),* **57**(1–2), 2–24.

Hedley, I. & Wagner, G.C., 1991. A magnetic investigation of roman and pre-roman pottery, in *Archaeometry '90*, pp. 275–284, eds Pernicka, E. & Wagner, G.C., Birkhauser Verlag, Basel.

Hill, M.J., Lanos, P., Chauvin, A., Vitali, D. & Laubenheimer, F., 2007. An archeomagnetic investigation of a roman amphorae workshop in Albinia, *Geophys. J. Int.,* **169**(2), 471–472.

Hill, M.J., Lanos, P., Denti, M. & Dufresne, P., 2008. Archeomagnetic investigation of bricks from the VIII century BC Greek-indigenous site of Incoronata (Metaponto, Italy), *Phys. Chem. Earth,* **33**(6–7), 523–533, doi:10.1016/j.pce.2008.02.026.

Kirschvink, J.L., 1980. The least-squares line and plane and the analysis of palaeomagnetic data, *Geophys. J. R. astr. Soc.,* **62,** 699–718.

Kovacheva, M., Boyadziev, Y., Kostadinova-Avramova, M., Jordanova, N. & Donadini, F., 2009. Updated archeomagnetic data set of the past 8 millennia from the Sofia laboratory, *Geochem. Geophys. Geosyst.,* **10,** Q05002, 6PP, doi:10.1029/2008GC002347.

Korte, M, Donadini, F & Constable, C.G., 2009. Geomagnetic field for 0–3 ka: 2. A new series of time-varying global models, *Geochem. Geophys. Geosyst.,* **10,** Q06008, doi:10.1029/2008GC002297.

Laffitte, J.D., 2002. Le briquetage de la Seille à Moyenvic (Moselle, France) au lieu-dit Les Crôleurs, in *Archéologie du sel, Techniques et sociétés dans la Pré et Protohistoire européenne*, pp. 197–207, ed. Weller, O., Actes du XIV^{e} Congrès UISPP de Liège, Verlag Marie Leidorf, Rahden/Westfalen.

Lanos P., 2004. Bayesian inference of calibration curves, application to archaeomagnetism: chapter 3, in *Tools for Constructing Chronologies, Crossing Disciplinary Boundaries,* Lecture Notes in Statistics, Vol. 177, pp. 43–82, eds, Buck, C.E. & Millard, A.R., Springer-Verlag, London.

Levi, S., 1977. The effect of magnetite particle size on palaeointensity determinations of the geomagnetic field, *Phys. Earth planet.Inter.,* **13,** 245–259.

McFadden, P.L., 1982. Rejection of palaeomagnetic observations, *Earth planet. Sci. Lett.,* **61,** 392–395.

McFadden, P.L. & Lowes, F.J., 1981. The discrimination of mean directions drawn from Fisher distributions, *Geophys. J.,* **67,** 19–33.

Pavon-Carrasco, F.J., Osete, M.L., Torta, J.M. & Gaya-Piqué, L.R., 2009. A regional archeomagnetic model for Europe for the last 3000 years,

© 2011 The Authors, *GJI*, **185,** 144–156
Geophysical Journal International © 2011 RAS

SCHA.DIF.3k: applications to archeomagnetic dating, *Geochem. Geophys. Geosyst.,* **10,** Q03013, doi:10.1029/2008GC002244.

Pesonen, L.J., Leino, M.A.H. & Nevanlinna, H., 1995. Archeomagnetic intensity in Finland during the last 6400 years: evidence for a latitude-dependant nondipole field at approximate AD 500, *J. Geomagn. Geoelectr.,* **47,** 19–40.

Pike, C.R., Roberts, A.P. & Verosub, K.L., 1999. Characterizing interactions in fine magnetic particle systems using first order reversal curves, *J. appl. Phys.,* **85,** 6660–6667.

Prévot, M., Mankinen, E.A., Coe, R.S. & Gromme, C.S., 1985. The Steens Mountain (Oregon) geomagnetic polarity transition, 2. Field intensity variations and discussion of reversal models, *J. geophys. Res.,* **90**(B12), 10 417–10 448.

Reimer, P.J. *et al.,* 2004. IntCal04 terrestrial radiocarbon age calibration, 0–26 cal kyr BP, *Radiocarbon,* **46**(3), 1029–1058.

Roberts, A.P., Pike, C.R. & Verosub, K.L., 2000. FORC diagrams: a new tool for characterizing the magnetic properties of natural samples, *J. geophys. Res.,* **105**(28), 461–475.

Schnepp, E. & Lanos, P., 2005. Archaeomagnetic secular variation in Germany during the past 2500 years, *Geophys. J. Int.,* **163,** 479–490.

Schnepp, E., Lanos, P. & Chauvin, A., 2009. Geomagnetic palaeointensity between 1300 and 1750 A.D. derived from a bread floor sequence in Lübeck, Germany, *Geochem. Geophys. Geosyst.,* **10,** Q08003, doi:10.1029/2008GC002470.

Selkin, P.A. & Tauxe, L., 2000. Long-term variations in palaeointensity, *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A,* **358,** 1065–1088.

Shaar, R., Ron, H., Tauxe, L., Kessel, R., Agnon, A., Ben-Yosef, E. & Feinberg, J.M., 2010. Testing the accuracy of absolute intensity estimates of the ancient geomagnetic field using copper slag material, *Earth planet. Sci. Lett.*, **290,** 201–213, doi:10.1016/j.epsl.2009.12.022.

Tema, E., Hedley, I. & Lanos, P., 2006. Archaeomagnetism in Italy: a compilation of data including new results and a preliminary Italian secular variation curve, *Geophys. J. Int.,* **167,** 1160–1171.

Thellier, E. & Thellier, O., 1944. Recherches géomagnetiques sur des coulées volcaniques d'Auvergne, *Ann. Geophys.,* **1,** 37–52.

Thellier, E. & Thellier, O., 1959. Sur l'intensité du champ magnétique terrestre dans le passé historique et géologique, *Ann. Geophys.,* **15,** 285–376.

Xu, S. & Dunlop, D.J., 2004. Thellier palaeointensity theory and experiments for multidomain grains, *J. geophys. Res.,* **109,** B07103, doi:10.1029/2004JB003024.

Zananiri, I., Batt, C.M., Lanos, P., Tarling, D.H. & Linford, P., 2007. Archaeomagnetic secular variation in the UK during the past 4000 years and its application to archaeomagnetic dating, *Phys. Earth planet.Inter.,* **160,** 97–107.

© 2011 The Authors, *GJI*, **185,** 144–156
Geophysical Journal International © 2011 RAS

Chapitre 6

Analyse expérimentale de briquettes de Sallèles-d'Aude (Aude) :

Investigations sur l'effet de la vitesse de refroidissement

L'estimation de la variation de l'intensité du champ magnétique terrestre dans le passé est un enjeu majeur pour ses implications sur le fonctionnement de la géodynamo, mais aussi pour ses applications en datation archéomagnétique. Il est désormais bien établi depuis Fox et Aitken (1980) que les paléointensités ou archéointensités doivent être corrigés des effets de la vitesse de refroidissement, qui affectent (comme l'avait déjà suggéré Néel, 1955) la capacité d'acquisition d'une aimantation thermorémanente (ATR). Mais cet effet reste relativement peu étudié et en conséquence mal connu. La majorité des études théoriques (Papusoi, 1972a ; Papusoi, 1972b ; Dodson et McClelland-Brown, 1980 ; Halgedahl *et al.*, 1980) et expérimentales (Fox et Aitken, 1980 ; McClelland-Brown, 1984) a été publiée au cours des années 70 et 80, même si un regain d'intérêt est perçu ces dernières années (Yu, 2011 ; Leonhardt *et al.*, 2006).

En laboratoire, les protocoles d'archéointensité les plus usités [protocole de Thellier-Thellier (Thellier et Thellier, 1959) et ses variantes (Coe, 1967 ; Aitken *et al.*, 1988 ; Yu *et al.*, 2004)] utilisent des refroidissements beaucoup plus rapides (entre 1h et 1h30) que le refroidissement initial. Pour les verres volcaniques, la durée de ce refroidissement lent peut être estimée avec fiabilité expérimentalement par géospeedométrie (Leonhardt *et al.*, 2006 ; Ferk *et al.*, 2010). Pour les matériaux

archéologiques, l'estimation du taux de refroidissement repose principalement sur l'archéologie expérimentale (Genevey et Gallet, 2002 ; Morales *et al.*, 2011). La détermination des refroidissements lents reste assez approximative et ils sont couramment choisis sur 24 heures (Chauvin *et al.*, 2000 ; Gomez-Paccard *et al.*, 2008 ; Hartmann *et al.*, 2011) ou sur 12 heures (Tema *et al.*, 2009 par exemple). On peut s'interroger sur les conséquences d'une mauvaise correction de vitesse de refroidissement. L'archéointensité pourrait être surestimée ou sous-estimée, d'autant plus que des facteurs de correction élevés jusqu'à 20-25% sont parfois obtenus (Genevey *et al.*, 2008). En général, les facteurs de correction restent compris entre 5 et 10% et dépendent intimement de la minéralogie magnétique (Gomez-Paccard *et al.*, 2008 ; Hartmann *et al.*, 2011).

Pour étudier de manière détaillée l'effet de la vitesse de refroidissement, des briquettes cuites dans deux fours expérimentaux de Sallèles-d'Aude (Aude, Laubenheimer, 1990) ont été prélevées. Le musée Amphoralis présente les ateliers gallo-romains de production d'amphores, notamment en reconstituant partiellement le cadre de cette production. Le champ magnétique terrestre ambiant a été mesuré sur place, ainsi que la vitesse du refroidissement lors de la cuisson des briquettes. Le protocole de Thellier-Thellier classique (Thellier et Thellier, 1959) avec corrections d'anisotropie et de vitesse de refroidissement a été appliqué. L'application du taux de refroidissement adéquat permet de retrouver l'intensité exacte du champ géomagnétique. Le lien entre le facteur de correction de vitesse de refroidissement et la minéralogie magnétique est également discuté.

1. Les connaissances préalables sur l'effet de la vitesse de refroidissement

1.1 Effet de la vitesse de refroidissement et taille des grains ferromagnétiques

La majeure partie des travaux théoriques et expérimentaux menés sur la vitesse de refroidissement était consacrée à la relation entre la taille des grains ferromagnétiques et le facteur de vitesse de refroidissement. Les propriétés exposées par la suite ont été mises en évidence pour différentes minéralogies ferromagnétiques : (titano)magnétites (Dodson et McClelland-Brown, 1980 ; Halgedahl *et al.*, 1980 ; Yu,

2011), (titano)hématites (Dodson et McClelland-Brown, 1980), oxydes de chrome (Biquand, 1994).

Pour les grains mono-domaines sans interactions, la capacité d'acquisition d'une ATR augmente avec la durée du refroidissement (Dodson et McClelland-Brown, 1980 ; Halgedahl *et al.*, 1980 ; McClelland-Brown, 1984 ; Fox et Aitken, 1980 ; Yu, 2011). Dodson et McClelland-Brown (1980) montre que cette propriété s'explique facilement par la théorie de Néel (1955) : un refroidissement plus long offre plus de possibilités d'atteindre l'aimantation à l'équilibre et donc provoque une diminution de la température de blocage. Cette diminution se manifeste par une augmentation de l'intensité d'ATR, principalement à cause de la réduction de l'agitation thermique mais aussi en raison de l'augmentation de l'aimantation à saturation Ms lorsque la température diminue. Halgedahl *et al.* (1980) ont prédit que l'augmentation de l'intensité d'ATR suivait une loi logarithmique avec la durée du refroidissement, ce qui a été vérifié expérimentalement à plusieurs reprises (Genevey et Gallet, 2002 ; Genevey *et al.*, 2008 ; Muxworthy *et al.*, 2011).

Pour les grains polydomaines (multidomaines, MD) et les grains monodomaines en interaction, la diminution de la vitesse de refroidissement se manifeste par une diminution de l'intensité d'ATR (Papusoi, 1972a et 1972b ; McClelland-Brown, 1984 ; Yu, 2011). A cause de l'augmentation des champs démagnétisants, la diminution de la température de déblocage provoque une diminution de la rémanence. Une autre étude (Biquand, 1994) obtient cependant des résultats contraires sur des basaltes dont l'aimantation est portée par des grains polydomaines. Pour les échantillons caractérisés par des grains pseudo monodomaines (Pseudo single domain, PSD), l'effet de la vitesse de refroidissement semble insignifiant (Yu, 2011). Cette taille de grains s'explique généralement par le mélange de grains mono et polydomaines (Dunlop, 2002), dont les effets respectifs par rapport à la vitesse de refroidissement semblent se compenser. L'ensemble de ces études montre donc que la variation de la taille des grains ferromagnétiques semble être le facteur prépondérant pour expliquer la variation des facteurs de correction.

1.2 Effet de la vitesse de refroidissement et températures de déblocage

Yu (2011) développe également la dépendance du facteur de correction vis-à-vis de la température de déblocage. Il remarque que l'effet de la vitesse de refroidissement sur des magnétites monodomaines et polydomaines se manifeste surtout à faible température et qu'il tend à s'annuler à proximité du point de Curie, c'est-à-dire entre 550 et 585°C. Il avance deux hypothèses pour expliquer cette observation. Premièrement, à proximité du point de Curie, l'augmentation de l'intensité d'ATR serait plus contrôlée par l'augmentation exponentielle de l'aimantation à saturation Ms que par la diminution de l'agitation thermique, principal facteur responsable de l'effet de vitesse de refroidissement. Deuxièmement, comme l'avait déjà suggéré Halgedahl *et al.* (1980), l'équilibre thermique et donc le blocage de l'aimantation, se produiraient trop rapidement à haute température, c'est-à-dire avant que la vitesse de refroidissement puisse faire diminuer la température de blocage.

Cette variation de l'effet de la vitesse de refroidissement a des conséquences sur les résultats de paléointensité. Cela provoque d'abord une forme légèrement convexe du diagramme ARN-ATR à haute température (Yu, 2011), parce que l'ATR acquise lors des refroidissements rapides est moins sous-estimée au-delà de 550°C qu'aux températures inférieures. De plus, lorsque les températures de déblocage sont concentrées à proximité du point de Curie, la correction de vitesse de refroidissement peut être surestimée, si elle est évaluée à une température inadaptée inférieure à 550°C (Yu, 2011). Cette remarque rejoint Leonhardt *et al.* (2006), qui explique la nécessité de corriger l'effet de vitesse de refroidissement dans l'intervalle des températures de déblocage, afin d'obtenir des paléointensités plus fiables.

2. Présentation des fours de Sallèles-d'Aude et du matériel étudié

L'étude a porté sur deux lots de briquettes cuites dans deux fours expérimentaux de Sallèles-d'Aude (Aude, dans l'arrière pays de Narbonne).

2.1 Petit four ouest, 11369A

Le premier four 11369A (nommé petit four ouest) est un four de petite taille à deux chambres (Figure. 2.13a), une chambre de chauffe et une chambre de cuisson

séparées par une sole perforée (Figure. 2.13b). La chambre de cuisson, de forme tronconique est haute de 88 cm avec un diamètre interne de 75 cm au niveau de la sole et de 40 cm au niveau de l'ouverture, ce qui représente un volume total de 0,2 m^3.

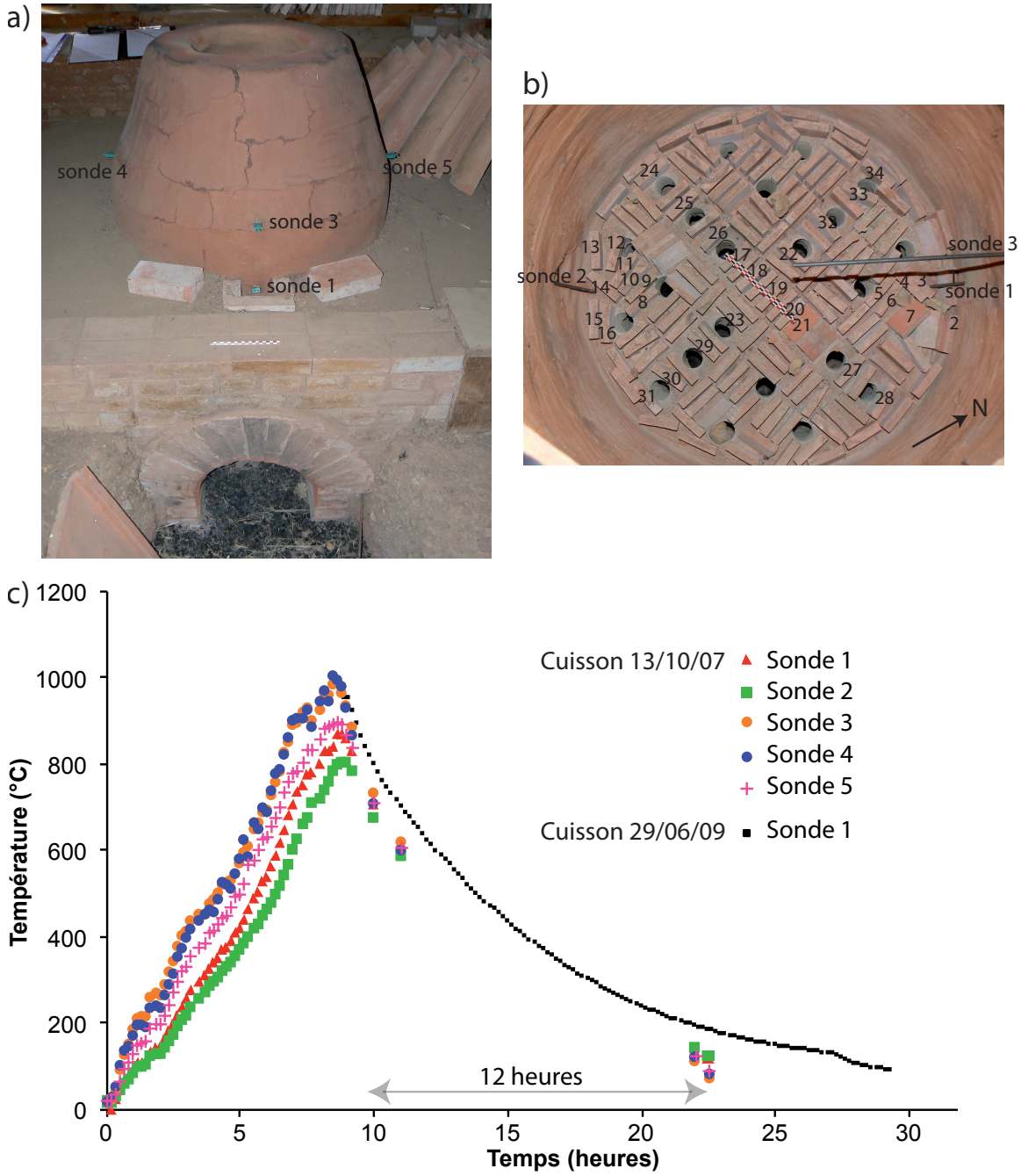


Figure 2.13 : 11369A, le petit four de Sallèles-d'Aude. a) vue d'ensemble du four depuis le nord. b) Vue interne du four avec les briquettes échantillonnées. c) Mesure de la température lors de la cuisson du 13 octobre 2007 par les cinq sondes indiquées sur les photos précédentes. Les points noirs indiquent l'enregistrement de la température lors du refroidissement d'une cuisson ultérieure (29 juin 2009). (Données M. Perron d'Arc)

Une cuisson de briquettes d'argile (8 cm de longueur sur 5,5 cm de largeur et 1,8 cm d'épaisseur) posées sur la sole et d'*imbrices* (tuiles cylindriques) a été réalisée dans le four le 13 octobre 2007 La température lors de la chauffe et du refroidissement a été mesurée par cinq thermocouples (Figure. 2.13c).

- La sonde 1 est située sur l'avant du four à 5 cm de la sole et à 10 cm de la paroi.
- La sonde 2 est située à l'arrière du four à 5 cm de la sole et à 5 cm de la paroi.
- La sonde 3 mesure la température au centre du four à 40 cm de la sole.
- Enfin, les sondes 4 et 5 sont situées sur les côtés du four et mesurent la température à 10 cm des parois à 40 cm de la sole.

Les courbes de chauffe montrent des différences de température d'au maximum 200°C. La température est plus élevée d'une part à 40 cm de la sole qu'au niveau de la sole et d'autre part sur l'avant que sur l'arrière du four. En revanche, le refroidissement est beaucoup plus homogène à l'échelle de la structure particulièrement dans l'intervalle 700-100°C au cours duquel est acquis l'aimantation thermorémanente. Le refroidissement est cependant légèrement plus lent au niveau de la sole. En raison de problèmes techniques, la température n'a pu être mesurée de manière continue pendant le refroidissement en octobre 2007 et il semble qu'environ douze heures soient nécessaires pour que la température décroisse de 700 à 100°C. Une autre cuisson, réalisée en juin 2009, confirme cet ordre de grandeur et montre une décroissance exponentielle de la température.

Trente-quatre briquettes, généralement posées de chant (sauf 1, 2, 3 et 4 penchées et 21 à plat), ont été échantillonnées (Figure 2.13b) sans orientement dans le plan horizontal. Les briquettes sont façonnées avec de l'argile des carrières industrielles de Saint-Papoul (Aude, société Térréal) mêlée à de la chamotte de tuile produite à partir des déchets de cuisson de la même entreprise.

2.2 Grand four, 11369B

Trente briquettes (façonnées de manière similaire) ont également été prélevées dans un autre four de Sallèles-d'Aude 11369B. Ce four, de grande taille, est également à deux volumes. La chambre de cuisson a une forme carrée d'environ 2 mètres de côté et

une hauteur maximale de 1,65 m. Ces dimensions représentent un volume total de plus de 6 m^3 (Figure 2.14a). Les briquettes posées sur la sole (Figure 2.14b) ont été cuites le 1 août 2008 avec des poteries et d'autres terres cuites architecturales.

La variation de température a été mesurée par quatre thermocouples (Figure 2.14c):

- La sonde 1 est située à l'avant du four à 70 cm de la sole.
- La sonde 2 est située à l'arrière du four, à 20 cm des parois et à 50 cm de la sole.
- La sonde 3 mesure la température au milieu du four à 1 m de la sole.
- La sonde 4, située à l'avant du four, mesure la température à 1.50 m de la sole.

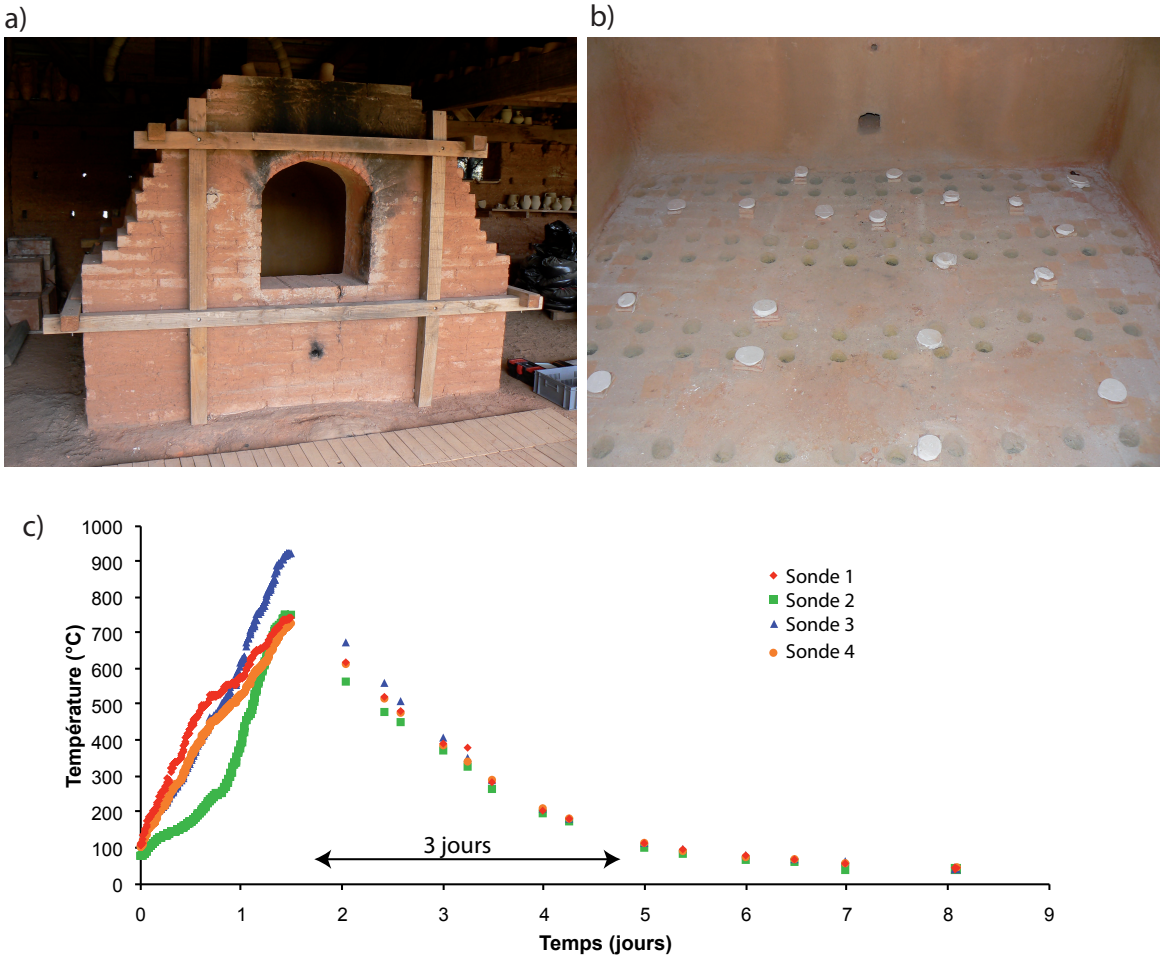


Figure 2.14 : 11369B, le grand four de Sallèles-d'Aude. a) vue d'ensemble de la chambre supérieure (chambre de cuisson) depuis le sud. b) Vue interne de la sole avec une partie des briquettes prélevées. c) Mesure de la température lors de la cuisson du 1 août 2008 par quatre thermocouples (Données M. Perron d'Arc).

La température atteinte est plus élevée au sommet du four qu'au niveau de la sole. La chauffe est également plus rapide à l'avant qu'à l'arrière du four. Comme l'ont

souligné Morales *et al.* (2011), l'augmentation de la température lors de la chauffe est différente selon les différents endroits du four. Mais, comme pour le petit four 11369A, les conditions lors du refroidissement sont beaucoup plus homogènes à l'échelle de la structure (Figure 2.14c). Dans le grand four 11369B, la température décroît de 700 à 100°C en trois jours environ.

Les briquettes, posées à plat sur la sole, ont pu être prélevées selon la méthode du chapeau de plâtre. L'orientement dans le plan horizontal a été réalisé à la boussole par rapport au Nord magnétique local.

2.2 Mesure du champ géomagnétique sur le site et dans les fours

L'intensité et l'inclinaison du champ géomagnétique ont été mesurées sur place le 17 mars 2011 par Philippe Lanos avec une sonde fluxgate MEDA (modèle FVM-400 Handheld vector) placée horizontalement avec un niveau à bulle. Les valeurs obtenues sur le site de Sallèles-d'Aude montrent une anomalie locale du champ magnétique par rapport aux valeurs prédites par l'IGRF avec une intensité de 43±1µT et une inclinaison de 52±2° (Tableau 2.2). Cette anomalie locale est probablement liée au toit métallique recouvrant les fouilles de Sallèles-d'Aude.

	Déclinaison (°)	Inclinaison (°)	Intensité (µT)
IGRF (13/10/2007)	-0,3	58,9	46,0
IGRF (01/08/2008)	-0,2	58,9	46,0
Mesure sur le site	-	52 ± 2	43 ± 1
Mesure dans le petit four (11369A)	-	52 ± 2	43 ± 1
Mesure dans le grand four (11369B)	-	62,4 ± 2,0	46,5 ± 1,0

Tableau 2.2 : Direction et intensité du champ magnétique terrestre prédites par l'IGRF pour le site de Sallèles-d'Aude et mesurées sur place avec la sonde fluxgate.

Le champ magnétique a également été mesuré dans les fours vides. Les mesures dans le petit four sont cohérentes avec le champ géomagnétique extérieur. En revanche, le grand four développe une anomalie avec une inclinaison moyenne de 62,4° et une intensité moyenne de 46,5µT. Aucune tendance de la variation de l'intensité ou de la direction ne se dessine à l'intérieur de chaque four. Il faut aussi remarquer que les valeurs mesurées à l'intérieur des fours vides sont peut-être susceptibles de varier

légèrement une fois le four rempli, comme au moment de l'acquisition de l'ATR des briquettes.

3. Protocole expérimental

Deux à trois échantillons cylindriques de diamètre standard (18mm) ont été préparés par briquette. Pour le petit four 11369A, l'axe z des échantillons correspond à l'épaisseur de la briquette et l'axe x est défini par sa longueur. Les échantillons des briquettes du grand four 11369B ont été repérés en fonction de leur orientement en place. Les aimantations rémanentes naturelles (ARN) ont été mesurées au magnétomètre cryogénique 2G ou au magnétomètre spinner Molspin. La susceptibilité en champ faible de chaque échantillon a été mesurée au susceptibilimètre Bartington MS2.

3.1 Minéralogie magnétique

Pour chaque four, des fragments de treize briquettes ont été soumis à des analyses de variation de la susceptibilité en fonction de la température (analyses KT) au susceptibilimètre KLY3-CS3. La susceptibilité a été mesurée lors de la chauffe jusqu'à 675°C pour le petit four 11369A et 620°C pour le grand four 11369B, puis lors du refroidissement consécutif. Treize échantillons du four 11369A et quatorze du four 11369B ont été désaimantés par champ alternatif, afin d'estimer la coercivité des grains ferromagnétiques porteurs de l'aimantation. Pour compléter ces analyses, une acquisition d'aimantation rémanente isotherme (ARI) a été menée pour dix échantillons du four 11369A et huit du four 11369B : les échantillons ont d'abord été soumis à un champ de 2,5T, puis à des champs de sens opposé (en l'occurrence parallèles à l'axe –z des échantillons) d'intensité progressive entre 10mT et 2,5T. Une courbe d'hystérésis a été également acquise pour quatre briquettes de chaque four (6, 8, 20 et 22 pour le four 11369A et 1, 3, 17 et 21 pour le four 11369B) : les courbes d'hystérésis ont été obtenues entre -1 et 1T avec l'AGM2900 de Princeton Measurements Corporation du laboratoire LSCE à Gif/Yvette.

3.2 Protocole de Thellier-Thellier

Le protocole classique de Thellier-Thellier (Thellier et Thellier, 1959) a été réalisé dans les fours « maison » du laboratoire de Rennes pour 17 échantillons du petit four 11369A et 18 échantillons du grand four 11369B. Le champ magnétique d'une intensité de 60µT a été appliqué selon l'axe z des briquettes lors de chaque chauffe et chaque refroidissement. L'intensité du champ du laboratoire a été choisie à 60µT plutôt que 43µT, pour avoir des conditions d'expérimentation proches des analyses sur les matériaux archéologiques, pour lesquels l'intensité du champ au moment de l'acquisition de l'aimantation n'est pas connue. Les échantillons des briquettes du four 11369A ont été soumis à 14 paliers de température entre 100 et 650°C et ceux des briquettes du four 11369B à 11 paliers entre 100 et 555°C. Pour vérifier l'absence d'évolution minéralogique en cours de chauffes, des bouclages (pTRM checks) ont été réalisés tous les deux paliers de température. La susceptibilité en champ faible a également été mesurée après chaque chauffe.

Le tenseur d'anisotropie d'aimantation thermorémanente a été estimé à 530°C pour l'ensemble des échantillons. Six ATR ont été successivement acquises selon les axes +z, -z, +x, -x, +y et –y des échantillons (Chauvin *et al.*, 2000). Un bouclage a finalement été réalisé selon +z pour détecter les éventuelles évolutions minéralogiques.

3.3 Correction de la vitesse de refroidissement

La correction de vitesse de refroidissement est généralement estimée par quatre acquisitions d'ATR successives à la même température (Gomez-Paccard *et al.*, 2008) :

- La première ATR, nommée ATR_{r+} est acquise lors d'un refroidissement rapide (environ 1,5 heures) avec un champ appliqué selon +z.
- La deuxième ATR, ATR_{r1-}, est acquise lors d'un refroidissement rapide avec le champ appliqué selon –z.
- La troisième ATR, ATR_{l+}, est acquise lors d'un refroidissement lent avec le champ appliqué selon +z.

- Enfin, la quatrième ATR, ATR_{r2-}, est acquise dans les mêmes conditions que ATR_{r1-}, pour mettre en évidence les éventuelles évolutions minéralogiques lors du refroidissement lent.

Le facteur de correction de la vitesse de refroidissement F_{corr} est obtenu par la relation :

$$F_{corr} = 100 . \frac{(ATR_{l+} - ATR_{r+})}{ATR_{r+}} \quad [2.1]$$

La facteur d'évolution F_{evol} lors de l'expérimentation est calculé suivant :

$$F_{evol} = 100 . \frac{(ATR_{r2-} - ATR_{r1-})}{ATR_{r1-}} \quad [2.2]$$

La correction de vitesse de refroidissement est appliquée si F_{corr} est supérieure à F_{evol} en valeur absolue (Gomez-Paccard *et al.*, 2008).

Tester différentes vitesses de refroidissement

Différentes vitesses de refroidissement ont été testées avec le protocole présenté ci-dessus lors du dernier palier de température, c'est-à-dire 555°C pour le grand four 11369B et 650°C pour le petit four 11369A. A ces paliers de température, les échantillons sont en moyenne désaimantés à 90% de leur ARN initiale.

Pour le four 11369B, les refroidissements lents ont été réalisés à des taux linéaires successifs de 0,8°C/min (soit un refroidissement sur environ 10 heures), 0,4°C/min (environ 19 heures), 0,2°C/min (environ 38 heures) et 0,1°C/min (environ 76 heures). Ce dernier taux se rapproche du refroidissement « archéologique » initial.

Deux taux linéaires ont été utilisés pour le petit four 11369A, 0,8°C/min (environ 12 heures), qui se rapproche le plus du refroidissement initial et 0,4°C/min (environ 23 heures). Un troisième refroidissement lent sur 12 heures a été effectué en suivant la décroissance exponentielle de la température observée pendant le refroidissement initial. Cet ajustement a été réalisé en mesurant la température en continu dans le four et en diminuant progressivement le taux de refroidissement.

Tester l'effet de la vitesse de refroidissement à différentes températures

Après un cycle chauffe-refroidissement en champ nul à la même température (555°C ou 650°C), les échantillons ont été chauffés à des températures inférieures, pour tester la variation de l'effet de vitesse de refroidissement en fonction de la température. A chaque palier, deux étapes seulement ont été réalisées : une première étape rapide et une seconde étape avec un refroidissement lent, linéaire et constant fixé à 0,8°C/min. Aucun bouclage n'a été réalisé après ces étapes, comme les échantillons avaient été chauffés à des températures supérieures lors des tests précedents.

Ce protocole a été réalisé à 350, 430 et 500°C pour le grand four 11369B et à 385, 500 et 580°C pour le petit four 11369A. Pour chaque four, l'effet de vitesse de refroidissement aura donc été testé à quatre températures différentes.

4. Minéralogie magnétique

Les briquettes des deux fours ont des intensités d'aimantation rémanente naturelle et des susceptibilités en champ faible significativement différentes (Figure 2.15). Les briquettes du grand four 11369B présentent généralement des valeurs plus élevées que celles du petit four 11369A.

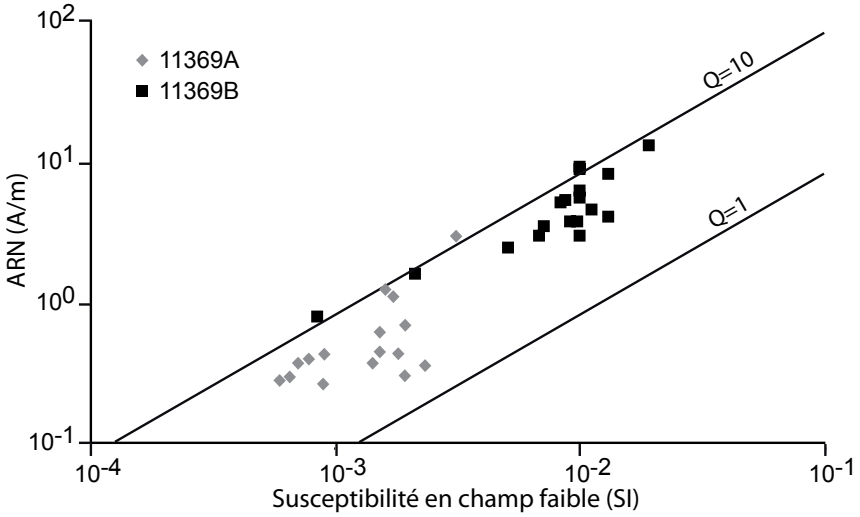


Figure 2.15 : Variation de l'intensité d'ARN en fonction de la susceptibilité en champ faible pour les échantillons étudiés en Thellier-Thellier des fours 11369A et 11369B. Deux isolignes de rapport de Koenigsberger sont également représentés.

Cette variation reflète une minéralogie magnétique différente, illustrée par les courbes thermomagnétiques (Figure 2.16), les désaimantations par champ alternatif (Figure 2.17 a et b) et les acquisitions d'ARI (Figure 2.17 c et d). Les champs auxquels l'échantillon est désaimanté de 50% (MDF, Median Demagnetizing Field), les aimantations rémanentes à saturation Jrs (2,5T) et les champs coercitifs rémanents Hcr calculés sont récapitulés dans le Tableau 2.3.

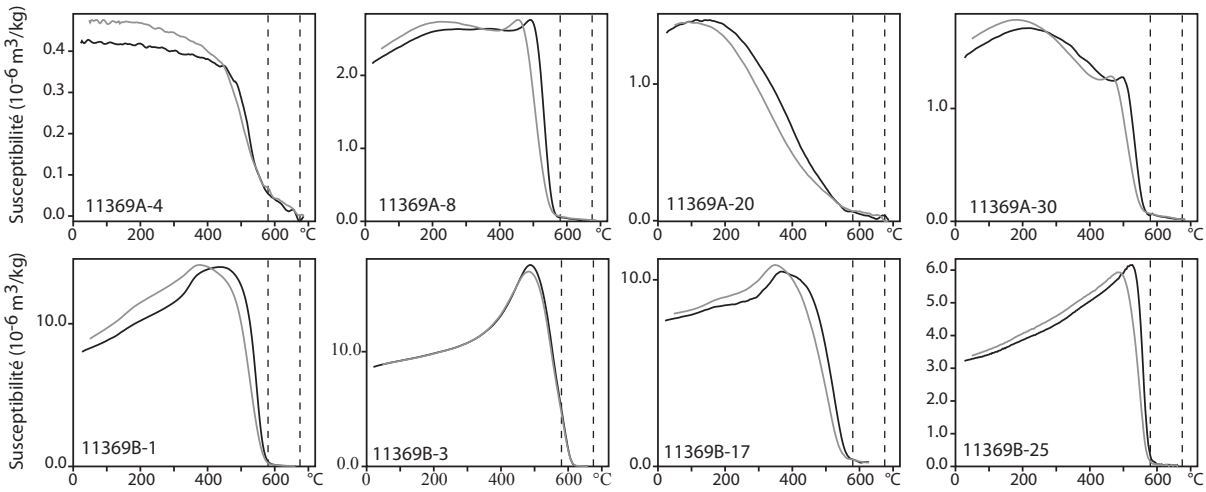


Figure 2.16 : Courbes thermomagnétiques représentatives des fours 11369A (en haut) et 11369B (en bas). La courbe noire (grise) marque la variation de la susceptibilité au cours de la chauffe (refroidissement). Les traits verticaux (en pointillé) indiquent les points de Curie de la magnétite (585°C) et de l'hématite (675°C).

Les désaimantations par champ alternatif, les courbes « backfield » et les courbes d'hystérésis de forme « wasp-waisted » (Figure 2.17) des briquettes du petit four 11369A montrent clairement la présence de deux phases ferromagnétiques. La phase majoritaire est une phase de faible coercivité, que les courbes thermomagnétiques permettent d'identifier à une titanomagnétite pauvre en Titane par ses points de Curie entre 550 et 580°C. La phase de forte coercivité, caractérisée par des MDF et des Hcr (en général entre 400 et 900 mT) très élevés, a des points de Curie entre 650 et 675°C et des températures de déblocage (Figure 2.18) supérieures à 620°C, qui l'identifient à une titanohématite. La proportion de titanohématite est très variable selon les briquettes du four 11369A, cette phase apparaissant par exemple quasi-absente dans les briquettes 8 et 26.

Les briquettes du grand four 11369B ont une minéralogie magnétique plus homogène. Les pics Hopkinson des courbes thermomagnétiques (Figure 2.16) indiqueraient la présence d'une seule phase ferromagnétique, la titanomagnétite. Deux briquettes ont des points de Curie plus élevés que 580°C (603°C pour 11369B-3 et 614°C pour 11369B-14) indicateurs de titanomaghémites ou de titanomagnétites partiellement oxydées. Les désaimantations par champ alternatif, les courbes « backfield » et d'hystérésis (Figure 2.17) montrent que la plupart des échantillons porte aussi une phase de plus forte coercivité présente en proportions variables et qui n'est pas visible sur les courbes thermomagnétiques. Par comparaison avec les briquettes du four 11369A, cette phase est probablement une titanohématite. La plus forte proportion de titanomagnétites dans les briquettes du four 11369B que dans celles du four 11369A explique les plus fortes intensités d'ARN observée.

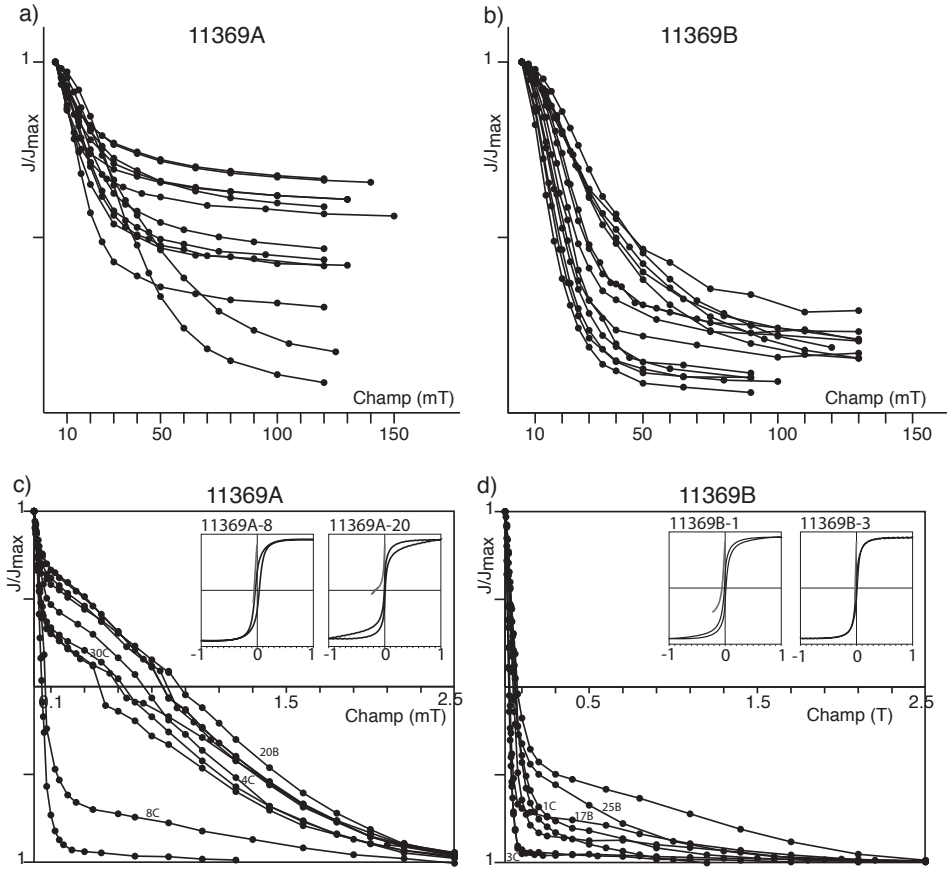


Figure 2.17 : (a) et (b) Désaimantation par champ alternatif de 13 échantillons du petit four 11369A et 14 du four 11369B. L'intensité d'aimantation est normalisée par rapport à l'ARN. (c) et (d) Résultats d'acquisition d'aimantation rémanente isotherme (courbes « backfield » des 10 échantillons de 11369A et des 8 échantillons de 11369B) et exemples de courbe d'hystérésis.

Comme les briquettes des deux fours sont *a priori* fabriquées avec la même composition, la différence de minéralogie magnétique s'explique par des conditions de cuisson différentes. La plus forte proportion d'hématite dans le petit four, indicatrice d'une cuisson plus oxydante, serait due au caractère plus ouvert du four. Au niveau de chaque four, aucune relation entre la position des briquettes et la proportion d'hématite n'a pu être mise en évidence. Le mélange de deux phases magnétiques ne permet pas d'obtenir des informations précises sur la taille des grains magnétiques avec un diagramme de Day (Day *et al*., 1977 ; Dunlop, 2002).

Echantillon	MDF (mT)	"Jrs" (A/m)	"Hcr" (mT)	Echantillon	MDF (mT)	"Jrs" (A/m)	"Hcr" (mT)
11369A-2C	24.2	-	-	11369B-1C	46.0	237.1	62.8
11369A-4C	>150	11.0	652.2	11369B-3C	19.1	407.3	24.6
11369A-6C	>150	10.9	773.6	11369B-5C	29.2		
11369A-8C	46.5	48.5	66.5	11369B-7B	39.9	159.0	57.0
11369A-12C	48.5	12.1	528.9	11369B-9C	20.8		
11369A-16C	43.2	12.3	416.4	11369B-13B	38.4	86.2	48.0
11369A-18C	>150	-	-	11369B-15B	28.4		
11369A-20B	>150	13.4	878.7	11369B-16C	42.3	176.0	62.5
11369A-22C	>150	12.0	782.4	11369B-17B	21.7	122.1	27.5
11369A-26C	38.4	124.1	46.4	11369B-21B	18.2		
11369A-30C	40.6	16.3	533.3	11369B-23C	23.4		
11369A-32C	>150	11.6	788.9	11369B-25B	46.2	30.9	73.9
11369A-34C	76.6	-	-	11369B-27B	25.3		
				11369B-30C	16.8	149.4	22.5

Tableau 2.3 : Median Demagnetizing Field MDF, Aimantation rémanente à saturation Jrs et champ coercitif rémanent Hcr d'échantillons des briquettes cuites dans les fours 11369A et 11369B. Un échantillon-frère de chacun d'entre eux a été soumis au protocole de Thellier-Thellier. Dans ce chapitre, est appelé champ coercitif rémanent Hcr le champ, pour lequel l'aimantation rémanente isotherme acquise dans un champ de 2500mT (« Jrs ») devient nulle, même lorsque l'aimantation n'est pas saturée à 2500mT.

5. Résultats d'archéointensité

5.1 Acceptation des résultats

Les 17 échantillons des briquettes cuites dans le four 11369A et les 18 échantillons de celles du four B donnent d'excellents résultats d'archéointensité (Figure 2.18 et Tableaux 2.4 et 2.5). L'absence d'évolutions minéralogiques est mise en évidence par les bouclages positifs (La différence maximale entre les deux ATR ayant été fixée à

10%) et l'absence de déviation de la direction de l'ARN. Tous les échantillons respectent les critères de fiabilité définis par Hervé *et al.* (2011) :

- La fraction d'ARN prise en compte dans l'estimation d'archéointensité (facteur f, Coe *et al.*, 1967) est supérieure à 40%.
- Les facteurs MAD et DANG, quantifiant la linéarité de la direction d'aimantation (Selkin et Tauxe, 2000), sont systématiquement inférieurs à 5°.
- Enfin, β le rapport de l'erreur standard de la pente sur sa valeur absolue est inférieure à 5%. Ce dernier paramètre quantifie le caractère linéaire des diagrammes ARN-ATR. On peut remarquer que certains échantillons (Figure 2.18 b et d par exemple) ont des diagrammes ARN-ATR légèrement concaves.

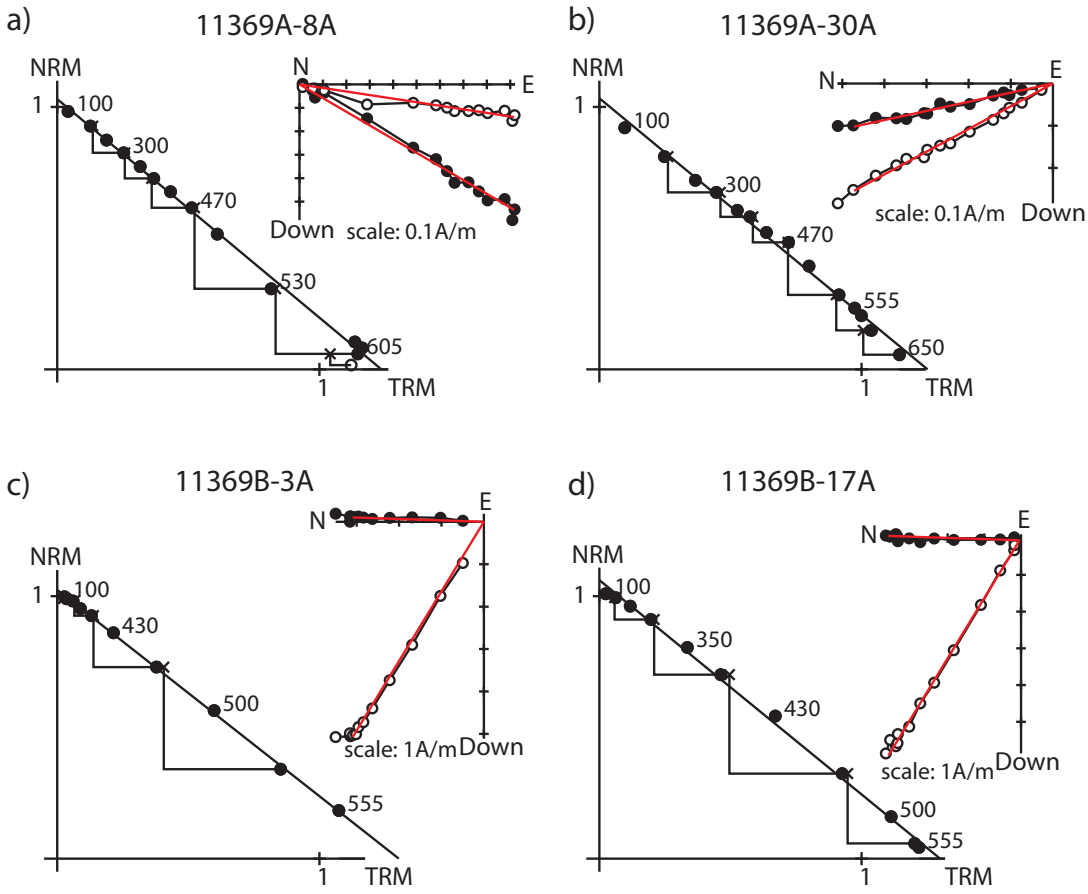


Figure 2.18 : Résultats d'archéointensité (Diagrammes ARN-ATR et diagrammes de Zijderveld) représentatifs de briquettes du four 11369A (a et b) et du four 11369B (c et d). Les températures sont indiquées en degré Celsius. Sur les diagrammes de Zijderveld, les cercles blancs (noir) sont les projections sur le plan horizontal (vertical).

Tous les échantillons sont donc utilisés pour calculer l'archéointensité moyenne, qui est pondérée par le facteur de qualité q et le nombre de paliers de température n (Prévôt *et al.*, 1985). Les archéointensités moyennes obtenues sont supérieures de 10 à 13µT aux valeurs attendues avec une moyenne de 55,3±3,2µT pour le petit four 11369A et 51,8±3,3µT pour le grand four 11369B.

5.2 Correction d'anisotropie

La correction d'anisotropie a été appliquée individuellement à l'ensemble des échantillons sauf deux (11369A-26A et 11369B-13A), pour lesquels la dérive est supérieure à 10%. Les tenseurs d'anisotropie des briquettes des deux fours ont des caractéristiques similaires. Les taux d'anisotropie varient entre 7 et 31% pour les échantillons du four 11369A et entre 19 et 59% pour ceux du four 11369B. De telles valeurs élevées sont courantes pour ce type de matériel archéomagnétique en raison de leur façonnage (Tema, 2009). L'anisotropie des briquettes est dominée par une foliation (Figure 2.19), même si quelques échantillons (2 du four 11369A et 4 du four 11369B) sont dominés par une linéation. Pour toutes les briquettes, l'axe minimal du tenseur d'anisotropie correspond à l'axe z des briquettes, soit à leur épaisseur. Les tenseurs des échantillons dominés par la linéation se distinguent par un axe minimal d'anisotropie moins vertical. Les directions des axes maximal et intermédiaire dans le plan horizontal sont plus difficiles à interpréter en fonction de la forme de la briquette. Ces variations d'anisotropie ne semblent pas être liées à la variation de la minéralogie magnétique : aucune relation claire n'a pu être mise en évidence par exemple avec la proportion d'hématite.

L'application de la correction d'anisotropie modifie les directions d'aimantation en les rapprochant des valeurs mesurées sur place. Les directions d'ATR des briquettes posées de chant du petit four 11369A ont été exploitées comme du matériel déplacé et l'inclinaison moyenne a été estimée par la statistique de McFadden et Reid (1982). Les directions d'ATR sont principalement regroupées en deux lots d'inclinaison identique et de déviation à 90°, qui correspondent au rangement en damier des briquettes sur la sole du four (Lanos, 1994) (Figure 2.20a, Tableaux 2.2 et 2.5). L'inclinaison moyenne corrigée de l'anisotropie (58,5±3,0°) reste supérieure à la valeur mesurée sur le site avec

la sonde fluxgate (52,0±2,0°). Comme les briquettes du grand four 11369B ont pu être orientées, elles peuvent être considérées comme du matériel en place et la direction d'aimantation moyenne a été calculée par la statistique de Fisher (1953). L'inclinaison moyenne (58,0±1,1°) est intermédiaire entre la valeur mesurée sur le site (52,0±2,0°) et la valeur mesurée dans le four vide à température ambiante (62,4±2,0°) ((Figure 2.20b, Tableaux 2.2 et 2.5).

La correction diminue généralement l'archéointensité et ce jusqu'à 11µT. De plus, elle regroupe significativement les archéointensités avec des faibles dispersions de 2% pour les briquettes du petit four 11369A et de 3% pour celles du grand four 11369B. Les archéointensités moyennes (48,2±1,1µT pour le petit four 11369A et 48,5±1,5µT pour le grand four 11369B) restent significativement supérieures aux valeurs attendues, ce qui est probablement dû à l'effet de la vitesse de refroidissement.

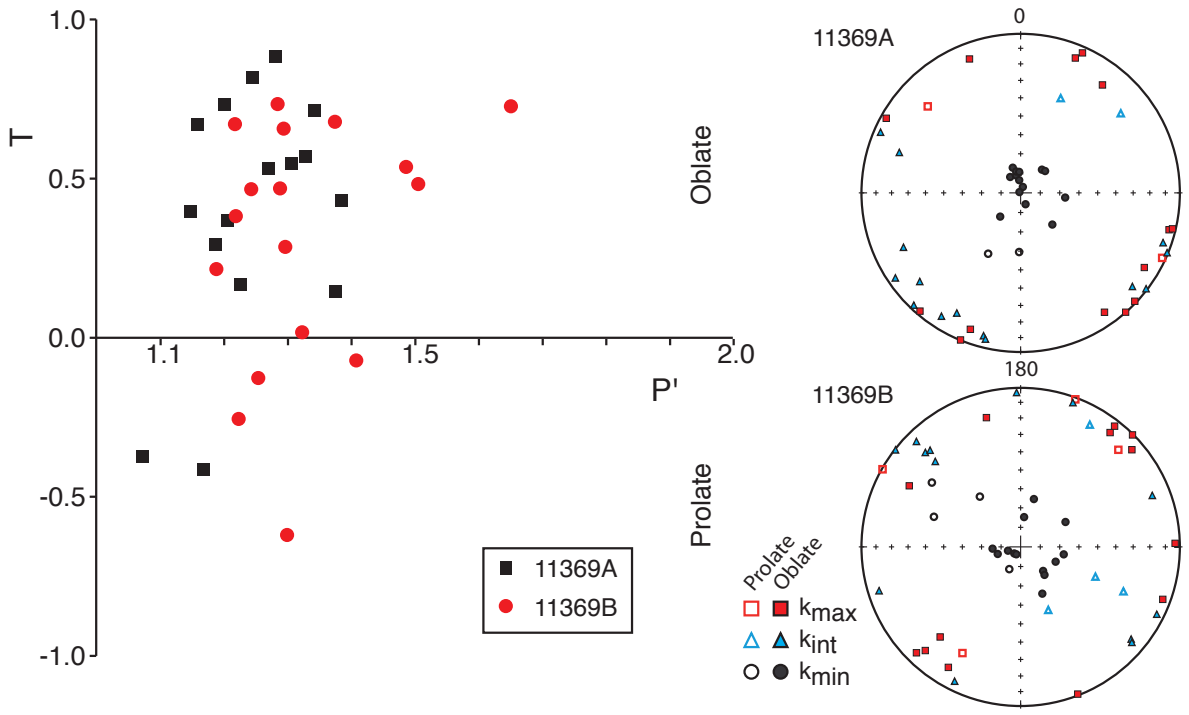


Figure 2.19 : Correction d'anisotropie. A gauche, diagramme T-P' pour les échantillons (dont la dérive est inférieure à 10%) de briquettes du four 11369A (carrés noirs) et du four 11369B (cercles rouges). A droite, représentation stéréographique des directions des vecteurs propres du tenseur d'anisotropie. Les symboles sont fermés pour les échantillons dominés par la foliation (oblate) et ouverts pour ceux dominés par la linéation (prolate). Les directions sont en coordonnées échantillon.

Echantillon	NRM (A/m)	χ (SI)	T1 - T2 (°C)	n	I (°)	F ± std (µT)	Mad (°)	Dang (°)	f	g	q	ß	Dérive (%)	Anisotropie K_1/K_3	K_1/K_2	K_2/K_3	I_a (°)	F_a ± std (µT)
11369A-2A	4.2E-01	8.9E-04	100 - 650	14		52.1 ± 1.2	2.9	1.3	0.84	0.91	31.8	0.024	-1.3	1.16	1.11	1.04		48.7 ± 1.1
11369A-4A	2.8E-01	5.9E-04	100 - 650	14		52.6 ± 0.8	4.6	1.3	0.74	0.89	41.6	0.016	0.4	1.15	1.02	1.12		47.1 ± 0.8
11369A-6A	2.6E-01	8.9E-04	100 - 650	14	65.3	48.4 ± 0.8	3.3	0.5	0.79	0.88	43.9	0.016	-2.8	1.07	1.05	1.02	65.2	48.1 ± 0.8
11369A-8A	1.1E+00	1.7E-03	100 - 605	13	57.7	58.9 ± 1.0	3.0	1.3	0.90	0.86	45.0	0.017	-4.9	1.31	1.04	1.26	58.9	49.1 ± 0.8
11369A-10A	4.3E-01	1.8E-03	100 - 650	14	56.2	55.4 ± 0.8	2.6	1.0	0.87	0.91	51.4	0.015	0.4	1.22	1.09	1.13	56.1	49.8 ± 0.8
11369A-12A	3.9E-01	7.8E-04	100 - 650	14	58.4	55.2 ± 1.0	3.8	0.5	0.81	0.91	42.3	0.017	0.5	1.18	1.02	1.16	56.6	48.4 ± 0.8
11369A-14A	4.1E-01	8.9E-04	100 - 650	14	50.1	53.8 ± 1.0	3.9	1.8	0.84	0.91	41.7	0.018	-1.3	1.18	1.06	1.12	47.4	48.7 ± 0.9
11369A-16A	6.7E-01	1.9E-03	100 - 650	14	56.2	59.1 ± 1.2	2.4	1.6	0.87	0.91	37.4	0.021	-1.2	1.31	1.06	1.23	50.9	47.6 ± 1.1
11369A-18A	1.2E+00	1.6E-03	100 - 650	14	61.0	59.4 ± 1.5	2.7	0.9	0.92	0.83	30.1	0.025	-8.0	1.37	1.09	1.25	62.4	47.7 ± 1.2
11369A-20A	3.7E-01	1.4E-03	100 - 650	14	65.5	57.3 ± 1.2	3.6	3.1	0.83	0.89	33.7	0.022	-0.5	1.37	1.14	1.20	65.0	49.0 ± 1.1
11369A-22A	3.5E-01	2.3E-03	100 - 650	14	61.3	52.0 ± 0.6	4.7	3.5	0.84	0.89	62.8	0.012	-1.9	1.26	1.06	1.19	55.2	46.3 ± 0.6
11369A-24A	2.9E-01	6.5E-04	100 - 650	14	61.1	53.2 ± 0.9	3.7	0.7	0.79	0.89	41.3	0.017	-0.3	1.14	1.04	1.10	61.6	48.5 ± 0.8
11369A-26A	3.0E+00	3.0E-03	100 - 650	14	60.6	59.4 ± 1.7	2.9	1.1	0.98	0.84	29.5	0.028	-11.2					
11369A-28A	4.4E-01	1.5E-03	100 - 650	14	63.0	57.4 ± 0.6	2.5	1.3	0.84	0.91	75.4	0.010	-2.0	1.22	1.02	1.20	61.8	48.1 ± 0.5
11369A-30A	6.1E-01	1.5E-03	100 - 650	14	65.2	59.2 ± 1.4	2.7	1.1	0.84	0.91	31.4	0.024	-1.5	1.29	1.06	1.22	59.9	48.7 ± 1.2
11369A-32A	3.0E-01	1.9E-03	100 - 650	14	60.0	54.4 ± 1.1	3.1	1.2	0.77	0.88	34.3	0.020	0.0	1.25	1.01	1.23	56.1	45.7 ± 0.9
11369A-34A	3.6E-01	7.0E-04	100 - 650	14	64.9	54.9 ± 0.8	2.6	2.0	0.78	0.91	46.1	0.016	-2.3	1.20	1.06	1.13	61.7	48.9 ± 0.8

I_{mov} = 60.5° N=15 k=185 α_{95}=2.3°
Moyenne F_{moy} (N=17) 55.5 ± 3.2 µT
F_{pmoy} pondérée 55.3 µT

I_{mov} = 58.5° N=14 k=125 α_{95}=3.0°
(N=16) 48.2 ± 1.1 µT
48.2 µT

Tableau 2.4 : Résultats d'archéointensité des échantillons des briquettes du petit four 11369A

Numéro de l'échantillon; Intensité d'ARN; Susceptibilité en champ faible; Intervalle de temperature sur lequel est estimée l'archéointensité; Nombre de paliers de temperature; Inclinaison (pour les briquettes posées de chant) ; Archéointensité sans correction avec sa deviation standard; MAD; DANG; f, fraction d'ARN; facteur g; facteur de qualité q; β rapport de l'erreur standard de la pente sur la valeur absolue de la pente ; Dérive lors de la correction d'anisotropie ; Taux d'anisotropie ; Taux de linéation ; Taux de foliation ; Inclinaison corrigée de l'anisotropie pour les briquettes posées de chant ; Archaeointensité corrigée de l'anisotropie avec sa déviation standard.

En dessous, inclinaison moyenne avec k le paramètre de précision de Fisher et α_{95} le rayon du cercle de confiance à 95% (McFadden et Reid, 1982) ; archéointensité moyenne avec sa déviation standard, sans correction et avec correction d'anisotropie. Les moyennes d'intensité sont aussi pondérées par le nombre de paliers de température n et le facteur de qualité q (Prévôt et al., 1985).

															Anisotropie					
Echantillon	NRM (A/m)	χ (SI)	T1 - T2 (°C)	n	D (°)	I (°)	F ± std (μT)	Mad (°)	Dang (°)	f	g	q	ß	Dérive (%)	K_1/K_3	K_1/K_2	K_2/K_3	D_a(°)	I_a (°)	F_a ± std (μT)
11369B-1A	3.8E+00	9.1E-03	100 - 555	11	350.6	56.6	48.1 ± 0.8	1.5	1.0	0.92	0.77	40.4	0.018	-0.6	1.26	1.03	1.22	353.9	58.3	49.7 ± 0.9
11369B-2A	4.6E+00	1.1E-02	100 - 555	11	348.4	56.2	49.9 ± 1.0	1.6	0.6	0.94	0.85	40.5	0.020	-2.0	1.27	1.04	1.22	356.0	59.3	49.5 ± 1.0
11369B-3A	5.6E+00	1.0E-02	100 - 555	11	354.9	53.8	50.8 ± 0.3	2.0	1.4	0.80	0.82	101.4	0.007	-6.8	1.28	1.07	1.20	3.0	58.4	47.2 ± 0.4
11369B-5A	3.8E+00	9.7E-03	100 - 555	11	360.0	53.4	48.8 ± 0.7	2.5	0.2	0.89	0.88	56.3	0.014	-0.2	1.25	1.14	1.10	355.0	55.8	49.3 ± 0.7
11369B-7A	4.0E+00	1.3E-02	100 - 555	11	356.3	53.6	51.5 ± 0.7	2.7	1.2	0.90	0.90	56.9	0.014	-1.7	1.20	1.03	1.17	355.2	57.8	48.9 ± 0.8
11369B-9A	1.3E+01	1.9E-02	100 - 555	11	358.1	51.0	55.1 ± 0.8	1.5	1.0	0.95	0.84	57.8	0.014	0.9	1.34	1.05	1.28	360.0	58.4	48.5 ± 0.7
11369B-11A	3.0E+00	1.0E-02	100 - 555	11	355.5	52.4	52.0 ± 1.2	2.7	0.3	0.86	0.88	32.9	0.023	-0.5	1.21	1.06	1.14	358.1	57.6	47.3 ± 1.0
11369B-13A	1.6E+00	2.1E-03	100 - 555	11	357.2	56.8	45.8 ± 1.2	2.8	1.0	0.91	0.81	28.3	0.026	-15.9						
11369B-15A	2.9E+00	6.7E-03	100 - 555	11	359.0	53.1	51.6 ± 1.0	1.9	1.0	0.85	0.88	38.1	0.020	-0.4	1.23	1.06	1.17	353.9	57.9	48.5 ± 1.0
11369B-16A	2.4E+00	5.0E-03	100 - 555	11	351.4	53.3	49.7 ± 0.6	2.4	1.0	0.91	0.88	62.6	0.013	-3.8	1.29	1.09	1.18	350.7	57.8	46.8 ± 0.6
11369B-17A	6.2E+00	1.0E-02	100 - 555	11	5.8	53.4	52.6 ± 0.9	1.8	0.6	0.91	0.86	45.5	0.017	0.1	1.28	1.22	1.05	0.4	58.8	49.4 ± 0.9
11369B-19B	5.0E+00	8.3E-03	100 - 555	11	356.6	52.1	52.0 ± 0.7	1.1	1.1	0.93	0.85	63.4	0.012	0.2	1.48	1.11	1.34	356.2	58.2	51.4 ± 0.7
11369B-21A	8.2E+00	1.3E-02	100 - 555	11	2.9	44.7	59.6 ± 1.0	1.7	1.3	0.87	0.85	42.1	0.017	-2.8	1.59	1.06	1.49	358.9	57.0	49.6 ± 0.9
11369B-23A	9.0E+00	1.0E-02	100 - 555	11	358.2	54.2	53.5 ± 0.5	1.8	0.9	0.97	0.84	90.2	0.009	-0.1	1.32	1.15	1.15	354.5	59.3	48.3 ± 0.5
11369B-25A	7.9E-01	8.4E-04	100 - 555	11	358.9	51.2	47.6 ± 0.5	2.1	1.0	0.77	0.83	66.9	0.010	-6.1	1.19	1.07	1.11	359.6	54.7	45.2 ± 0.5
11369B-27A	5.2E+00	8.6E-03	100 - 555	11	2.0	57.5	50.1 ± 1.0	1.5	1.0	0.90	0.86	40.2	0.019	0.2	1.22	1.13	1.08	352.7	58.7	49.4 ± 0.9
11369B-29A	8.8E+00	1.0E-02	100 - 555	11	357.2	49.4	57.0 ± 0.6	1.4	0.2	0.96	0.83	74.7	0.011	-0.4	1.46	1.09	1.34	353.5	58.9	49.7 ± 0.6
11369B-30A	3.4E+00	7.1E-03	100 - 555	11	341.8	51.9	52.1 ± 0.4	4.6	0.2	0.60	0.82	66.8	0.007	-4.4	1.41	1.20	1.17	345.4	58.8	47.2 ± 0.4

D_{moy} = 356.5° I_{moy} = 53.2° N=18 k=324 α_{95}=1.9°
Moyenne F_{moy} (N=18) 51.5 ± 3.3 μT
F_{pmoy} pondérée 51.8 μT

D_{moy} = 355.7° I_{moy} = 58.0° N=17 k=1040 α_{95}=1.1°
Moyenne F_{moy} (N=18) 48.6 ± 1.5 μT
F_{pmoy} pondérée 48.5 μT

Tableau 2.5 : Résultats d'archéointensité des échantillons des briquettes du petit four 11369B

Numéro de l'échantillon; Intensité d'ARN; Susceptibilité en champ faible; Intervalle de temperature sur lequel est estimée l'archéointensité; Nombre de paliers de temperature; Déclinaison et Inclinaison sans correction ; Archéointensité sans correction avec sa deviation standard; MAD; DANG; f, fraction d'ARN; facteur g; facteur de qualité q; β rapport de l'erreur standard de la pente sur la valeur absolue de la pente ; Dérive lors de la correction d'anisotropie ; Taux d'anisotropie ; Taux de linéation ; Taux de foliation ; Déclinaison et Inclinaison corrigées de l'anisotropie ; Archaeointensité corrigée de l'anisotropie avec sa déviation standard.

En dessous, direction moyenne avec le facteur de regroupement k et le rayon du cercle de confiance à 95% α_{95} (Fisher, 1953). Archéointensité moyenne avec sa déviation standard, sans correction et avec correction d'anisotropie. Les moyennes sont aussi pondérées par le nombre de paliers de température n et le facteur de qualité q (Prévôt et al., 1985).

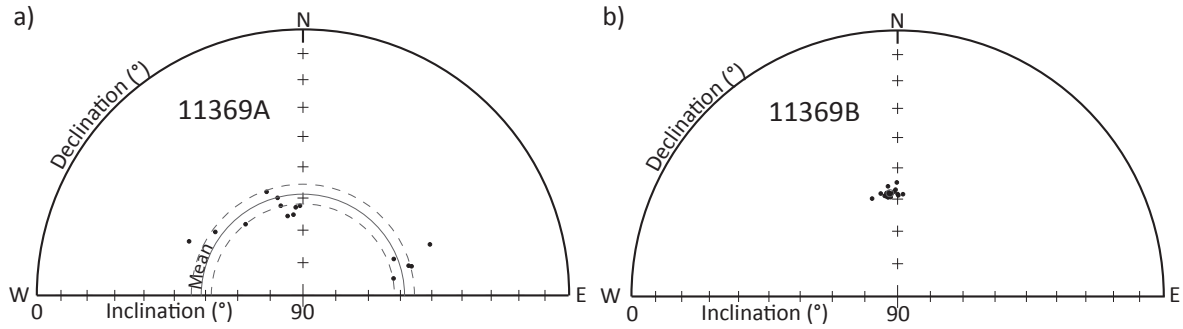


Figure 2.20 : Représentations stéréographiques des directions d'aimantation, corrigées de l'anisotropie, des briquettes a) du petit four 11369A (seules les briquettes posées de chant sont représentées) et b) du grand four 11369B. L'inclinaison moyenne pour 11369A est calculée par la statistique de McFadden et Reid (1982) et la direction d'aimantation moyenne pour 11369B par la statistique de Fisher (1953).

6. Correction de vitesse de refroidissement

L'effet de la vitesse de refroidissement a été évalué sur les échantillons corrigés de l'anisotropie, c'est-à-dire 16 briquettes du petit four 11369A et 17 briquettes du grand four 11369B. Les facteurs de correction (Figure 2.21) sont très variables, entre -2,3 et 21,2% pour un refroidissement lent de 0,8°C/min et entre -2,0 et 29,2% pour 0,4°C/min. Cette dispersion avec une valeur moyenne autour de 10% est habituelle pour les matériaux archéomagnétiques (Gomez-Paccard *et al.*, 2008 ; Genevey *et al.*, 2008). Les facteurs de correction sont significativement plus élevés pour les briquettes du four 11369A que pour celles du four 11369B.

Pour les briquettes du four 11369B, une ATR a été acquise à la même température (620°C) avec quatre taux de refroidissement différents (Figure 2.22). Sur l'ensemble des échantillons, on observe une augmentation logarithmique du facteur de correction (c'est-à-dire de l'intensité de l'ATR) avec la durée du refroidissement, comme l'avait démontré théoriquement Halgedahl *et al.* (1980). Pour les briquettes du four 11369A, l'effet de la vitesse de refroidissement testée avec seulement deux vitesses différentes ne permet pas de vérifier cette relation logarithmique. L'intensité de l'ATR augmente de 10 à 40% entre le refroidissement sur 12 heures (0,8°C/min) et sur 23 heures (0,4°C/min), sauf pour deux échantillons (11369A-8A et 11369A-18A). Pour ceux-ci, la diminution de l'ATR entre les deux refroidissements lents peut être imputée

aux évolutions minéralogiques, comme le facteur de correction F_{corr} est inférieur au facteur d'évolution F_{evol}.

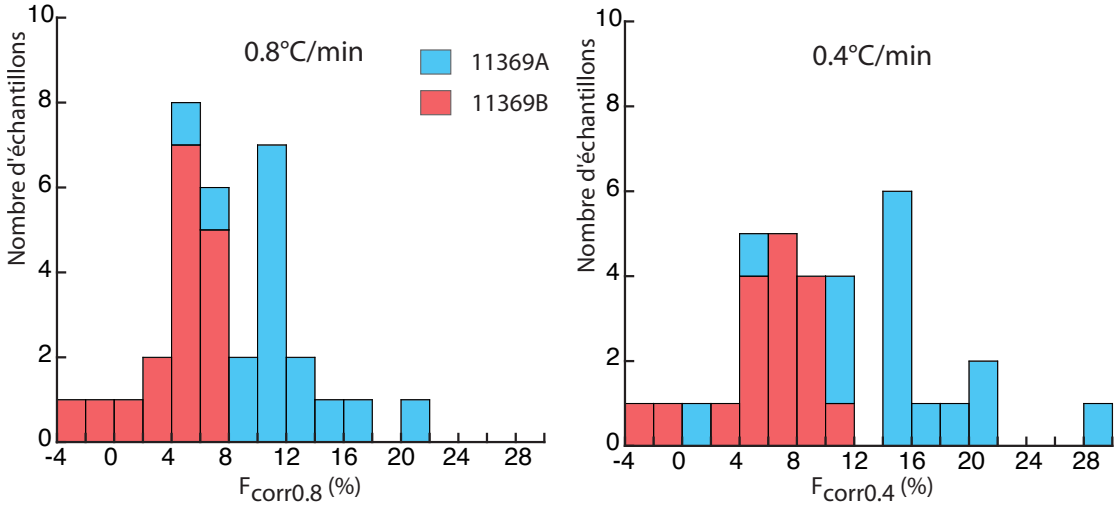


Figure 2.21 : Histogrammes des facteurs de correction de vitesse de refroidissement (avec un refroidissement lent de 0.8°C/min à gauche et de 0.4°C/min à droite) pour les échantillons de briquettes des fours 13369A et 11369B.

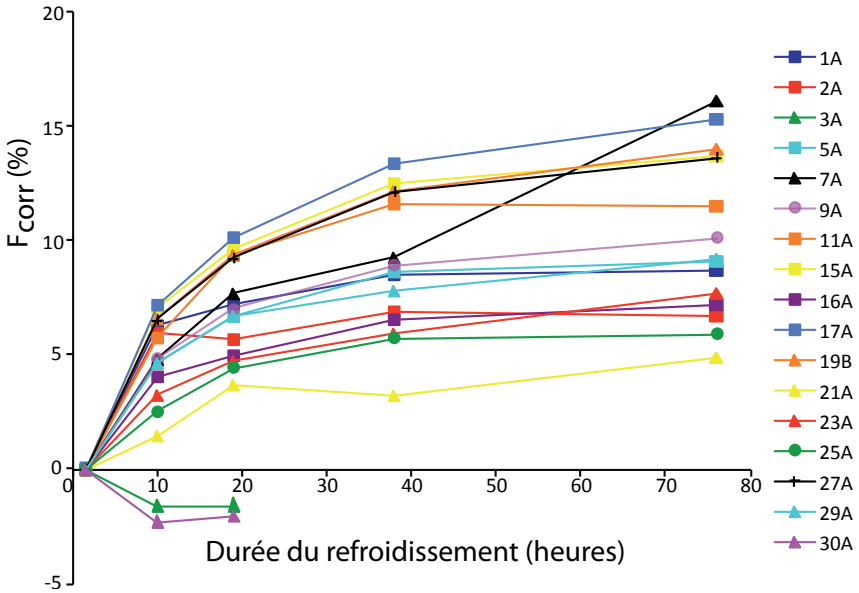


Figure 2.22 : Facteur de correction en fonction de la durée du refroidissement pour les 17 échantillons de briquettes du four 11369B.

En laboratoire, la correction de vitesse de refroidissement est appliquée avec un taux qui décroît linéairement, alors que lors du refroidissement archéologique initial, la température décroît plutôt de manière exponentielle (Figure 2.13c et 2.14c). La différence que cela implique sur l'acquisition d'ATR a été testée pour les briquettes du

four 11369A. Les facteurs de correction sont équivalents sauf pour les deux échantillons 11369A-8A et 11369A-18A (Figure 2.23). Mais ce comportement différent peut être imputé aux évolutions minéralogiques. Ce test pour les briquettes du four 11369A montre donc la fiabilité des protocoles appliquant un refroidissement linéaire, même pour des facteurs de correction très élevés.

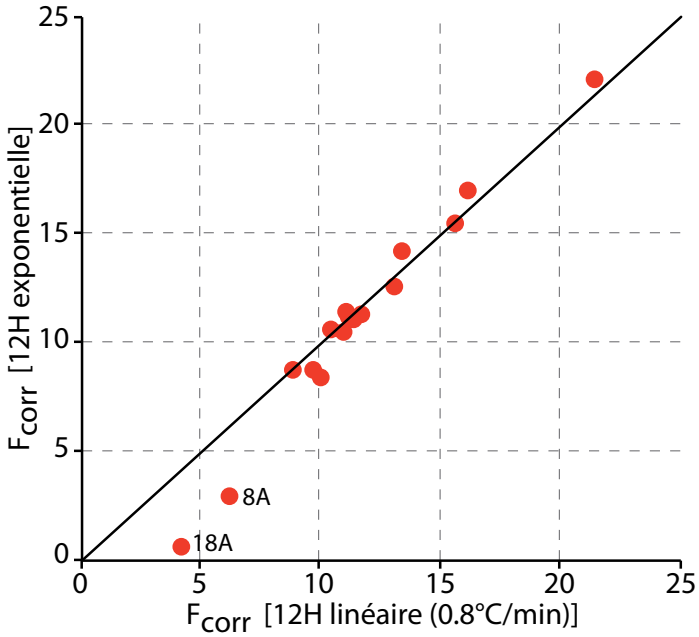


Figure 2.23 : Comparaison des facteurs de correction avec un refroidissement linéaire ou exponentiel sur 12 heures pour les 16 échantillons de briquettes du four 11369A.

Les Tableaux 2.6 et 2.7 récapitulent les résultats de la correction de vitesse de refroidissement. L'application de la vitesse de refroidissement adéquate (0,8°C/min soit environ 12 heures pour le petit four 11369A et 0,1°C/min soit environ 76 heures pour le grand four 11369B) permet d'obtenir des archéointensités moyennes très proches (à 1 ou 2% près) de la valeur attendue sur le site de Sallèles-d'Aude (43±1 µT). L'application de taux de refroidissement différents ne permet pas d'estimer aussi précisément la valeur exacte (avec une différence d'au maximum 8%), mais reste préférable dans tous les cas à l'absence de correction de vitesse de refroidissement (comme avancé par Hartmann *et al.*, 2011) : l'archéointensité moyenne seulement corrigée de l'anisotropie surestime en effet la valeur attendue de 12% pour le four 11369A et de 13% pour le four 11369B.

Plus précisément, pour les briquettes du petit four 11369A de volume 0,2 m^3, l'application d'un taux de refroidissement de 0,4°C/min, deux fois inférieur au taux de

refroidissement adapté provoque une sous-estimation de l'archéointensité de 6%. Pour des fours de cette dimension, un refroidissement sur environ 10-12 heures semble être un ordre de grandeur plus adapté que le refroidissement sur 24 heures plus couramment utilisé.

Pour les briquettes du grand four 11369B (6 m^3), un refroidissement sur une durée de cet ordre de grandeur (0,4°C/min) surestime l'archéointensité moyenne d'environ 7%. En revanche, l'archéointensité estimée avec le refroidissement lent de 0,2°C/min (38 heures environ) n'est pas significativement différente aux incertitudes près de la valeur attendue, alors que le taux de refroidissement reste deux fois supérieur au taux de refroidissement initial. Pour des fours archéologiques de grande taille, il semble ainsi nécessaire de corriger l'effet de la vitesse de refroidissement avec un refroidissement lent d'au moins 36-40 heures plutôt que 24 heures. Les résultats du four 11369B montrent aussi que le refroidissement le plus adapté n'implique pas forcément une plus faible déviation standard.

Pour le four 11369B, il faut aussi noter que l'estimation adéquate de la vitesse de refroidissement à 650°C permet d'obtenir l'intensité du champ géomagnétique sur le site (43µT) et non l'intensité mesurée dans le four à froid (46.5µT). L'anomalie créée par les parois du four ne semble donc pas être enregistrée pour l'archéointensité : une plus faible anomalie à haute température est prévisible, comme l'aimantation des parois est moindre à haute température. En revanche, l'inclinaison semble être affectée par l'anomalie, qui il est vrai la dévie de manière plus considérable que l'archéointensité (Tableau 2.2).

		à 650°C									à 385°C			à 500°C			à 580°C		
		0.8°C/min (12H lin)			12H exponentielle			0.4°C/min (23H lin)			0.8°C/min			0.8°C/min			0.8°C/min		
Echantillon	F_a (µT)	$F_{corr0.8l}$ (%)	$F_{evol0.8l}$ (%)	$F_{0.8l}$ (µT)	$F_{corr12e}$ (%)	$F_{evol12e}$ (%)	F_{12e} (µT)	$F_{corr0.4l}$ (%)	$F_{evol0.4l}$ (%)	$F_{0.4l}$ (µT)	$F_{corr0.8l}$ (%)	F_{385} (µT)	F_{650} (µT)	$F_{corr0.8l}$ (%)	F_{500} (µT)	F_{650}(µT)	$F_{corr0.8l}$ (%)	F_{580} (µT)	F_{650} (µT)
11369A-2A	48.7	13.0	-1.7	42.4	12.6	-1.4	42.6	17.6	-0.4	40.1	3.8	42.3	46.8	5.6	42.7	46.0	8.8	42.8	44.4
11369A-4A	47.1	11.0	-1.7	41.9	11.4	-1.5	41.7	15.1	0.1	40.0	4.5	41.4	45.0	2.5	43.0	45.9	4.8	43.4	44.8
11369A-6A	48.1	8.8	-1.5	43.9	8.8	-1.5	43.9	11.3	0.5	42.7	4.2	42.0	46.1	-0.3	45.1	48.2	1.2	45.7	47.5
11369A-8A	49.1	6.2	-3.7	46.1	2.9	-5.9		4.1	-7.9		2.8	45.1	47.7	3,0	46.9	47.6	5.3	46.1	46.5
11369A-10A	49.8	11.7	-1.5	44.0	11.3	-1.8	44.2	14.6	-0.6	42.6	3.9	43.0	47.9	2.2	45.1	48.7	4.7	46.7	47.5
11369A-12A	48.4	11.1	-1.4	43.0	11.2	-1.4	43.0	14.6	-0.4	41.3	4.6	41.3	46.2	3.7	43.6	46.6	6.0	44.2	45.5
11369A-14A	48.7	11.3	-1.3	43.2	11.1	-1.1	43.3	14.7	0.0	41.6	3.2	42.5	47.1	2.6	44.0	47.4	4.8	44.7	46.4
11369A-16A	47.6	9.7	-1.8	43.0	8.7	-2.6	43.5	11.7	-2.1	42.0	3.9	38.5	45.7	2.6	44.0	46.4	5.4	44.5	45.0
11369A-18A	47.7	4.1	-4.1	45.7	0.6	-6.9		0.9	-8.8		3.4	45.0	46.1	2.9	48.1	46.3	3.9	44.9	45.8
11369A-20A	49.0	21.4	-1.0	38.5	22.2	-0.2	38.1	29.2	2.5	34.7	3.2	45.3	47.4	2,0	44.7	48.0	7.2	44.5	45.5
11369A-22A	46.3	16.1	-0.3	38.8	17.0	-0.1	38.4	21.9	2.3	36.2	4.1	43.3	44.4	2.4	43.5	45.2	3.6	43.9	44.6
11369A-24A	48.5	10.9	-1.6	43.2	10.5	-1.5	43.4	14.4	0.3	41.5	5.8	39.0	45.7	2.6	43.9	47.2	4.4	45.3	46.4
11369A-28A	48.1	10.0	-1.8	43.3	8.4	-2.3	44.1	11.0	-1.5	42.8	3.7	43.2	46.3	1.4	45.4	47.4	2.7	46.5	46.8
11369A-30A	48.7	15.6	-0.6	41.1	15.5	-0.5	41.2	20.5	0.4	38.7	3.6	40.8	46.9	4.1	41.3	46.7	7.7	43.0	45.0
11369A-32A	45.7	13.4	-0.6	39.6	14.2	-0.5	39.2	18.9	0.9	37.1	6.1	40.2	42.9	2,0	41.1	44.8	7.4	40.3	42.3
11369A-34A	48.9	10.4	-0.8	43.8	10.6	-0.1	43.7	14.4	0.8	41.9	5.1	41.5	46.4	4.1	44.2	46.9	6.4	44.6	45.8
N	16			16			14			14		16	16		16	16		16	16
Moyenne (µT)	48.2			42.7			42.3			40.5		42.2	46.2		44.1	46.9		44.4	45.8
Std (µT)	1.1			2.2			2.1			2.6		2.0	1.3		1.8	1.1		1.6	1.3
$\%F_{att}$	12%			-1%			-2%			-6%		-2%	7%		3%	9%		3%	7%

Tableau 2.6 : Résultats de la correction de vitesse de refroidissement pour les briquettes du petit four 11369A

Nom de l'échantillon ; Archéointensité corrigée de l'anisotropie ; Facteurs de correction de vitesse de refroidissement estimés à 650°C pour un refroidissement linéaire sur 12h, exponentiel sur 12h et linéaire sur 24h : pour chaque expérimentation, facteur de correction, facteur d'évolution et archéointensité corrigée ; Facteurs de correction estimés à 385, 500 et 580°C avec un refroidissement lent de 0.8°C/min : pour chaque température, facteur de correction, archéointensité calculée entre 100 et 385 ou 500 ou 580°C corrigée de la vitesse de refroidissement, archéointensité calculée entre 100 et 650°C corrigée de la vitesse de refroidissement estimée à 385 ou 500 ou 580°C.

En dessous, nombre d'échantillons utilisés pour l'archéointensité moyenne ; Archéointensité moyenne corrigée de l'anisotropie et de la vitesse de refroidissement ; Déviation standard ; Variation en pourcentage de l'archéointensité moyenne par rapport à la valeur attendue au site (43µT).

		à 555°C												à 350°C			à 430°C			à 500°C		
		0.8°C/min (10H)			0.4°C/min (19H)			0.2°C/min (38H)			0.1°C/min (76H)			0.8°C/min			0.8°C/min			0.8°C/min		
Echantillon	F_a	F_{corr10}	F_{evol10}	F_{10}	F_{corr19}	F_{evol19}	F_{19}	F_{corr38}	F_{evol38}	F_{38}	F_{corr76}	F_{evol76}	F_{76}	$F_{corr0.8}$	F_{350}	F_{555}	$F_{corr0.8}$	F_{430}	F_{555}	$F_{corr0.8}$	F_{500}	F_{555}
	(µT)	(%)	(%)	(µT)	(%)	(%)	(µT)	(%)	(%)	(µT)	(%)	(%)	(µT)	(%)	(µT)	(µT)	(%)	(µT)	(µT)	(%)	(µT)	(µT)
11369B-1A	49.7	6.3	-0.2	46.6	7.2	-0.6	46.1	8.5	-0.6	45.5	8.7	-2.2	45.4	3.5	43.6	48.0	3.2	46.0	48.1	8.0	44.7	45.7
11369B-2A	49.5	5.9	0.0	46.6	5.7	-1.5	46.7	6.9	-2.6	46.1	6.7	-5	46.2	4.4	41.4	47.3	3.3	45.4	47.9	10.8	43.4	44.2
11369B-3A	47.2	-1.6	-1.0	48.0	-1.5	-1.3	47.9	-1.5	-1.7		-0.2	-4.2		0.4	42.9	47.0	2.5	43.3	46.0	2.8	44.9	45.9
11369B-5A	49.3	4.6	0.1	47.0	6.7	0.5	46.0	8.6	0.2	45.1	9.1	0.4	44.8	5.1	42.9	46.8	3.2	45.1	47.7	4.2	46.3	47.2
11369B-7A	48.9	4.8	0.0	46.6	7.7	0.6	45.1	9.2	-1.1	44.4	16.1	-0.6	41.0	5.1	42.9	46.4	4.8	43.9	46.6	4.5	45.6	46.7
11369B-9A	48.5	4.8	0.1	46.2	7.0	0.5	45.1	8.9	0.2	44.2	10.1	0.3	43.6	2.4	39.3	47.3	2.9	43.5	47.1	5.3	44.6	45.9
11369B-11A	47.3	5.7	0.2	44.6	9.3	1.4	42.9	11.6	0.6	41.8	11.5	1.2	41.9	4.7	41.3	45.1	4.1	42.1	45.4	4.3	43.9	45.3
11369B-15A	48.5	7.0	0.5	45.1	9.6	1.2	43.8	12.5	1.1	42.4	13.7	2.0	41.9	4.1	39.4	46.5	3.6	42.4	46.8	3.8	44.8	46.7
11369B-16A	46.8	4.0	0.1	44.9	4.9	-0.3	44.5	6.5	-2.8	43.8	7.2	-5.6	43.4	4.2	44.2	44.8	4.5	44.8	44.7	3.5	46.0	45.2
11369B-17A	49.4	7.1	0.1	45.9	10.1	0.7	44.4	13.3	0.8	42.8	15.3	1.7	41.8	2.8	39.3	48.0	2.9	43.2	48.0	6.0	44.7	46.4
11369B-19B	51.4	6.6	-0.4	48.0	9.3	0.3	46.6	12.1	0.5	45.2	14.0	1.0	44.2	2.8	44.3	50.0	3.3	46.0	49.7	7.3	46.4	47.6
11369B-21A	49.6	1.4	-1.2	48.9	3.7	-1.3	47.8	3.2	-1.7	48.0	4.9	-3.9	47.2	1.9	38.0	48.7	1.1	42.9	49.1	4.3	45.6	47.5
11369B-23A	48.3	3.2	-0.3	46.8	4.7	-0.2	46.0	5.9	0.2	45.5	7.7	-0.2	44.6	2.3	42.4	47.2	1.7	45.8	47.5	4.4	45.8	46.2
11369B-25A	45.2	2.5	0.3	44.1	4.4	-0.2	43.2	5.7	-2.1	42.6	5.9	-5.2	42.5	2.6	43.1	44.0	3.3	44.5	43.7	0.4	46.3	45.0
11369B-27A	49.4	6.5	-0.1	46.2	9.2	0.7	44.9	12.1	0.7	43.4	13.6	1.7	42.7	2.3	40.6	48.3	2.7	43.2	48.1	5.6	44.6	46.6
11369B-29A	49.7	4.6	-1.5	47.4	6.7	-0.6	46.4	7.8	-1.4	45.8	9.2	-1.8	45.1	2.9	46.2	48.3	2.9	45.9	48.3	6.0	45.5	46.7
11369B-30A	47.2	-2.3	-0.7	48.3	-2.1	-0.2	48.2	-2.0	-2.9		-1.7	-4.6		1.6	42.4	46.4	1.8	44.7	46.4	1.1	45.4	46.7
N	17			17			17			15			15		17	17		17	17		17	17
Moyenne (µT)	48.5			46.6			45.8			44.5			43.8		42.6	47.0		44.5	47.0		45.3	46.2
Std (µT)	1.5			1.3			1.6			1.7			1.8		2.2	1.5		1.3	1.5		0.9	0.9
$\%F_{att}$	13%			8%			7%			3%			2%		-1%	9%		3%	9%		5%	7%

Tableau 2.7 : Résultats de la correction de vitesse de refroidissement pour les briquettes du grand four 11369B

Nom de l'échantillon ; Archéointensité corrigée de l'anisotropie ; Facteurs de correction de vitesse de refroidissement estimés à 555°C pour des refroidissements lents de 0.8°C/min, 0.4°C/min, 0.2°C/min et 0.1°C/min : pour chaque taux, facteur de correction, facteur d'évolution et archéointensité corrigée ; Facteurs de correction estimés à 350, 430 et 500°C avec un refroidissement lent de 0.8°C/min : pour chaque température, facteur de correction, archéointensité calculée entre 100 et 350 ou 430 ou 500°C corrigée de la vitesse de refroidissement, archéointensité calculée entre 100 et 555°C corrigée de la vitesse de refroidissement estimée à 350 ou 430 ou 500°C.

En dessous, nombre d'échantillons utilisés pour l'archéointensité moyenne ; Archéointensité moyenne corrigée de l'anisotropie et de la vitesse de refroidissement ; Déviation standard ; Variation en pourcentage de l'archéointensité moyenne par rapport à la valeur attendue au site (43µT).

Pour conclure, les résultats des briquettes cuites dans les fours expérimentaux de Sallèles-d'Aude montrent la nécessité de corriger l'effet de la vitesse de refroidissement avec la durée adéquate, c'est-à-dire environ 12 heures pour des fours d'environ 0,2 m^3 et d'environ 3 jours (ou au minimum 36-40 heures) pour des fours d'environ 6 m^3. L'application usuelle (Gomez-Paccard *et al.*, 2008) d'un refroidissement sur 24 heures sous-estime ou surestime respectivement l'archéointensité. Cependant, la moyenne des deux archéointensités corrigées avec un refroidissement sur environ 24 heures (40,5µT pour le four 11369A et 45,8µT pour le four 11369B) est égale à 43,1 µT, la valeur attendue au site. L'analyse d'un ensemble de fours contemporains et de taille variable permet ainsi d'obtenir des valeurs vraisemblablement correctes de l'archéointensité conduisant à des courbes de variation séculaire fiables, comme celle de Gomez-Paccard *et al*. (2008) pour l'Europe occidentale. Néanmoins, l'application d'un refroidissement moyen sur 24 heures, correspondant d'ailleurs à la taille moyenne des fours archéologiques, explique probablement en partie la dispersion parfois importante entre des archéointensités supposées contemporaines.

7. Discussion

7.1 Effet de la vitesse de refroidissement et minéralogie magnétique

D'après la littérature, la variabilité des facteurs de correction de vitesse de refroidissement pourrait s'expliquer par la taille des grains ferromagnétiques. Cette comparaison ne peut être actuellement réalisée en l'absence d'informations par l'acquisition de courbes d'hystérésis par exemple. Les facteurs négatifs de vitesse de refroidissement des échantillons 11369B-3A et 11369B-30A indiqueraient la présence de grains multi-domaines. Mais, le caractère rigoureusement linéaire de leurs diagrammes ARN-ATR invalide cette hypothèse. Ces deux échantillons ont cependant des champs coercitifs rémanents plus faibles que les autres briquettes, ce qui indiquerait des grains de plus grande taille.

D'après la Figure 2.24, les facteurs de correction de vitesse de refroidissement semblent liés au champ coercitif rémanent Hcr, dont la variation dans le cas des briquettes de Sallèles-d'Aude reflète principalement la proportion de titanohématite. Les facteurs de correction les plus faibles sont obtenus pour les échantillons dominés

par la titanomagnétite (briquettes du four 11369B et briquette 8 du four 11369A), alors que les échantillons dominés par l'hématite (presque la totalité des briquettes du four 11369A) ont les facteurs de correction les plus élevés.

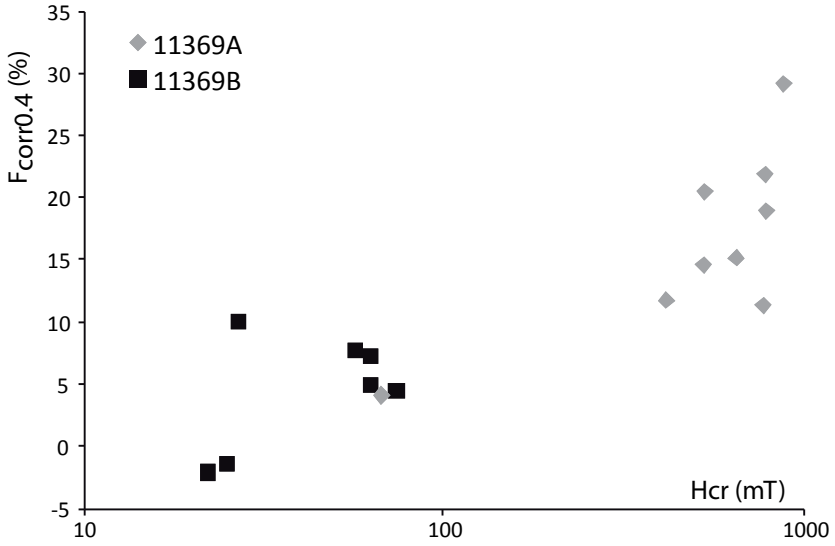


Figure 2.24 : Facteur de correction avec un refroidissement lent de 0,4°C/min en fonction du champ coercitif rémanent Hcr pour les briquettes des fours 11369A et 11369B. Dans le cas des briquettes de Sallèles-d'Aude, les variations de Hcr sont principalement liées à la proportion d'hématite.

Pour vérifier la relation entre la proportion d'hématite et l'effet du refroidissement lent, une expérimentation complémentaire a été menée avec un refroidissement lent avec un taux linéaire de 0,8°C/min entre 650 et 580°C puis un refroidissement rapide en deçà de 580°C. L'effet de refroidissement lent n'affecte donc en théorie que les grains de température de blocage supérieurs à 580°C, c'est-à-dire que les grains de titanohématite. La proportion du facteur de correction porté entre 580 et 650°C augmente en fonction de Hcr (Figure 2.25). Ceci prouve que l'aimantation thermorémanente de la titanohématite est plus sensible à l'effet de la vitesse de refroidissement que celle de la titanomagnétite.

Cette association est très peu évoquée dans la littérature : l'étude théorique de Dodson et McClelland-Brown (1980) montre une correction plus importante pour la magnétite que l'hématite. Ce résultat est incompatible avec nos résultats expérimentaux, sauf si on considère que les facteurs plus élevés pour la titanohématite s'expliquent par la taille plus fine des grains de titanohématite que de titanomagnétite dans les briquettes de Sallèles-d'Aude. Cette hypothèse ne peut être validée sans

expérimentations complémentaires sur la taille des grains. Une autre hypothèse peut être néanmoins avancée. L'augmentation exponentielle de l'aimantation spontanée Ms dans les températures inférieures de 100°C au point de Curie ou de Néel est beaucoup plus prononcée pour l'hématite que pour la magnétite (Pullaiah *et al.*, 1975). Une diminution équivalente de la température de blocage due au refroidissement lent est ainsi corrélée à une augmentation plus forte de Ms et donc de la capacité d'acquisition d'ATR (Cf. équation [5] en annexe 1) pour la titanohématite que pour la titanomagnétite.

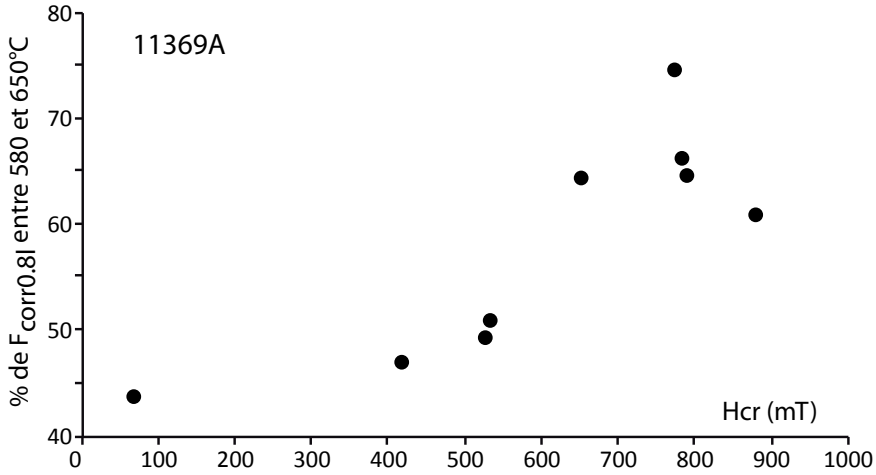


Figure 2.25 : Proportion du facteur de correction (refroidissement linéaire de 0,8°C/min) porté par les grains de température de blocage entre 580 et 650°C en fonction du champ coercitif rémanent Hcr pour les briquettes du four 11369A.

7.2 Effet de la vitesse de refroidissement en fonction de la température

Pour les briquettes du petit four 11369A, les estimations de l'effet de la vitesse de refroidissement sont beaucoup plus élevées à 650°C (Tableau 2.6 et Figure 2.26) qu'aux températures inférieures testées (c'est-à-dire qu'à 580°C et plus encore qu'à 500°C et 385°C). Cette tendance s'explique par les propriétés de l'hématite présentées dans la section précédente. Les résultats à différentes températures (350, 430, 500 et 555°C) du grand four 11369B sont plus variables (Tableau 2.7 et Figure 2.26). Les facteurs de correction sont semblables à 350 et 430°C en restant inférieurs à 5% puis augmentent généralement significativement à 500°C. A 555°C, l'effet de vitesse de refroidissement diminue pour 8 échantillons (1A, 2A, 3A, 19B, 21A, 23A, 29A et 30A), reste stable pour 4échantillons (5A, 7A, 9A et 16A) ou augmente pour 5 échantillons (11A, 15A, 17A, 25A

et 27A). La diminution de l'effet de vitesse de refroidissement à 555°C, à proximité du point de Curie, rejoint peut-être les observations de Yu (2011) sur des magnétites. Pour les autres échantillons, la diminution liée à la magnétite pourrait être compensée par l'effet de la titanohématite, ce qui expliquerait la stabilité ou l'augmentation de l'effet de la vitesse de refroidissement observées. Les analyses de minéralogie magnétique ne mettent cependant pas clairement en évidence une plus forte proportion de titanohématite dans les échantillons concernés.

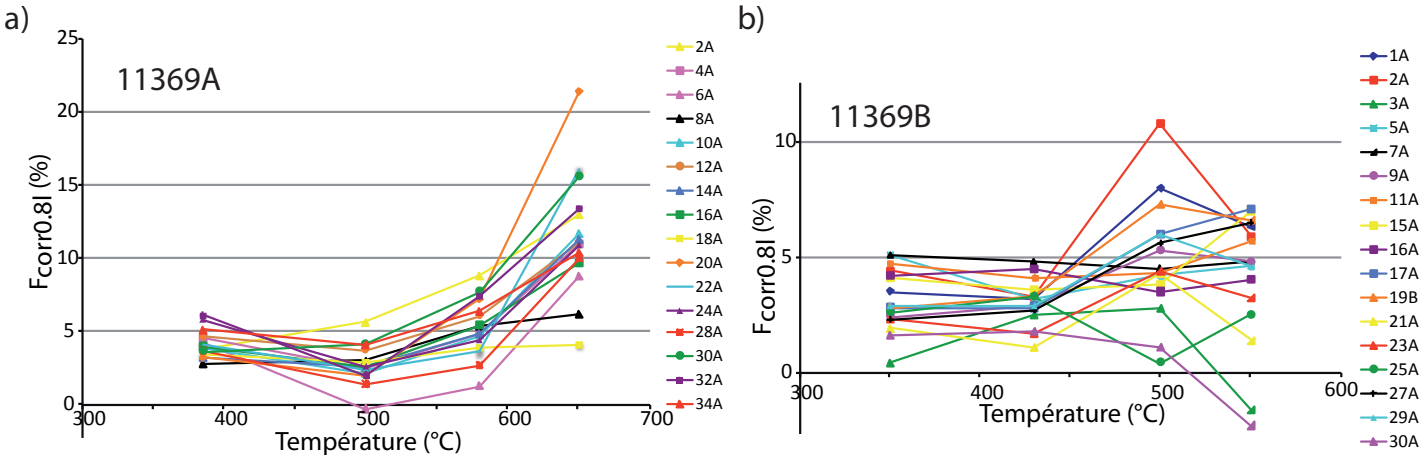


Figure 2.26 : Variation du facteur de correction de la vitesse de refroidissement (Refroidissement linéaire de 0.8°C/min) en fonction de la température.

Comme l'illustrent les exemples des briquettes de Sallèles-d'Aude, l'interprétation de la variation de l'effet de la vitesse de refroidissement en fonction de la température dans les céramiques archéologiques s'avère complexe en raison de l'hétérogénéité de leur minéralogie ferromagnétique. Plusieurs paramètres entrent probablement en considération, comme la proximité du point de Curie, la variation de l'aimantation spontanée Ms, la présence de titanohématite ou encore la taille des grains. Les résultats de Sallèles-d'Aude montrent cependant que l'effet de la vitesse de refroidissement a globalement tendance à augmenter avec la température (sauf à proximité immédiate du point de Curie), ce qui confirme les observations de Le Goff et Gallet (2004) réalisées sur le magnétomètre Triaxe.

7.3 Conséquences sur le protocole d'archéointensité

Cette variation de l'effet de la vitesse de refroidissement en fonction de la température a des conséquences importantes sur le protocole de Thellier-Thellier. Premièrement, l'augmentation de l'effet de vitesse de refroidissement à haute température explique la forme légèrement concave des diagrammes ARN-ATR (Figure 2.18b et d) des briquettes du four 11369A et des cinq briquettes du four 11369B précédemment citées.

En second lieu, du fait de cette variation en fonction de la température, la température de la correction de vitesse de refroidissement doit être adaptée aux températures de déblocage. Lorsque les archéointensités sont calculées sur l'ensemble de la gamme de température (de 100 à 650°C pour le four 11369A et de 100 à 555°C pour le four 11369B), l'application d'une correction de vitesse de refroidissement estimée à une température inférieure ne permet pas d'obtenir l'intensité exacte du champ magnétique terrestre ambiant sur le site (43µT) : des surestimations de 7 à 9% sont obtenues (Tableaux 2.6 et 2.7). Pour obtenir la valeur exacte aux incertitudes près, il faut estimer l'effet de la vitesse de refroidissement à la température maximale de l'intervalle de température sur lequel est estimée l'archéointensité (Tableau 2.6, pour le petit four 11369A). Pour le grand four 11369B, l'archéointensité moyenne surestime légèrement la valeur au site.

Plusieurs recommandations sur l'application de la vitesse de refroidissement au cours des protocoles de double chauffe peuvent ainsi être déduites des résultats des analyses sur les briquettes de Sallèles-d'Aude :

- Le taux de refroidissement lent doit approcher au mieux le refroidissement initial. L'application d'une diminution linéaire et non exponentielle de la température ne semble pas avoir d'influence sur l'estimation de l'archéointensité.
- L'effet de vitesse de refroidissement doit être si possible estimé au dernier palier de température, sur lequel est calculée l'archéointensité. En d'autres termes, la correction de vitesse de refroidissement doit être adaptée aux températures de déblocage sur lesquelles est estimée l'archéointensité, comme le conseillait déjà Leonhardt *et al.* (2006). Cette recommandation est compatible avec le protocole suivi à Rennes (Gomez-Paccard *et al.* 2006c et 2008 ; chapitre 9), où la correction

de vitesse de refroidissement est pratiquée lorsqu'il ne reste que 10 à 15% de l'ARN initiale.

- Contrairement à l'inclinaison, l'archéointensité des briquettes, au moins lorsqu'elle est estimée sur l'ensemble du spectre de températures de déblocage, n'enregistre pas l'anomalie locale du champ magnétique créée par les parois du four.

En ce qui concerne les protocoles par des mesures de l'aimantation à haute température (magnétomètre Triaxe), il a été prouvé que les archéointensités prennent en compte l'effet de la vitesse de refroidissement (Gallet et Le Goff, 2004). Ce résultat semble principalement s'expliquer par le fait qu'elles sont estimées à des températures faibles en général entre 150-200°C et 450-500°C (Gallet et Le Goff, 2006 ; Genevey *et al.*, 2009 ; Hartmann *et al.*, 2011), jusqu'auxquelles le facteur de correction de la vitesse de refroidissement reste à des valeurs inférieures à 5% (Figure 2.26).

Conclusion

Les résultats des analyses sur ces briquettes expérimentales cuites dans deux fours de taille différente de Sallèles-d'Aude apportent de nouveaux éléments de discussion sur la vitesse de refroidissement. Cette étude montre la fiabilité des protocoles usuels d'archéointensité avec correction d'anisotropie et de vitesse de refroidissement. L'application de cette deuxième correction s'avère indispensable. Les valeurs les plus proches de la valeur attendue sont obtenues lorsque le taux de refroidissement est semblable au taux initial. Pour des fours de petite taille (autour de 0,2m^3), comme le four 11369A, un refroidissement sur 12 heures semble adapté, alors que des refroidissements sur 2 à 3 jours sont nécessaires pour des fours de grande taille comme le four 11369B (6m^3). L'application d'un refroidissement moyen sur 24 heures semble cependant un compromis assez acceptable. S'il sous-estime ou surestime individuellement l'archéointensité moyenne de chaque structure, on peut penser que pour une époque donnée cela ne se traduit pas par une mauvaise évaluation de l'archéointensité moyenne, lorsque plusieurs structures contemporaines et de taille variable sont étudiées.

L'étude montre aussi que l'effet de la vitesse de refroidissement dépend de la nature des grains ferromagnétiques, en plus de leur taille. Des taux de correction plus élevés sont obtenus pour la titanohématite en comparaison avec la titanomagnétite, probablement en raison de la variation plus importante de l'aimantation à saturation Ms. Cette différence entre des grains qui ont généralement des températures de déblocage différentes se manifeste par une forme légèrement concave des diagrammes ARN-ATR. Si l'effet de de la vitesse de refroidissement n'est pas pris en compte ou si le refroidissement initial n'est pas connu, les matériaux archéomagnétiques pauvres en titanohématite semblent donner des estimations d'archéointensité plus fiables que ceux riches en titanohématite.

Chapitre 7

Construction des courbes de référence

Ce chapitre présente les différentes méthodes de construction des courbes locales de variation séculaire. La construction de ces courbes repose sur le fait qu'en un lieu, un instant t est caractérisé par une valeur de déclinaison, d'inclinaison et d'intensité aux erreurs analytiques près. Mais, la nature des données archéomagnétiques soulève plusieurs difficultés :

- Contrairement aux mesures historiques et d'observatoire du champ magnétique terrestre, les données archéomagnétiques sont entachées, en plus de l'erreur analytique, d'une erreur sur le temps, qu'il est nécessaire de prendre en compte lors de la construction de la courbe. De plus, il faut ajouter la possibilité d'une erreur systématique (Cf. chapitre 4).
- Les données archéomagnétiques sont irrégulièrement réparties dans le temps.

Plusieurs méthodes de construction des courbes locales de variation séculaire ont été développées pour prendre (plus ou moins) en compte ces difficultés propres aux données archéomagnétiques.

1. Estimation ponctuelle du champ géomagnétique : méthode de la moyenne mobile à fenêtre de largeur variable

La construction des courbes de variation séculaire par moyenne mobile est l'approche la plus couramment utilisée. Les courbes par moyenne mobile sont soit des courbes univariées de l'inclinaison, de la déclinaison et de l'archéointensité, soit des courbes bivariées de la direction du champ géomagnétique. La méthode par moyenne mobile repose sur l'estimation d'une moyenne Y_i (inclinaison ou déclinaison ou intensité) et de son erreur σ_i pour un ensemble de points Y_{ij} pondérés d'un facteur W_{ij} et appartenant à un intervalle de temps appelé « fenêtre ». L'estimation est réalisée à différents instants, séparés par un pas de temps régulier, entre lesquels la courbe de variation séculaire est tracée par interpolation. La construction d'une courbe par moyenne mobile est donc une estimation ponctuelle du champ géomagnétique.

1.1 Pondération des données et différentes méthodes de calcul

Plusieurs méthodes de calcul ont été développées pour les courbes univariées (Sternberg, 1989 ; Batt, 1997 ; Kovacheva et Toshkov, 1994) et les courbes bivariées (Le Goff, 1992 ; Lanos *et al.*, 2005). Ces méthodes diffèrent par la pondération des données de référence. Pour toutes les méthodes, chaque donnée Y_{ij} est pondérée par la proportion P_{ij} de son intervalle de date contenu dans la largeur de la fenêtre (Sternberg, 1989). Pour les statistiques univariées, le facteur de pondération W_{ij} prend aussi en compte l'incertitude analytique des données de référence avec l'estimation non biaisée du facteur de concentration de la statistique de Fisher (Fisher, 1953) κ^*_{ij} (Sternberg, 1989), l'inverse du carré de l'α_{95ij} (Kovacheva et Toshkov, 1994) ou l'inverse de l'α_{95ij} (Batt, 1997). Dans le cas de la statistique bivariée de Le Goff, 1992 (voir aussi Le Goff *et al.*, 1990 ; Daly et Le Goff, 1996), qui est une extension de la statistique de Fisher (Fisher, 1953), la direction moyenne Y_i de chaque fenêtre avec son ellipse de confiance à 95% est déterminée avec les données seulement pondérées par la proportion P_{ij}.

Les quatre méthodes précédemment évoquées se basent sur un traitement stratifié des différentes erreurs expérimentales intervenant lors de l'acquisition des données (listées dans Lanos *et al.*, 2005). La statistique de Lanos *et al.* (2005) se différencie par un traitement hiérarchique de l'ensemble de ces erreurs. Cette approche

permet en effet d'estimer la dispersion σ_i entre les données Y_{ij}, qui reflète la variation séculaire pendant l'intervalle de temps correspondant à la fenêtre mais aussi la variation de la qualité des données et les éventuelles erreurs systématiques. Ces erreurs systématiques ont pour origines possibles une anomalie locale du champ magnétique terrestre, un mouvement post-cuisson de la structure, une datation archéologique mal estimée et une mauvaise estimation de la direction ou de l'intensité par l'absence de prise en compte de l'anisotropie ou de la vitesse de refroidissement. Concrètement, le facteur de pondération W_{ij} affecté à chaque donnée tient compte de l'écart-type σ_i entre les m_i structures en plus de l'écart-type de chaque structure σ_{ij} (σ_F pour l'archéointensité et α_{95} pour l'archéodirection avec r_{ij} le nombre d'échantillons) et de la proportion de l'intervalle de date contenu dans la fenêtre P_{ij} :

$$W_{ij} = \frac{P_{ij}}{\sigma_i^2 + \frac{\sigma_{ij}^2}{r_{ij}}} \qquad [2.3]$$

L'estimateur S_i de l'écart-type σ_i est calculé par la méthode de la bissection appliquée à l'équation (m_i étant le nombre de structures dans la fenêtre) :

$$\frac{\hat{1}}{W_i} = \frac{\hat{1}}{\sum_{j=1}^{m_i} W_{ij}} = \frac{S_i^{2*}}{m_i} \qquad [2.4]$$

Les principaux intérêts de cette approche hiérarchique bayésienne sont ainsi une meilleure gestion des directions hors-tendance et de la variabilité de la qualité des données selon les fenêtres.

1.2 Choix de la largeur de la fenêtre mobile

La difficulté des méthodes de construction des courbes par moyenne mobile réside dans le choix de la largeur de la fenêtre et du pas entre les centres des fenêtres. Ces paramètres sont définis en fonction du nombre de données par intervalle de temps : ils doivent être suffisamment larges pour prendre en compte un nombre de données minimal et pour limiter le bruit entre les données, mais aussi suffisamment restreints pour obtenir une courbe avec la meilleure résolution possible. La largeur de la fenêtre est souvent définie par compromis entre la densité des données pendant les périodes

très documentées et pendant les périodes peu documentées. Pour essayer de pallier la forte hétérogénéité de la densité et les possibles lacunes de données à certaines périodes, Le Goff *et al.* (2002) proposent une méthode à moyenne mobile avec des fenêtres de largeur variable selon le nombre de données. Le choix des paramètres de cette méthode reste cependant assez arbitraire, comme l'atteste la diversité du nombre minimal de données par fenêtre (2,5 pour Le Goff *et al.*, 2002 ; 3 pour Hagstrum et Blinman, 2010 ; 5 pour Lengyel, 2010 par exemple).

2. Estimation fonctionnelle du champ géomagnétique

La répartition temporelle irrégulière des données et l'absence de prise en compte de la distribution des erreurs de datation limitent ainsi l'efficacité des méthodes d'estimation ponctuelle du champ géomagnétique. Les méthodes d'estimation fonctionnelle par maximum de vraisemblance récemment développées (Lanos, 2004 et 2009 ; Thébault et Gallet, 2010) constituent des alternatives plus adaptées à ces caractéristiques intrinsèques aux jeux de données de référence.

Pour les deux méthodes, la courbe de référence, notée g, est une fonction spline cubique pénalisée, qui s'adapte à la variation de la densité des données. Comme la courbe est construite de telle sorte que le retrait d'une donnée la modifie le moins possible, les données hors-tendance peuvent être identifiées. Le coefficient de lissage α des courbes de référence définit l'équilibre entre l'ajustement aux données et le lissage de la courbe g tel que sa courbure soit continue quelque soit le temps t. Les mesures d'observatoire sur les derniers siècles (Alexandrescu *et al.*, 1996 pour la France), donnent des informations sur le lissage en mettant en évidence une variation « lisse » du champ géomagnétique à l'échelle de la décennie. Pour les deux méthodes (Lanos, 2004 et 2009 ; Thébault et Gallet, 2010), l'ajustement de la courbe aux données est défini aux moindres carrés en supposant que les données suivent une loi d'échantillonnage gaussienne.

L'approche *bootstrap* de Thébault et Gallet (2010) et l'approche hiérarchique bayésienne (Lanos, 2004 et 2009) se distinguent par le calcul des splines et la prise en compte ou non des informations archéologiques *a priori* sur la datation et sur les relations stratigraphiques entre les structures de référence.

2.1 Construction des courbes par *bootstrap* (Thébault et Gallet, 2010)

Le lissage de la courbe est exprimé par des B-splines cubiques dont les nœuds sont régulièrement espacés dans le temps. L'approche utilisée (aussi mise en œuvre par Korte *et al.* 2009a pour les modèles globaux CALS3k et ARCH3k du champ géomagnétique) est basée sur un algorithme en *bootstrap* pour étudier la variabilité de la courbe moyenne : à chaque itération du *bootstrap*, une donnée, sélectionnée au hasard, est enlevée pour tester son influence sur la courbe (technique du *jackknife*). Cette méthode permet de diminuer l'influence des données hors-tendance, ce qui aboutit à une meilleure définition de la courbe et de son incertitude tout en évitant de faire des suppositions *a priori* sur la fonction de densité de la probabilité. Contrairement à la méthode hiérarchique bayésienne, cette méthode teste la possible influence d'une erreur de datation mais ne la prend pas formellement en compte.

2.2 Construction des courbes par la statistique hiérarchique bayésienne (Lanos, 2004 et 2009)

La méthode repose sur l'inversion bayésienne, dont le principe est de construire une courbe de référence à partir d'informations *a priori,* en obtenant aussi des informations *a posteriori* sur les variables utilisées. En d'autres termes, le théorème de Bayes suit :

Densité jointe = Loi d'observation . Densité *a priori* = Densité *a posteriori* . Marginale

En définissant n observations Y associées à un temps t et de distribution marginale p(Y) et en notant g la courbe de référence g et σ_g^2 la variance globale de la courbe, cette équation s'écrit :

$$p(Y, g, \sigma_g^2, t) = p(Y \mid g, \sigma_g^2, t) \cdot p(g \mid \sigma_g^2, t) \cdot p(\sigma_g^2 \mid t) \cdot p(t) = p(g \mid Y, \sigma_g^2, t) \cdot p(\sigma_g^2, t \mid Y) \cdot p(Y) \quad [2.5]$$

La loi d'observation $p(Y \mid g, \sigma_g^2, t)$ est une loi normale utilisant un traitement hiérarchique des erreurs (Lanos *et al.*, 2005 et section 1.1). Pour la direction du champ magnétique, les observations Y suivent une distribution de Fisher approchée localement par une distribution normale bivariée (Love et Constable, 2003). La loi d'observation est égale à :

$$p(Y \mid g, \sigma_g^2, t) = \prod_{i=1}^{n} \left[\frac{1}{\sigma_{gi}\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2} \sum_{i=1}^{n} \frac{(Y_i - g(t_i))}{\sigma_{gi}} \right) \right] \quad [2.6]$$

La densité *a priori* $p(g \mid \sigma_g^2, t).p(\sigma_g^2 \mid t).p(t)$ est constituée des probabilités *a priori* de la courbure de la courbe, de la variance globale de la courbe et du temps. La probabilité *a priori* de la courbure de la courbe est égale à :

$$p(g \mid \sigma_g^2, t) = c \,.\, \exp\left[-\frac{\alpha}{2} \int_a^b |\nabla^2 g(t)^2| dt \right] \quad [2.7]$$

Cette formule montre que la courbe est définie par une dérivée seconde continue. Le coefficient de lissage α de la courbe de référence g est défini, par équilibre entre l'ajustement aux données et le lissage de la fonction g (pour éliminer les variations trop rapides liées aux erreurs sur les données de référence), entre 0 (la courbe passe par tous les points) et ∞ (la fonction de lissage est une droite de régression linéaire). Le choix de α est déterminé par une minimisation du risque quadratique par la méthode de la « validation croisée généralisée » (Wahba, 1990 ; Green et Silverman, 1994).

La probabilité *a priori* de la variance globale de la courbe $p(\sigma_g^2 \mid t)$ est supposée uniforme dans l'intervalle $[0, \nu]$ (ν étant un nombre réel défini) ou suit la loi de Jeffreys $[p(\sigma_g^2 \mid t) \propto 1/\sigma_g^2]$.

La probabilité *a priori* du temps p(t) est le produit des densités des datations *a priori* de chacune des structures de référence :

$$p(t) = 1_S(t) \,.\, \prod_q \frac{1_{[t_{iTAQ} - t_{iTPQ}]}}{(t_{iTAQ} - t_{iTPQ})} \,.\, \prod_r p(t \mid M, g_M) \quad [2.8]$$

Dans le cas des données de référence datées par la chronotypologie des mobiliers et la dendrochronologie (au nombre de q), la densité de probabilité est uniforme entre le *Terminus Post Quem* (*TPQ*) et le *Terminus Ante Quem* (*TAQ*). Dans le cas d'un calage chronologique par le radiocarbone (r données), la densité de probabilité $p(t \mid M, g_M)$, complexe, est donnée par la calibration des âges radiocarbone moyens M avec la courbe de calibration dendrochronologique g_M. La fonction indicatrice $1_S(t)$ prend en compte les relations stratigraphiques éventuelles entre les structures (Cf. chapitre 4) : $1_S(t)$ est égal à 1 si les contraintes stratigraphiques sont respectées et est nulle dans le cas contraire.

Ainsi, l'estimation de la courbe par l'approche bayésienne permet au temps de se déplacer dans l'intervalle de date du point de référence et n'est plus contraint par son centre, contrairement à la méthode par moyenne mobile. De plus, la datation est incluse dans un « fait » (Cf. chapitre 4), qui donne au temps la possibilité de sortir des bornes de cet intervalle, pour tenir compte des erreurs systématiques.

Le calcul est réalisé de manière itérative par les méthodes de Monte-Carlo utilisant les chaînes de Markov avec les algorithmes de Gibbs et de Metropolis-Hastings. La courbe de calibration moyenne *a posteriori*, dont la distribution de probabilité est $p(g \mid Y, \sigma_g^2, t)$ (Cf. équation [2.5]), est une fonction spline cubique pénalisée. Dans le cas de la direction du champ géomagnétique, la courbe est une spline sphérique (Jupp et Kent, 1987). L'incertitude à 95% de la courbe est estimée par la probabilité *a posteriori* de la variance globale $p(\sigma_g^2 \mid Y)$. La vraie courbe g de variation séculaire du champ géomagnétique se trouve au sein de cette l'enveloppe d'incertitude à 95%, tracée par une spline cubique d'interpolation.

Conclusion

La méthode hiérarchique bayésienne permet d'obtenir des courbes de variation séculaire plus fiables et plus réalistes vis-à-vis des variations « lisses » du champ géomagnétique. Contrairement aux méthodes par moyenne mobile, elle tient compte de la répartition temporelle irrégulière des données de référence, comme d'ailleurs la méthode de Thébault et Gallet (2010). Par rapport à cette dernière, elle présente l'avantage de prendre en compte, en plus de l'erreur analytique, de l'erreur sur le temps (représentée de manière probabiliste) et des contraintes stratigraphiques. La méthode a déjà été appliquée à plusieurs courbes de variation séculaire, des courbes univariées de l'archéointensité (Gomez-Paccard *et al.*, 2008), des courbes bivariées de la direction (Gomez-Paccard *et al.*, 2006a ; Zananiri *et al.*, 2007 ; Tema *et al.*, 2006 ; Schnepp et Lanos, 2005 ; Schnepp *et al.*, 2006) et des courbes du vecteur total (traitant simultanément I, D et F avec le temps) dans le cas des foyers de boulanger de Lübeck (Schnepp *et al.*, 2009).

Dans le cadre de cette étude, il a été décidé de construire une courbe bivariée de la direction combinée à une courbe univariée de l'archéointensité (une approche aussi

testée pour Lübeck) plutôt qu'une courbe du vecteur total. Plusieurs raisons ont motivé ce choix. En premier lieu, le plus grand nombre de données d'archéodirections disponibles en Europe occidentale permet de construire une courbe de référence jusqu'en 1500 av. J.-C. et sur une aire géographique réduite à 1000km autour de Paris. Le nombre d'archéointensités de référence est limitée au premier millénaire av. J.-C. et pour l'augmenter, la prise en compte des données fiables du sud de l'Italie (Hill *et al.*, 2008 ; Gallet *et al.*, 2009) semblent indispensables. Deuxièmement, la courbe du vecteur total semble pleinement justifiée si la quasi-totalité des données de référence fournit une archéodirection et une archéointensité du champ géomagnétique. Or, les problèmes méthodologiques au cours du protocole d'archéointensité (chapitre 5) montrent que toutes les structures en place ne s'y prêtent pas. A l'inverse, de nombreuses archéointensités datées du premier millénaire av. J.-C. en Europe occidentale sont acquises sur des matériaux déplacés (Hill *et al.*, 2008 ; Gallet *et al.*, 2009 ; Burakov *et al.*, 2006 ; Nachasova et Burakov, 2009 ; Hedley et Wagner, 1991).

Troisième partie :

Implications géomagnétiques et archéologiques

Le protocole de datation et d'analyse présenté dans les chapitres 4 et 5 a été appliqué aux structures prélevées. Cette troisième et dernière partie présente deux articles de synthèse (à soumettre) sur les analyses et les nouvelles courbes de variation séculaire. Le chapitre 8, intitulé **Variation séculaire de la direction du champ géomagnétique en Europe Occidentale durant les 1500 dernières années av. J.-C.**, concerne les archéodirections. Ce chapitre est formé d'un article 'Improvements of the Western Europe directional secular variation curve during the last 1500 years BC'. Les résultats d'archéointensité sont présentés dans le chapitre 9, intitulé **Variation séculaire de l'intensité du champ géomagnétique en Europe Occidentale au le premier millénaire av. J.-C.** et constitué de l'article 'New archaeointensity data from France and variation of the geomagnetic dipole during the first millennium BC'.

Ces deux articles synthétisent les analyses de minéralogie magnétique, les désaimantations thermique et par champ alternatif et les analyses d'archéointensité par le protocole de Thellier-Thellier (Cf. chapitre 5). Les 39 nouvelles archéodirections et 18 nouvelles archéointensités sont ensuite comparées aux données précédemment publiées en Europe Occidentale. A partir des ensembles de données sélectionnées et pondérées, de nouvelles courbes de variation séculaire du champ magnétique sont proposées. La variation séculaire au premier millénaire av. J.-C. est forte particulièrement pour la déclinaison et l'intensité. Les nouvelles courbes sont aussi comparées aux modèles géomagnétiques globaux (Korte *et al.*, 2009) et régionaux (Pavon-Carrasco *et al.*, 2009). Enfin, les deux articles tentent d'interpréter cette forte variation séculaire en Europe occidentale en comparant le nouveau jeu de données aux données existantes dans les autres régions du globe

Le dernier chapitre (chapitre 10) intitulé **La datation archéomagnétique au premier millénaire av. J.-C. en Europe Occidentale : avancées et perspectives** teste le potentiel de datation de ces nouvelles courbes de variation séculaire.

NB : Les récentes transformations du logiciel Rencurve, menées dans le but de prendre en compte les erreurs (inconnues) sur les datations ainsi que les densités de date *a priori* fournies aussi bien par le radiocarbone calibré que par l'archéologie, ont été validées dans le cas bayésien univarié (inclinaison, déclinaison et intensité). Malheureusement, au moment du bouclage de ce mémoire, ces transformations n'ont pas pu être complètement validées au niveau des traitements bayésiens sphériques et

vectoriels. Aussi, la courbe bivariée présentée dans les chapitres 8 et 9 est construite par la méthode de la moyenne mobile avec une largeur de fenêtre de 160 ans et un pas de 50 ans (Le Goff, 1990 ; Le Goff *et al.*, 1992). Par souci de cohérence, la courbe univariée de variation séculaire de l'intensité présentée dans le chapitre 9, est également construite par moyenne mobile. S'agissant de la datation archéomagnétique, les courbes par moyenne mobile restent cependant moins fiables que les courbes bayésiennes (Cf. Chapitre 7). Il nous a semblé préférable de tester le potentiel de datation dans le chapitre 10 à partir des courbes bayésiennes univariées que nous avons pu calculer pour l'inclinaison et la déclinaison, afin d'apporter de premiers éléments de discussion. Les comparaisons avec le bayésien sphérique et vectoriel pourront être présentées lors de la soutenance de thèse.

Chapitre 8

Variation séculaire de la direction du champ géomagnétique en Europe Occidentale durant les 1500 dernières années av. J.-C.

Article : Improvements of the Western Europe directional secular variation curve during the last 1500 years BC

(à soumettre)

Gwenaël Hervé, Philippe Lanos, Annick Chauvin

Abstract

To improve the geomagnetic field secular variation curve of Western Europe during protohistoric times, archaeomagnetic directions of thirty-nine archaeological kilns or hearths from France were investigated. The dating of each archaeological structure was established with archaeological or chronometric methods. Thirty-seven of these structures are dated from the first millennium BC, one from the end of the second millennium BC and the last one from the fourth millennium BC. Thermomagnetic curves, unblocking temperatures and coercivities suggest that the main carrier of the remanent magnetization is a Ti-poor titanomagnetite. Archaeodirections were obtained by alternating field and thermal demagnetizations. The anisotropy tensor of thermoremanent magnetization was determined for thirty-five structures and twenty-two mean archaeodirections were corrected for anisotropy. The new archaeodirections

are very coherent with previously published data from France and neighbouring countries (United Kingdom, Germany, Switzerland, Austria, Italy and Spain). A new secular variation curve was built using bivariate statistics with selected Western Europe data located within 1000 km from Paris. Selecting criteria include the number of samples, the dating reliability and the accuracy of the mean archaeodirection. Resulting secular variation between the last 1500 years BC relies mainly on large changes in declination, while inclination is bracketed between 65 and 75°. Declination presents a strong maximum with values of 30-35° around 800-750BC, followed by a sharp decrease to values around 0° reached at 500BC. A slight declination minimum is also present around 250BC. The secular variation appears to be dominated by a dominant westward drift during the last 1500 years BC with two major changes around 800 and 250BC. Compared to the global and regional geomagnetic models, the new reference data are better fitted by ARCH3k_cst.1 and SCHA.DIF.3k than by ARCH3k.1 and CALS3k.4 models. The strong variation of the archaeodirection during the first half of the first millennium BC makes archaeomagnetism very useful for dating purposes. The major directional major changes correspond to lower latitudes (around 65-70° at 800BC) of the Virtual Geomagnetic Pole (VGP), which also occurs in others data sets. The present scarcity of data around the globe during the first millennium BC prohibits explaining these events by a strongly tilted dipole or by an eccentric dipole.

1. Introduction

The past secular variation of the direction of the Earth's magnetic field is known by direct measurements during the last four centuries (Jonkers *et al.*, 2003). Beyond this limit, the secular variation is deduced from volcanic lava flows (for example Tanguy *et al.*, 2003; Genevey *et al.,* 2002) and archaeological burnt structures (as kilns or hearths), that acquired during their last heating a thermoremanent magnetization (TRM) parallel and proportionnal to the ambiant Earth's magnetic field. In small geographical areas, secular variation curves (SVC) are built using bivariate (Le Goff, 1990) or bayesian (Lanos, 2004; Lanos *et al.*, 2005) statistic. These SVC allow the characterization of the secular variation of the geomagnetic field in the past and if they are sufficiently accurate can be used for archaeomagnetic dating purposes (Le Goff *et al.,* 2002; Lanos, 2004).

Data are also used to compute global (Korte *et al.*, 2009; Korte and Constable, 2011) and regional (Pavon-Carrasco *et al.*, 2009) geomagnetic models.

In Europe, the most used material for the last millennia are archaeological structures because they are well dated. To build a SVC, data are relocated to a common place following the assumption that the geomagnetic field is described by a tilted dipole (Noël and Batt, 1990). Due to the non-dipolar component of the geomagnetic field, this assumption leads to relocation errors (Casas & Incoronato, 2007) and the SVC is valid in limited geographical areas (maximum 1000 km radius). The SVC are usually built for each country as France, United Kingdom (Zananiri *et al.*, 2007), Italy (Tema *et al.,* 2006; Evans and Hoye, 2005), Germany (Schnepp and Lanos, 2005), Austria (Schnepp and Lanos, 2006), Spain (Gomez-Paccard *et al.*, 2006), Hungary (Marton, 2009 and 2010), Bulgaria (Kovacheva *et al*., 2009a) and the Balkan peninsula (Tema & Kondopoulou, 2011). Most of these SVC were recently improved during the AARCH programm (Archaeomagnetic Applications for the Rescue of Cultural Heritage, 2002-2006).

In France, the directional SV curves, reduced to Paris, were first established by Thellier (1981) and completed by Bucur (1994) for the last two millenia, using 120 inclination and declination data (106 in France, 8 in Western Germany and 5 in Belgium). Thirteen new French data (Moutmir, 1995 and Gallet *et al.* 2002) together with England, Southern Italy and Tunisia data allowed the extension of the curve in the first millenium BC (Gallet *et al.* 2002). But there is still a lack of French data during this period with 2.6 mean directions per century compared to 5.7 during the last two millennia. New data are consequently needed to fill this gap and to build a more reliable curve. The SVC from the neighbouring countries (see references above for Italy, Germany and Spain), recently improved also present a lack of data during the protohistoric periods. Published data are more numerous in United Kingdom (Zananiri *et al.*, 2007), but are unfortunately too noisy to reveal with a sufficient resolution the variation of the direction of the geomagnetic field. During the first millennium BC, these preliminary curves show a very strong variation of the direction of the geomagnetic field in Western Europe, especially for the declination. The building of more precise SVC during the protohistoric periods will provide archaeomagnetism as a very useful dating tool and allows better constraint for geomagnetic global models.

This study presents 38 new French archeodirections dated from the end of the second millennium BC and from the first millennium BC (that is respectively the Final Bronze Age and the Iron Age in France). A new data from the fourth millennium BC (Neolithic period) was also acquired. Our new data confirm and refine the strong variation of the direction of the geomagnetic field during the first millennium BC. A new Western Europe directional SVC covering the last 1500 years BC was built. This curve is compared to global and regional geomagnetic models. Finally, this paper discusses the possible explanations of the secular variation during this period.

2. Location and dating of new archaeomagnetic data

The location of the 22 archaeological sites which provide the 39 new structures is indicated in Figure 1 and Table 1. The sites are quite uniformly distributed over France and were mainly discovered during rescue excavations. Most of the structures (28) are kilns : pottery kilns, amphorae kilns, baking kilns or salt-kilns (Fig. 2a). Most kilns are circular with a diameter varying from 1.0 to 4.4 meters. Salt-kilns from Northern France (62799A-B-C, 62382A-B-C-D-E, 80635A) have an elongated-shape and are from 1.4 to 5.5 meters long. Results from the horseshoe shaped salt-kilns from Moyenvic (MOA-MOB-MOC) have already been published in Hervé *et al.* (2011). The other structures are domestic and artisan hearths (Fig. 2b), which are open structures usually made by a plate of baked clay. The plates are usually almost circular and have diameters from 0.3 to 1.6 meters. Furnaces and iron-working hearths were not collected because the Earth's magnetic field might be locally deflected by strongly magnetic objects (iron slags for example) during the last cooling of the structure (Abrahamsen, 2003). The archaeological context of archaeological structures is detailed in the supplementary materials together with the dating of structures.

The dating of the last cooling of each structure was determined by the analysis of all the chronological information available, that is archaeological methods (i.e. the stratigraphy and the chrono-typology of the archaeological artefacts) and chronometric methods (radiocarbon and dendrochronology). Nineteen structures were dated by archaeological constraints (Tab. 1). The stratigraphy and the statistical analysis of ceramics included in anterior, contemporaneous and posterior layers to the burnt sampled structure allow to

propose a *Terminus Post Quem* (*TPQ*, date after which the structure was in use) and a *Terminus Ante Quem* (*TAQ*, date before which the structure was in use) for their last cooling. For these archaeological sites, the number of sherds was sufficiently high (many hundreds) to provide reliable dating. Note also that these sites are either dated from the second or the first centuries BC, or located in southern France: for these centuries and this geographical area, the abundance of well-dated sherds (particularly imported ceramics from the Italian peninsula) allows a better control of the archaeological dating of the burnt structure.

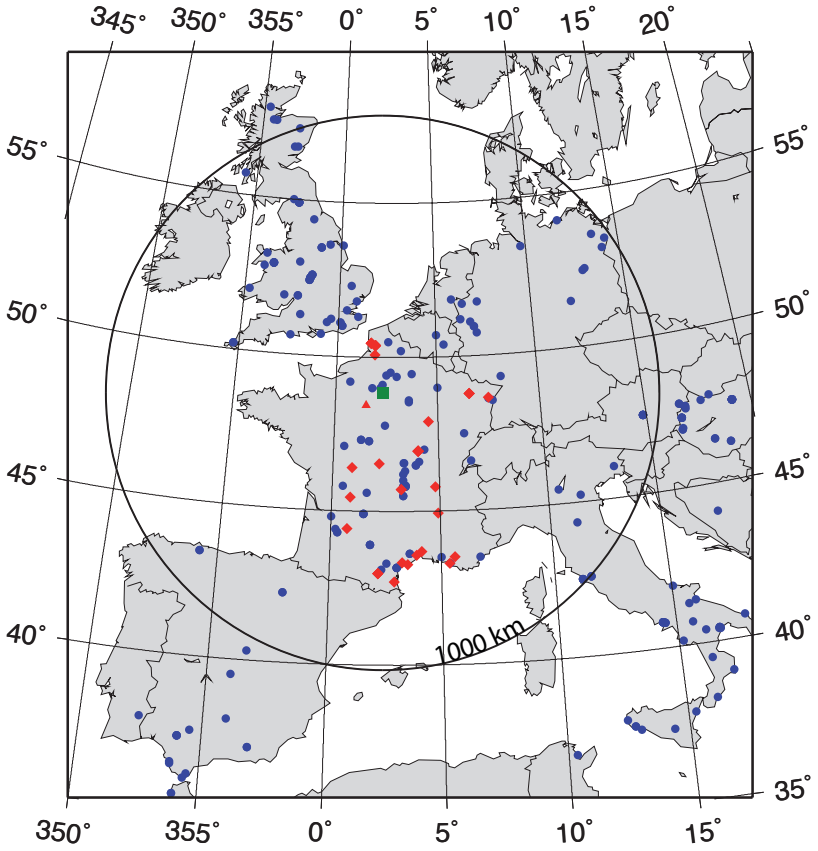


Figure 1: Location of new reference directional data (red diamonds for sites dated between 1500BC and 200AD and red triangle for Neolithic 28085F structure). Blue circles are previously published directional data dated between 1500BC and 200AD respecting defined selection criteria (see text). All data included in the area of 1000km radius around Paris (green square) are used for the building of the new Western Europe secular variation curve.

Thirteen other structures were dated by radiocarbon analysis carried out on small charcoals collected in the filling of the kiln or the surface of the hearth. The *TPQ* and the *TAQ* are defined at 95 per cent confidence interval after calibration of the radiocarbon ages with the INTCAL04 curve (Reimer *et al.*, 2004). During the Early Iron Age (between 800 and 450 BC) and the beginning of the Late Iron Age (between 400 and 200 BC), the calibrated date intervals are large due to the plateau effects in the dendrochronological calibration curve (Reimer *et al.*, 2004). For 58128E and 58128F structures, the date intervals given by radiocarbon was reduced by fixing the *TAQ* with two very characteristic sherds of *terra sigillata* found in a ditch posterior to the use of the hearths.

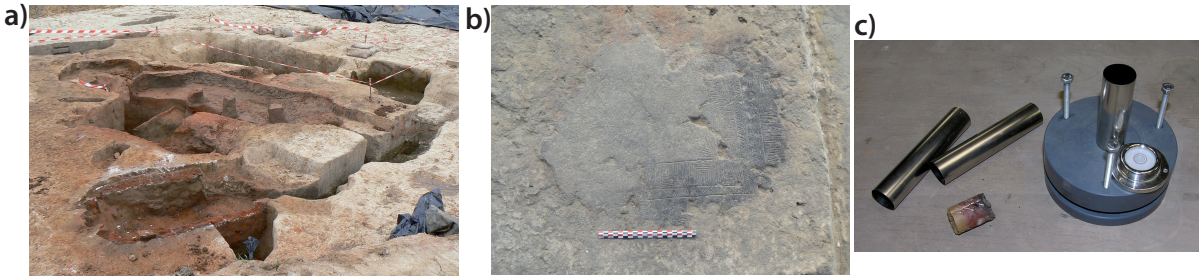


Figure 2: Examples of sampled structures, a) 5 salt-kilns of Gouy-Saint-André-le-Rossignol (62382A/B/C/D/E) and b) domestic hearth of Lattes-Saint-Sauveur (34129A). c) Sampling technique used for the hearth 24453A inspired from the soft core technique of Schnepp et al. (2008)

Finally, five structures were dated by dendrochronology. In Sorrus-la-Pâture-à-Vaches and Sorrus-la-Bruyère (62799A-B1-B2 and 62799C), analyzed woods come from wells, neighbouring the salt-kilns and associated to the production of salt. For the structure 58128D, dendrochronology on preserved wood from the walls of the house provides the *TPQ* for the use of the hearth, while the *TAQ* is given by the ceramics found in the demolition layers of the house.

Stratigraphic constraints, that is a relative chronology, were established between some structures. 58128F structure is younger than 58128E structure and 62799B2 than 62799B1. The five salt-kilns of Gouy-Saint-André are linked by the stratigraphy with from the oldest to the youngest 62382B, 62382A, 62382D and 62382E. 62382C is also younger than 62382A.

3. Methodology

3.1 Sampling

All except one structure was sampled with the plaster cap method. Between four (but generally at least twelve) and twenty-seven large blocks were collected per structure. They were levelled horizontal using a bubble and oriented using a magnetic compass and for thirty-one structures also with a sun compass. The double orientation allows to compute the local magnetic declination and to control the absence of a magnetic anomaly.

The sampling method for the 24453A hearth « la grotte des Fraux », located in a cave, was inspired by the soft core technique of Schnepp *et al.* (2008). The preservation in this particular archaeological context requires the use of a non-destructive sampling method. The soft core technique was suited to this fine-grained baked clay without mineral inclusions. The baked clay was cored by stainless steel tubes of 2.5 cm diameter, put vertically through a PVC frame levelled horizontally using a bubble (Fig. 2c). The sixteen cores were oriented to the North geographic using a theodolite.

All blocks except those from 13055K and 34003A kilns were brittle and were consolidated using sodium silicate (« waterglass ») in the laboratory. It was then possible to cut them into cubic specimens of 8 cm^3. Kostadinova *et al.* (2004) showed that such consolidation does not change the remanence of the baked clay and its behaviour during heating experiments.

3.2 Magnetic measurements

Measurements were performed in the paleomagnetic and archaeomagnetic laboratory of Rennes (France). Remanent magnetizations were measured with a 2G cryogenic or with a Molspin spinner magnetometer. A Bartington MS2 susceptibility meter was used for low-field magnetic susceptibility measurements and thermomagnetic curves were performed on 157 small chips from 23 structures in air using a KLY3 susceptibility meter with fitted furnace. 57 isothermal remanent magnetization (IRM) acquisition were performed using an ASC impulse magnetizer, in order to investigate further the ferromagnetic mineralogy.

Stepwise thermal demagnetizations were performed with a MMTD oven for one specimen per sample of all structures (660 specimens) using 8 to 15 temperature steps. Low-field susceptibility was measured after each heating step in order to monitor mineralogical changes. For 17 structures (238 specimens), stepwise alternating field (AF) demagnetizations were carried out using a Schonstedt demagnetizer or a 2G-AF demagnetizer in line with the 2G cryogenic magnetometer, using 5 to 15 steps up to 100 or 150 mT. For specimens from four structures (34032A, 34145A, 34003A, 67282A) with very stable natural remanent magnetization (NRM), directions of magnetization were determined, besides thermal and AF demagnetizations, with the classical Thellier-Thellier palaeointensity method (Thellier and Thellier, 1959) with pTRM checks.

The TRM anisotropy tensor was determined on all structures except 24453A, MOA, MOB and MOC. Following Chauvin *et al.* (2000), a TRM was acquired in six directions corresponding to the +x, -x, +y, -y, +z and –z axis of each specimen, once the NRM had been demagnetized to 80% of its initial value. A thermal stability check was performed to monitor mineralogical alteration occuring during the six successive heating steps.

4. Results

4.1 Rock magnetism

NRM intensity of all samples is plotted versus low-field susceptibility in Figure 3a together with lines of increasing Koenigsberger ratio (Q defined as the ratio of NRM to the induced magnetization, a field of 80 A/m was used). NRM intensity varies between 0.01 et 15 A/m and low-field susceptibility between 10^{-4} and almost 10^{-1} SI. Koenigsberger ratios are between 0.5 and 20. Samples from hearths tend to have lower values than samples from kilns, which are usually heated at higher temperatures.

No	Site	Structure	Lat (°N)	Long (°E)	t_{mean}	*TPQ*	*TAQ*	Meth.	Treat.	PCA/GCA	ATRM	N/n	D_s (°)	I_s (°)	k	α_{95} (°)	D_P (°)	I_P (°)	Lat_{VGP} (°N)	$Long_{VGP}$ (°E)
28085F	Chartres / Beaulieu	Kiln	48.436	1.509	-3731	-3804	-3658	^{14}C	Th	PCA	Not nec.	16/17	9.1	57.7	1604	0.9	9.3	58.1	78.0	145.2
24453A	St Martin de Fressengeas / Grotte des Fraux / FY8	Hearth	45.447	0.854	-1160	-1300	-1020	^{14}C	Th	PCA+GCA(4)	Not ver.	15/15	-8.3	65.6	287	2.3	-9.0	68.0	83.8	296.1
MOB*	Moyenvic / les Crôleurs / FR2086	Salt kiln	48.780	6.570	-672	-801	-543	^{14}C	AF/Th	PCA	Not ver.	22/34	30.9	73.6	538	1.3	31.7	72.7	69.2	53.9
MOC*	Moyenvic / les Crôleurs / FR3074	Salt kiln	48.780	6.570	-663	-809	-517	^{14}C	AF/Th	PCA	Not ver.	12/18	21.8	71.6	307	2.5	22.5	70.9	74.8	58.4
66136E	Perpignan / Ruscino / FY5106	Hearth	42.699	2.896	-612.5	-640	-585	Arch.	Th	PCA	Yes	12/12	5.9	67	289	2.6	6.9	71.2	81.3	34.2
MOA*	Moyenvic / les Crôleurs / FR1003	Salt kiln	48.780	6.570	-585	-761	-409	^{14}C	AF/Th	PCA	Not ver.	20/27	18.6	66.6	92	3.4	18.4	66.0	77.8	87.9
21711A	Vix / Sondage Mont-Lassois Est 2009	Kiln	47.911	4.533	-571	-749	-393	^{14}C	AF/Th	PCA	Not nec.	14/29	0.5	65.8	791	1.4	0.9	66.8	89.1	47.6
69123L	Lyon / Vaise, 4-6 rue du Mont d'Or / FY63	Hearth	45.780	4.810	-450	-500	-400	Arch.	AF/Th	PCA+GCA(1)	Yes	20/37	-2.9	66.8	683	1.3	-2.8	68.7	85.8	337.2
34032A	Béziers / ZAC de la Domitienne / FR1009	Pottery kiln	43.330	3.250	-437.5	-525	-350	Arch.	AF/Th/PI	PCA	Yes	11/35	-1.3	64.7	1386	1.2	-1.4	68.7	86.6	347.7
13055K	Marseille / 9 rue Leca / FR1	Amphorae kiln	43.500	5.620	-435	-470	-400	Arch.	AF/Th	PCA	Yes	15/19	1.3	68.7	1679	0.9	2.4	72.2	81.5	10.9
62382D	Gouy Saint André / le Rossignol / FR60	Salt kiln	50.375	1.920	-305	-400	-210	^{14}C	Th	PCA	Yes	18/18	-5.4	66.3	81	3.9	-5.2	65.1	86.1	248.7
34145A	Lunel / Mas de Fourques / FR2110	Pottery kiln	43.691	4.135	-293.5	-386	-201	^{14}C	AF/Th/PI	PCA	Yes	23/38	-2.9	64.9	1943	0.7	-3.1	68.7	86.3	331.7
62382E	Gouy Saint André / le Rossignol / FR22	Salt kiln	50.375	1.920	-290	-390	-190	^{14}C	Th	PCA	Yes	21/21	-1.3	72.6	187	2.3	-1.2	71.6	82.4	357.1
62382A	Gouy Saint André / le Rossignol / FR23	Salt kiln	50.375	1.920	-285	-390	-180	^{14}C	Th	PCA	Yes	18/18	-9.3	67.5	211	2.4	-9.0	66.4	84.1	275.4
13055L	Marseille / place Villeneuve Bargemon	Hearth	43.297	5.369	-281	-368	-194	^{14}C	Th	PCA+GCA(8)	Yes	14/21	-5.8	65.6	196	2.9	-6.1	69.7	84.0	325.3
34129A	Lattes / Saint Sauveur / FY4567	Hearth	43.565	3.907	-275	-300	-250	Arch.	AF/Th	PCA	Not nec.	16/31	-2.9	67.7	1711	0.9	-2.9	71.3	82.7	349.4
62799B1	Sorrus / la Bruyère, zone 3 / FR2B	Salt kiln	50.450	1.700	-236	-292	-180	DC	AF/Th	PCA	Not nec.	6/8	1.2	69.9	193	4.8	-0.5	69.5	85.6	358.7
62799B2	Sorrus / la Bruyère, zone 3 / FR2C	Salt kiln	50.450	1.700	-236	-292	-180	DC	AF/Th	PCA	Not nec.	7/10	-23.4	73.2	435	2.9	-20.1	72.4	75.2	316.0
62382C	Gouy Saint André / le Rossignol / FR24	Salt kiln	50.375	1.920	-235	-370	-100	^{14}C	Th	PCA+GCA(2)	Yes	14/15	-8.3	68.8	250	2.5	-8.0	67.7	84.5	294.5
62799C	Sorrus / la Pâture à vaches / FR2	Salt kiln	50.450	1.700	-225	-250	-200	DC	AF/Th	PCA	Not nec.	13/25	-1.1	69.3	902	1.4	-1.1	68.3	87.3	347.5
62382B	Gouy Saint André / le Rossignol / FR78	Salt kiln	50.375	1.920	-225	-360	-90	^{14}C	Th	PCA	Not nec.	12/12	-4.72	69.7	405	2.2	-3.5	69.4	85.3	335.5
62799A	Sorrus / la Bruyère, zone 3 / FR1	Salt kiln	50.450	1.700	-165	-190	-140	DC	AF/Th	PCA+GCA(1)	Yes	14/24	-0.2	69.4	330	2.2	-0.2	68.3	87.4	359.1
34003A	Agde / Saint Michel / FR2	Amphorae kiln	43.267	3.500	-115	-140	-90	Arch.	AF/Th/PI	PCA	Yes	18/35	3.6	66.4	705	1.3	4.3	70.2	83.9	26.7
47323A	Villeneuve sur Lot / la Dardenne-Haut / FR3186	Pottery kiln	44.418	0.733	-100	-125	-75	Arch.	AF/Th	PCA	Yes	27/42	-0.8	63.2	1018	0.9	-0.9	66.6	89.4	297.9
11045A	Bouriège / devant la ville / FR1	Pottery kiln	42.980	2.170	-100	-150	-50	Arch.	Th	PCA	Yes	6/10	-2.3	67.3	602	2.7	-2.7	71.3	82.7	350.3
11045B	Bouriège / devant la ville / FR6	Pottery kiln	42.980	2.170	-100	-150	-50	Arch.	Th	PCA	Not nec.	11/14	-1.8	64.1	837	1.6	-1.2	68	86.9	338.7
11045C	Bouriège / devant la ville / FR7	Pottery kiln	42.980	2.170	-100	-150	-50	Arch.	Th	PCA	Yes	9/11	-6.8	66.1	667	2.0	-7.7	70.2	82.8	323.4
80635A	Pont-Rémy / Fond de Baraquin / FR227	Salt kiln	50.080	1.914	-90	-150	-30	Arch.	Th	PCA	Yes	9/9	-5.3	66.1	543	2.2	-5.1	65.1	86.2	248.7
58128C	Mont-Beuvray / la Pâture du Couvent / FY9534	Hearth	46.950	4.020	-75	-100	-50	Arch.	Th	PCA	Yes	16/16	7.8	67.2	198	2.6	8.2	68.4	84.0	61.1
58128E	Mont-Beuvray / la Côme Chaudron / FY3292	Hearth	46.950	4.020	-65	-120	-10	^{14}C. Arch.	Th	PCA+GCA(2)	Not nec.	23/30	-3.9	65.3	275	1.8	-3.4	66.7	87.7	283.0
58128F	Mont-Beuvray / la Côme Chaudron / FY3290	Hearth	46.950	4.020	-65	-120	-10	^{14}C. Arch.	Th	PCA+GCA(2)	Not nec.	13/15	2.3	65.3	265	2.7	2.3	66.7	89.1	346.2
58128G	Mont-Beuvray / la Côme Chaudron / FY3160	Hearth	46.950	4.020	-50	-90	-10	Arch.	Th	PCA	Not nec.	12/12	6.9	65.1	245	2.8	8.6	65.9	84.3	95.7
86165A	Montmorillon / Rocade Est, zone 2 / FR2008	Pottery kiln	46.410	0.892	-50	-100	0	Arch.	Th	PCA	Yes	24/32	-2.2	65.3	382	1.5	-2.4	67.1	88.2	303.6
67282A	Marlenheim / Maison Apprederis / FR70	Pottery kiln	48.620	7.500	-45	-60	-30	Arch.	Th/PI	PCA	Yes	19/28	-4	69.6	1782	0.8	-3.3	69.9	84.6	341.1
58128D	Mont-Beuvray / la Côme Chaudron / FY1977	Hearth	46.950	4.020	-43	-66	-20	DC, Arch.	Th	PCA	Not nec.	15/15	4.4	66.3	250	2.4	4.8	68.4	85.9	48.6
63069A	Le Cendre / Gondole / PT1209	Hearth	45.716	3.203	-40	-60	-20	Arch.	Th	PCA+GCA(1)	Yes	9/10	-3.7	65.1	255	3.3	-3.9	67.5	87.1	303.5
63069B	Le Cendre / Gondole / FR36	Pottery kiln	45.716	3.203	-40	-60	-20	Arch.	Th	PCA	Yes	4/12	1.3	64.6	1782	2.2	1.4	66.9	88.8	52.5
26362A	Valence / Angle rue d'Arménie-rue Bouffier / FR40	Baking kiln	44.934	4.895	-40	-50	-30	Arch.	Th	PCA	Not nec.	19/19	-0.7	66.7	2098	0.7	1.2	69.5	85.6	11.8
18057A	Chateaumeillant / le Paradis, zone B / FR172	Pottery kiln	46.930	2.317	37.5	25	50	Arch.	AF/Th	PCA	Yes	11/11	0.4	64.8	782	1.6	0.4	66.3	89.7	127.3

Table 1: Description and archaeodirection results of new French reference sites.

Columns from left to right

No, structure number; Site, name of the archaeological site; Structure, kind of structure; Lat and Long, site latitude and longitude; t_{mean}, mean age of the structure in years AD; TPQ, minimum age of the structure in years AD; TAQ, maximum age of the structure in years AD; Meth., method of dating (Arch.: archaeological methods as stratigraphy and typology; ^{14}C: calibrated AMS radiocarbon; DC: dendrochronology); Treat., laboratory treatment (AF: alternating field demagnetization; Th.: thermal demagnetization; PI: Thellier-Thellier paleointensity experiments); PCA/GCA, direction of Thermal Remanent Magnetization is determined by Principal Component Analysis (PCA) or by a remagnetization circle (GCA); ATRM, the effect of anisotropy of Thermal Remanent Magnetization is taken account (yes), verified but not necessary (Not nec.) or not verified (Not ver.); N/n, number of independently samples taken account in the calculation of the mean sample direction/number of sub-samples taken into account in the calculation of the mean sample direction; D_s and I_s, mean declination and inclination in situ; k and a_{95}, précision parameter and 95 per cent confidence limit of mean direction of magnetization (Fisher, 1953); D_P and I_P, mean declination and inclination relocated to Paris; Lat_{VGP} and $Long_{VGP}$, Latitude and Longitude of the Virtual Geomagnetic Pole

** Already published in Hervé et al., 2011*

The unblocking temperatures are quite different between samples, as the Median Demagnetizing Temperatures (MDT) varies between 150 and 650°C (Fig. 3b). Median Demagnetizing Fields (MDF) between 10 and 30 mT (Fig. 3c) suggest that the main carrier of the remanent magnetization is a low-coercivity magnetic phase close to magnetite composition. The IRM acquisition curve of most samples (Fig. 4) saturates (or almost saturates) at low fields around 200mT indicating the absence (or the low proportion) of a high coercivity ferromagnetic phase. Conversely, such phase appears for some samples from the 9 salt-kilns from Northern France (62799A-B1-B2-C, 62382A-B-C-E and 80635A), as shown by high MDF (from 50 to more than 150mT) and IRM acquisition curves (Fig. 4). This phase is probably hematite, because the unblocking temperatures of those samples reached 670°C.

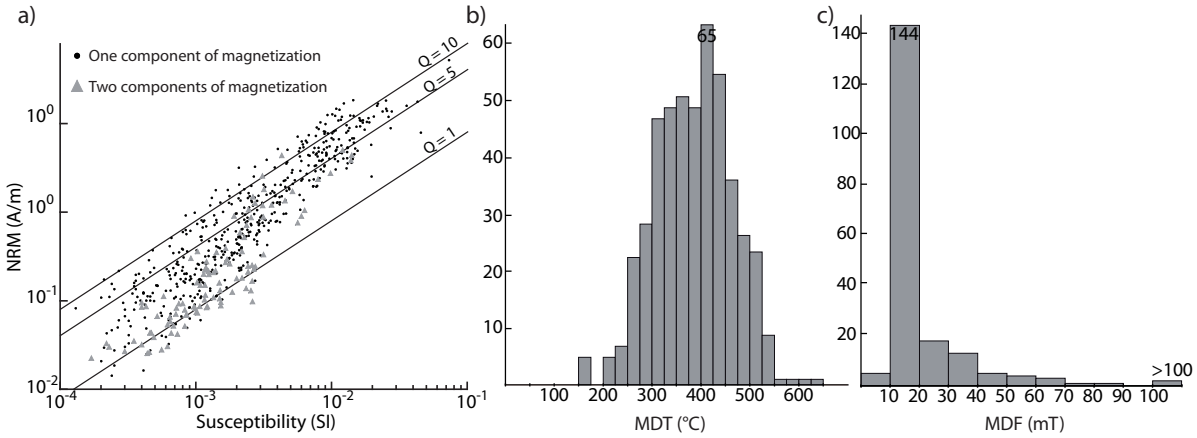


Figure 3: (a) NRM intensity (A/m) versus bulk susceptibility (SI) for samples of all studied structures. Koenigsberger ratio isolines are shown. b) Distribution of the Median destructive temperatures (MDT). (c) Median destructive fields obtained from alternating field demagnetizations.

The predominance of Ti-poor titanomagnetite is confirmed by thermomagnetic curves, as 85 per cent of studied samples have a Curie point close to 580-585°C (Fig. 5). For 60% of the samples, the Hopkinson peak (Fig. 5d and to lesser extent Fig. 5c) indicates that this magnetic phase is the only one. Eighteen (5%) of samples have Curie point higher than 585°C up to 625°C (Fig. 5a), which might indicate the presence of partially oxidized (titano)magnetite or (titano)maghemite. A clear indication of the presence of hematite was not encountered in the thermomagnetic curves, even for salt-kilns mentioned above. For 30% of samples, thermomagnetic curves demonstrate, besides Ti-poor (titano)magnetite, the presence of magnetic phases with a Curie-point around 350-

450°C and around 150-200°C (Fig. 5b and 5e). As curves are often not reversible for this last phase (Fig. 5b), it is not the high-coercivity-thermally-stable-low-unblocking-temperature (HCSLT) phase defined by McIntosh *et al* (2007 and 2011), but more probably goethite.

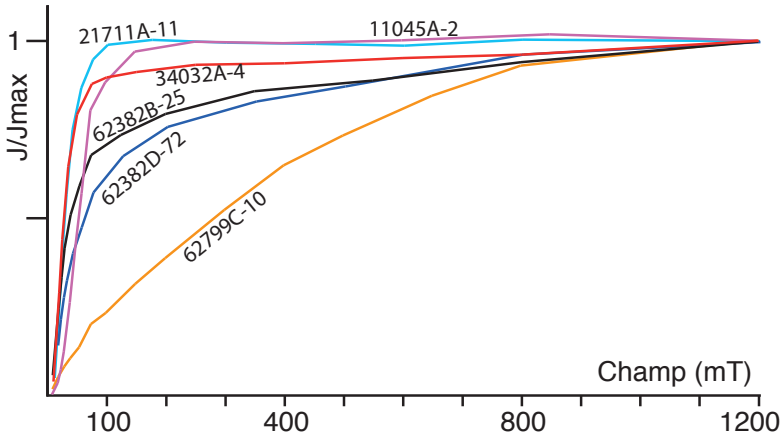


Figure 4: Representative normalized acquisition curves of isothermal remanent magnetization.

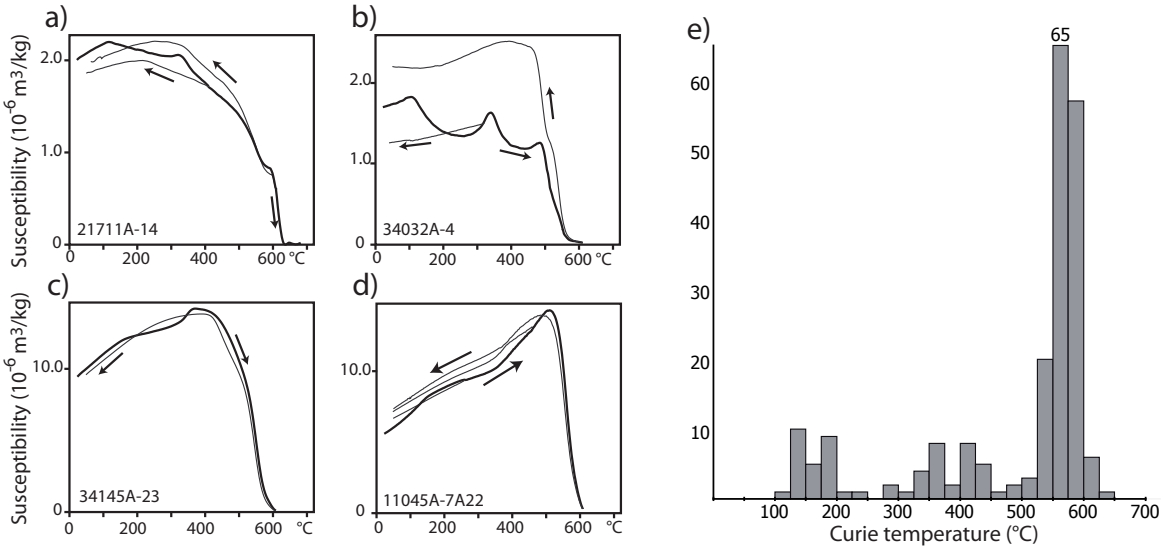


Figure 5: (a)-(d) Examples of thermomagnetic curves. (e) Distribution of Curie temperatures calculated from all thermomagnetic curves.

4.2 Direction of magnetization

NRM demagnetizations were analyzed using orthogonal plots and stereographic plots (Fig. 6). Archeodirection results for MOA, MOB and MOC structures are presented in Hervé *et al.* (2011). For many specimens of the 38 structures, a small component of

magnetization, interpreted as a viscous overprint, was removed between 100 and 200°C heating steps or after AF steps at 5 mT. 85% of specimens exhibited a single stable component of magnetization (Fig. 6a and b). Characteristic directions were calculated using principal component analysis (PCA, Kirschvink, 1980). Two components of magnetization were observed for specimens from 23 structures (Fig. 6c and d). The temperature during the past heatings was not sufficiently high to erase all the previously acquired magnetization, as shown by the generally lower Koenigsberger ratio than those of specimens with one component of magnetization (Fig. 3a). The component of magnetization acquired during the last heating of the burnt structure is the low-temperature component, that was generally better isolated by thermal than alternating field demagnetization. When this component was well-defined and linear (which is the case for 83% of two-component specimens), the remanence direction was determined using PCA (Fig. 6c). The high-temperature component of magnetization is generally very small. Stronger high-temperature components are explained by the inclusion of a ceramic or amphora sherd in the baked clay (as for specimen 63069A-3A, Fig. 6c). For 21 specimens from 8 structures (see Tab. 1), the direction of magnetization was deduced by great-circle analysis (GCA) of the stereographic plot of the NRM vector (Fig. 6d), as linear segments of the low-temperature component could not be easily defined.

4.3 TRM anisotropy

The effect upon archaeodirection of the anisotropy of thermoremanent magnetization (ATRM) was determined for all demagnetized specimens from 35 structures. The archaeodirection was corrected individually for each specimen, if the alteration during the anisotropy protocol does not exceed 10%. The degree of ATRM (the ratio of maximum and minimum axes of the TRM anisotropy tensor K_{max}/K_{min}) is usually lower than 12% at the sample level and lower than 5% at the structure level (as observed by Spassov *et al.*, 2008; Kovacheva *et al.*, 2009b for kilns and hearths). The mean archeodirection was corrected (Fig. 7a) if the precision parameter k (Fisher, 1953) increases with the anisotropy correction. The increase can reach 25%, even if the anisotropy rate is low, which demonstrates the necessity of the ATRM correction. The decrease of k with the ATRM correction mainly occurs for structures with very low (lower than 2-3%) anisotropy rate and is probably explained by experimental errors in

determination of anisotropy tensor and/or alteration. Despite a decrease of k, ATRM correction was applied for 63069A structure because its mean anisotropy rate is high (9.5%) because of the inclusion of amphora sherds in the baked clay.

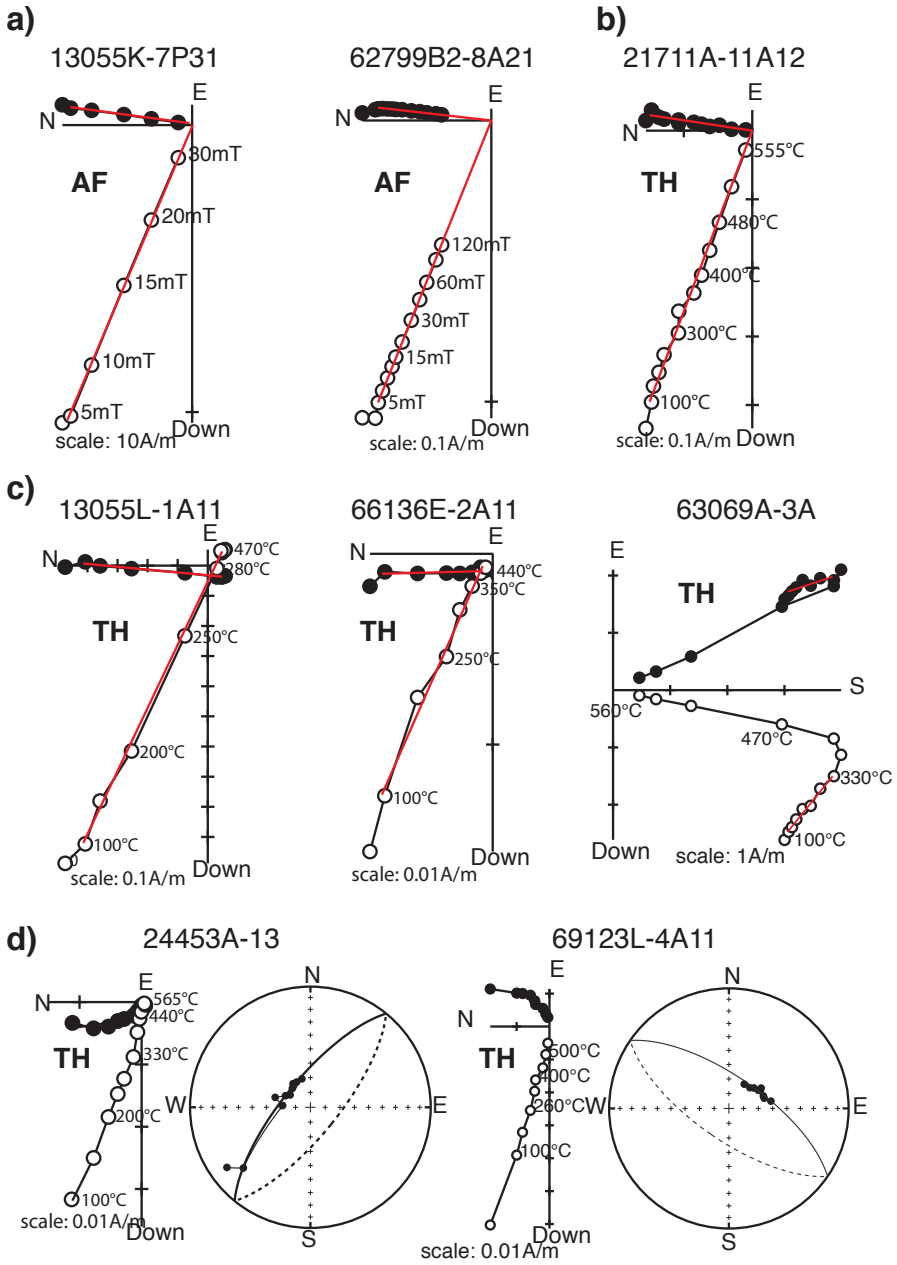


Figure 6: Representative plots for AF (a) and thermal (b, c and d) demagnetizations. (a) and (b), orthogonal plots of specimens with a single component of magnetization. (c) orthogonal plots of specimens with two components of magnetization. (d) orthogonal plots and stereographic projections of specimens with a more complex NRM behaviour (see text for explanation). Directions in orthogonal plots are in situ coordinates. Open (solid) circles are projections upon vertical (horizontal) planes. On the stereographic projections, the great circles used to calculate the direction are indicated.

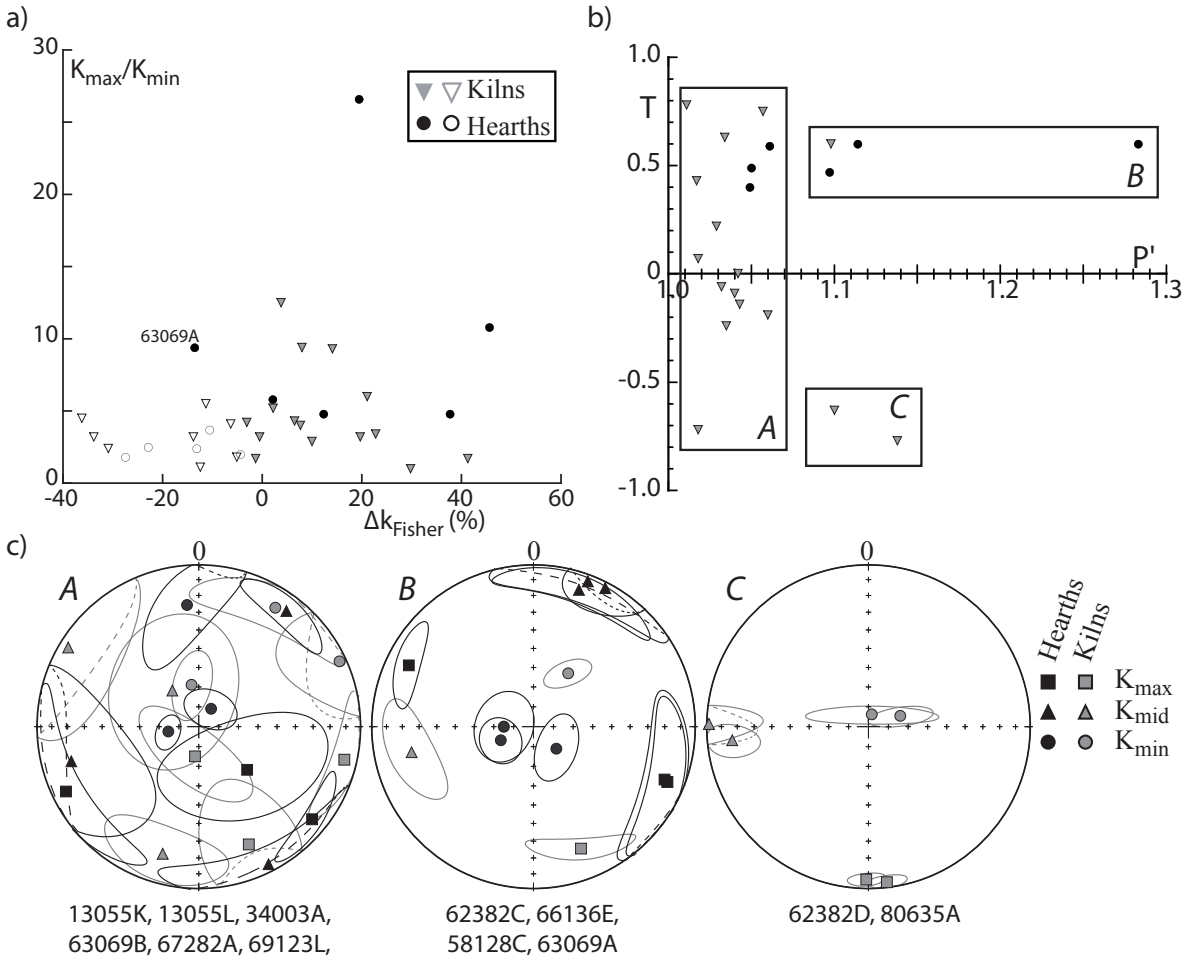


Figure 7: Anisotropy of thermoremanent magnetization (ATRM) properties of new French data. (a) Anisotropy rate (K_{max}/K_{min}) compared to the variation of the precision parameter k (Fisher, 1953) with application of the ATRM correction. (Open) Closed symbols indicate the structures (not) corrected from ATRM effect. (b) T-P' diagramm of mean anisotropy tensor (only for structures corrected from anisotropy effects). Group A corresponds to structures with low anisotropy, group B to structures with high anisotropy characterized by an oblate tensor and group C to structures with high anisotropy characterized by a prolate tensor. (c) Stereographic plot of mean TRM anisotropy directions per each group of structures. Data are in sample coordinates. However, following the sampling method, the Z axis of the specimen corresponds to the vertical at the site.

The ATRM degree of the 22 structures corrected from anisotropy effects and the directions of the principal axis of their ATRM tensor are showed in Figures 7b and 7c. The anisotropy tensor is more homogeneous between samples for hearths than for kilns. The anisotropy of the hearths is dominated by the magnetic foliation (K_{mid}/K_{min}) rather

than the magnetic lineation (K_{max}/K_{mid}) (Fig. 7b). The structures are separated in three groups : group A gathers slightly anisotropic structures with an anisotropy rate lower than 6%. The directions of the principal axis of group A are randomly distributed (Fig. 7c). The two groups of more anisotropic structures are defined by the shape of their ATRM tensor, oblate for group B and prolate for group C. The structures belonging to both groups have direction of the minimal axis k_{min} of the ATRM tensor close to the vertical axis (Fig. 7c): this hard-axis of magnetization results probably from a compaction of the clay during the building of the structure. For structures of group B, the anisotropy correction increases the mean inclination by 4°, whereas the effect for the group C mainly affects the mean declination.

4.4 New mean archaeodirections

The mean archaeodirections of the 39 archaeomagnetic structures (Table 1) were computed following a hierarchical structure: the structure-mean is the mean of direction of the independently oriented blocks that is in many cases the mean direction of two or more specimens. Mean archaeodirection was derived using Fisher (1953) statistic or McFadden and McElhinny (1988) statistic when the direction of magnetization was analyzed by a great circle (Fig. 8a). Values of the precision parameter k lie between 81 to 2098, which corresponds to α_{95} values between 0.7 and 4.8° with a mean α_{95} equal to 2.1°. For the 62382D and 62799B1 structures, the greater dispersion results from dip movements of kiln walls after the last heating of the kiln. As all kiln walls were sampled, we consider that the determined mean archaeodirection corresponds to the true value.

Following previous French studies, mean directions were relocated to Paris (Latitude 48.85°N; Longitude 2.3°E) using the Virtual Geomagnetic Pole (VGP, Noel & Batt, 1990). All data are plotted in the Figure 8b giving an illustration of the secular variation in Western Europe during the protohistoric period.

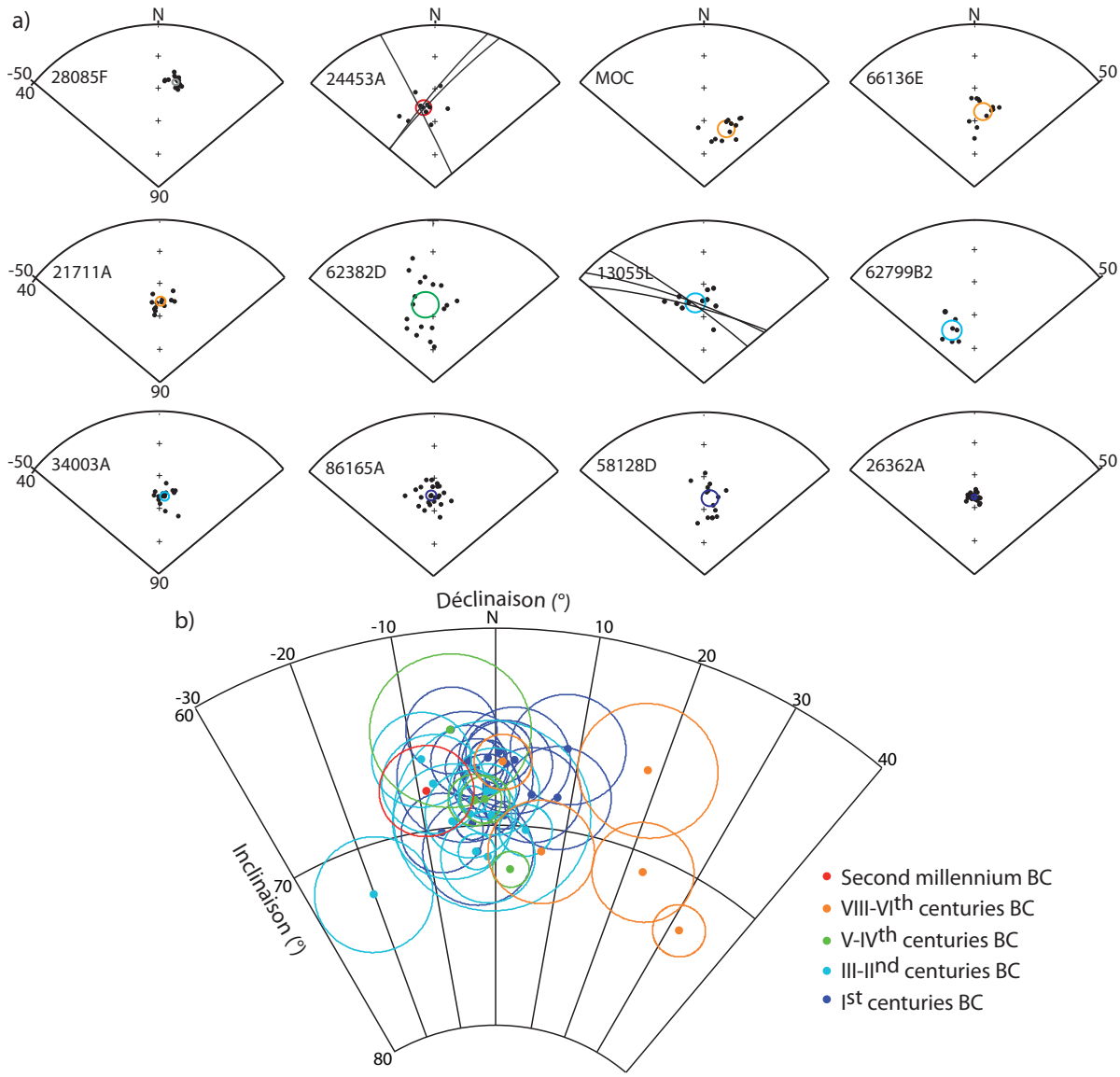


Figure 8: Mean ChRM directions with α_{95} confidence circle. a) Representative stereoplots with sample directions and the mean direction. Structures are classified by decreased age. b) Mean directions of all structures relocated to Paris by the Virtual Geomagnetic Pole correction. Structures are classified by decreasing ages.

5. The archaeomagnetic secular variation in Western Europe during the pre- and protohistoric periods

5.1 Oldest periods (Neolithic and beginning of the Bronze Age)

Between 6000 and 1500BC (that is during Neolithic and beginning of the Bronze Age), the number of archaeomagnetic or volcanic reference data is not yet sufficient to build a

secular variation curve for Western Europe unlike some Eastern Europe countries such as Bulgaria (Kovacheva *et al.*, 2009a) (Fig. 9). The kiln of Chartres 28085F seems to be coherent with previously published data and with the curve of Turner & Thompson (1981) established with sedimentary records from three lakes in United Kingdom. For future studies, the well-dated 28085F structure will be a very useful reference site in addition to German Neolithic data dated by dendrochronology (Schnepp *et al.*, 2004; Schnepp & Lanos, 2005). Sedimentary palaeomagnetic data (as Turner & Thompson, 1981) remains essential to estimate the directional secular variation beyond 1500BC in Western Europe and when building regional geomagnetic model (Pavon-Carrasco *et al.*, 2010).

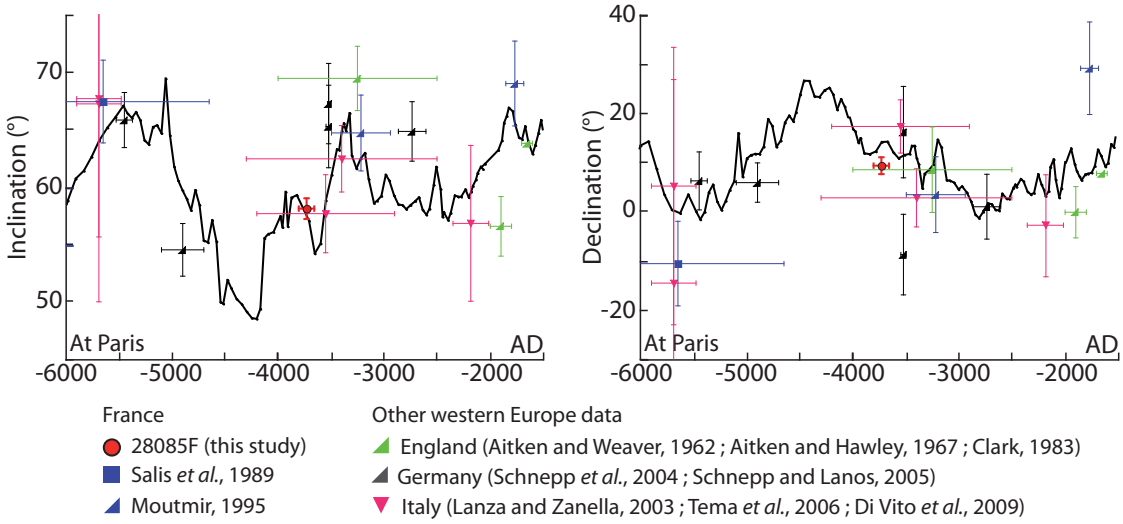


Figure 9: Previously published archaeomagnetic and volcanic Western Europe data between 6000 and 1500BC. These data are compared to 28085F-Chartres Beaulieu results. Maximal distance from Paris the relocation site is 1600km. Archaeomagnetic data are compared to the curve established with sedimentary records in United Kingdom lakes (Turner & Thompson, 1981).

5.2 Comparison with previous French data between 1500BC and 200AD

Almost all our studied sites are dated from the end of the Early Iron Age and from the Late Iron Age, filling the relative gap of the Gallet *et al.* (2002) data set between 700 and 200BC (Fig. 10a). The number of data between 200BC and 0AD and for the Roman

period now becomes comparable. The 24453A structure extends the French data set to the end of the Bronze Age (end of the second millenium BC).

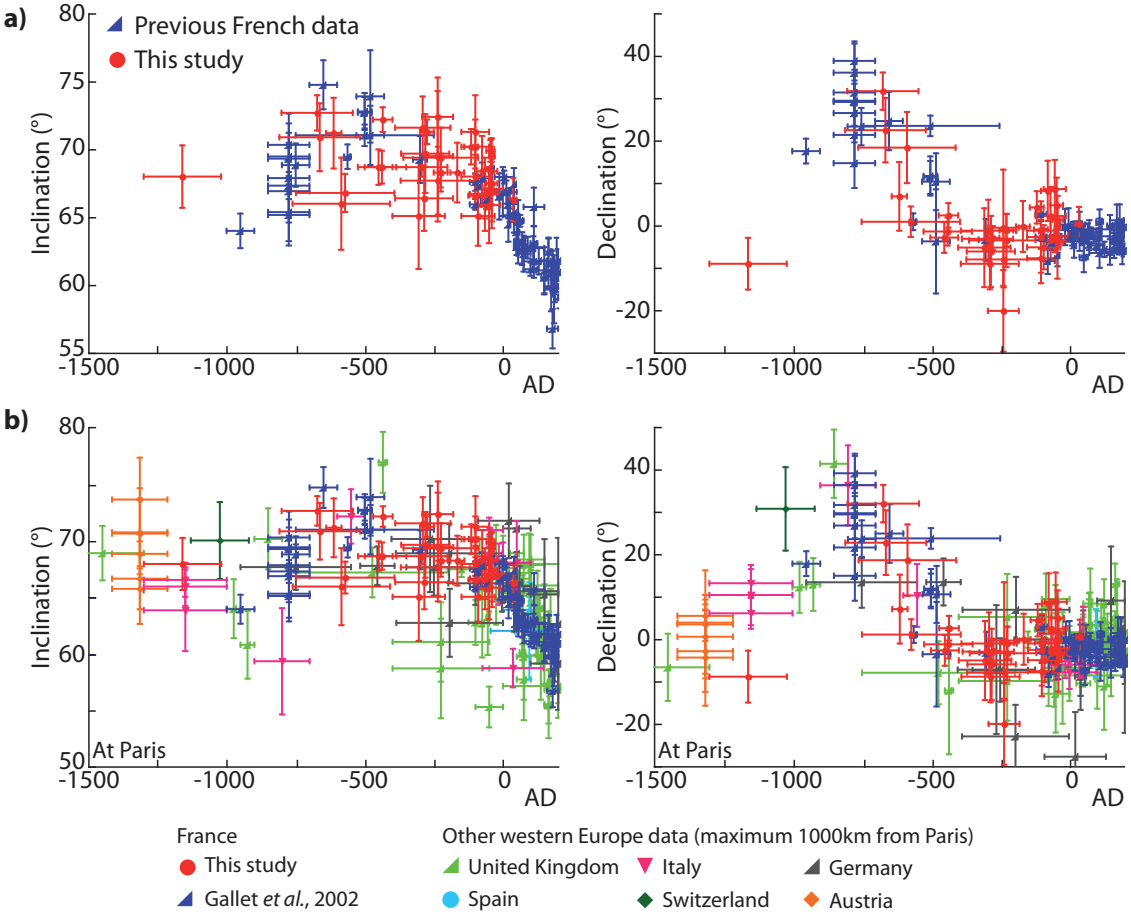


Figure 10: Comparison of new data (red circles) with (a) other French previously published data (blue triangles, Gallet et al, 2002, Chauvin et al., 2000, Bucur, 1994 and Thellier, 1981) and (b) with selected data from foreign countries (see text). All data are within 1000 km from Paris. All data are relocated to Paris (48.85°N, 2.30°E) by the VGP method. This data set is used for the computation of the new reference curve. Selection criteria are detailed in the Table 2.

Figure 10a shows the coherence between our new data and the previously published French data (Thellier, 1981 ; Bucur, 1994; Moutmir, 1995; Chauvin, 2000; Gallet *et al.*, 2002). New results indicate no monotonous variations of inclination during the Iron Age (between 800 BC and 0 AD) before a sharp and continuous decrease during the first and second centuries AD. The variation of declination is much higher with a maximum of 30-40° around 800-700 BC. Our new data highlight the absence of significative variation of declination between 500 BC and 0 AD, which emphasises the rapidity of the declination decrease between 800 and 500BC.

5.3 Selection of Western Europe data for the period 1500BC-200AD

To increase the number of data, the new Western Europe directional secular variation curve during the protohistoric period was built with a data set enlarged to include the neighbouring countries (Fig. 10b). All selected data are within 1000km from Paris, in order to minimize the error induced by the VGP relocation (Casas and Incoronato, 2007). Data were selected using Geomagia50v2 database (Donadini *et al.*, 2009) and come from United Kingdom, Germany, Switzerland, Austria, Italy and Spain (see Fig. 1 and Table 2).

Country	Reference	N	Protocol	Selection (α_{95} < 5°, n > 2 and Δ_{Age} < 500years)
France	This study	38 (37)	AF/Thermal	All
	Chauvin *et al.*, 2000	6 (0)	Thellier-Thellier PI	All (only I,D data)
	Gallet *et al.*, 2002	6 (6)	AF	All
	Moutmir, 1995	9 (9)	Viscosity test and Thermal	All
	Bucur, 1994	20 (7)	Viscosity test	Only PC data (classified by Bucur, 1994)
	Thellier, 1981	24 (2)	Viscosity test	Only PC data (classified by Bucur, 1994)
England	Gentles, 1989	4 (3)		All
	Clark *et al.*, 1988	5 (4)	Viscosity test et AF/Thermal	Only class 1 of the author
	Clark, 1983	7 (4)		Only class 1 of the author
	Hammo-Yassi, 1983	15 (1)		All
	Aitken and Hawley, 1967	8 (2)	Viscosity test	Only data with reliable age following the authors
	Aitken and Hawley, 1966	3 (3)	Viscosity test	Only data with reliable age following the authors
	Aitken and Weaver, 1962	14 (2)	Viscosity test	Only data with reliable age following the authors
Spain	Ruiz-Martinez *et al.*, 2008	1 (0)	AF	All
	Pares *et al.*, 1993	1 (0)	AF/Thermal	All
Italy	Hill *et al.*, 2007	5 (5)	Thellier-Thellier PI	All (only I,D data; new dating following Vitali *et al.*, 2007)
	Tema *et al.*, 2006	7 (6)	Viscosity test et AF/Thermal	All
Switzerland	Kovacheva *et al.*, 2009a	1 (1)	Coe PI	All
Germany	Schnepp and Lanos, 2005	5 (4)	AF/Thermal	All
	Schnepp *et al.*, 2004	7 (3)	AF/Thermal	All
	Reinders and Hambach, 2001	2 (1)	AF/Thermal	All
	Thellier, 1981	2 (0)	Viscosity test	Only PC data (classified by Bucur, 1994)
Austria	Aidona *et al.*, 2006	6 (6)	AF/Thermal	All

Table 2: Western Europe data used for the computation of the new archaeomagnetic reference curves between 1500BC and 200AD. All data are within 1000 km from Paris. All data follow simple selection criteria as α_{95} lower than 5°, number of specimens higher than 2 and age error lower than 500 years.

Country; Reference; Number of data used, in brackets number of data dated between 1500BC and 0AD; Protocol used for the determination of the archaeodirections: alternating field demagnetization (AF), thermal demagnetization (Thermal), Thellier viscosity test, Coe or Thellier-Thellier paleointensity method (Coe PI or Thellier-Thellier PI); If suitable, selection of data following the recommendations of the references about the reliability of the dating (see text for details).

Figure 11 gives an illustration of the possible maximal error due to the relocation at Paris for four locations 1000km away from Paris (Northern United Kingdom, North-eastern Germany, Central Spain and Central Italy). Errors are computed by comparing directions at the four chosen locations and at Paris given at ten year intervals using GUFM (Jackson *et al.*, 2000) and ARCH3k_cst.1 (Korte *et al.*, 2009) global geomagnetic

models. The computation during the last two millenia allows the estimation of relocation error for different harmonic content of the geomagnetic field. Maximal angular error is generally lower than or of the same order than the typical α_{95} (mean equal to 2.1°) values of the selected dataset (Fig. 11a). For periods with a stronger non-dipole component in the geomagnetic models (as around 800AD and 1500AD), typical α_{95} are lower than maximal error for 1000km relocation (Fig. 11a). However, it seems necessary to include all these data, in order to extend the Western Europe curve until 1500BC (Fig. 11b). Moreover, the relocation errors are minimized by the fact that data are quite oppositely distributed around Paris (Fig. 11c and Fig. 1).

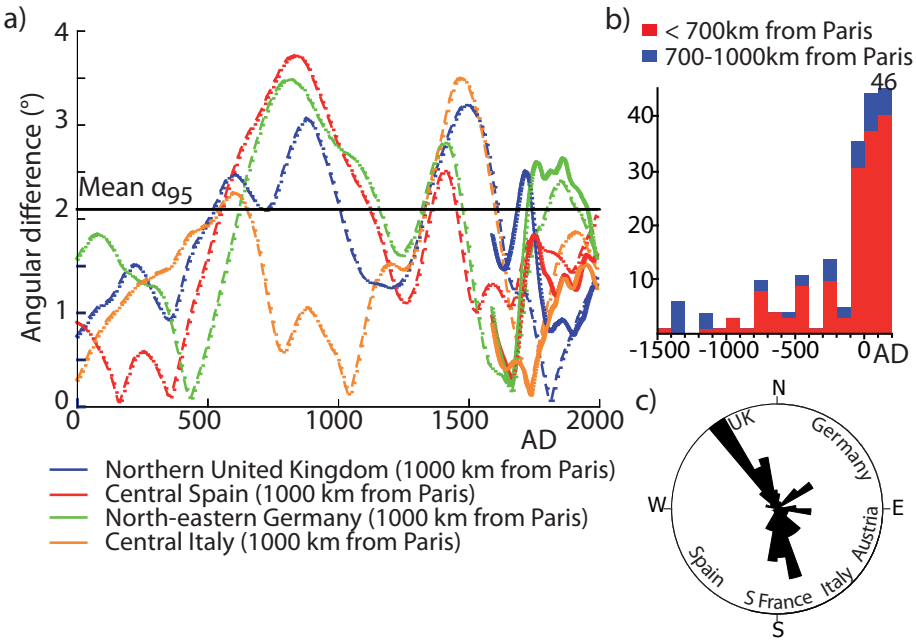


Figure 11: (a) Angular differences between GUFM (full lines, Jackson et al.) and ARCH3k_cst.1 (dotted lines, Korte et al., 2009) models at Paris and at different locations 1000km far from Paris after relocation (by VGP method) to Paris. The errors induced by the relocation are compared to the mean α_{95} of the selected dataset. (b) Temporal distribution of the mean age for selected data. (c) Geographical distribution of selected data around Paris.

Data of Figure 10b have also been selected (Tab. 2) following simple quality criteria: α_{95} lower than 5°, number of samples higher than 2 and age error lower than ±250 years. Moreover, only reliably-dated data were retained following the class defined by some authors, that is for example only PC (« Points certains ») points from Bucur (1994) or class 1 points from Clark (Clark *et al.*, 1988 and Clark, 1983). The data with uncertain or

doubtful archaeological dating mentionned in Aitken & Weaver (1962), Aitken & Hawley (1966) and Aitken & Hawley (1967) were also rejected. The dating of the five kilns from Albinia (see details in supplementary materials) studied by Hill *et al.* (2007) was updated following Vitali *et al.* (2007).

5.4 Testing the consistency of the dataset

106 data between 1500BC and 0AD and 98 data between 0AD and 200AD compose our selected data set. Possible biases induced by characteristic component determination technique (Fig. 12a), or by dating methods (Fig. 12b) or by location of the studied sites (Fig. 12c) were tested. No bias is observed between directions determined by Principal Component Analysis (PCA) or not (determined mostly with Thellier viscosity test in the latter case) or between data dated by chronometric (radiocarbon, dendrochronology or thermoluminescence) or archaeological (archaeological artefacts such as potteries and coins) methods.

No bias is finally observed between data from the Mediterranean area (Spain, Southern France and Italy) and from the « Celtic » area (Northern France, United Kingdom, Germany, Switzerland and Austria), for which two different chronological systems based on archaeological artefacts are used during the last 1500 years BC. The good consistency observed between both data sets on Figure 10c indicates a good consistency between the two chronological systems. Moreover, it points out that relocation to Paris has no observable effect about the final secular variation curve.

Nevertheless some data appear as outliers, like the English data with a low inclination during the last centuries BC (Fig. 10). These low values could be explained by tilts of the structures since their last cooling or by non-corrected anisotropy effects. Around 250 BC, two French and a German data present declinations around -15/-20° (Fig. 10). However, such westerly declination also appear in Southern Italy (Evans & Hoye, 2005) and Eastern Europe (Hungary, Marton, 2010; Bulgaria, Kovacheva *et al.*, 2009a; Greece, Evans, 2006) data sets (Fig. 13). Rather than a local magnetic anomaly, these apparent outliers could indicate a rapid variation of the geomagnetic field, as it has been recorded by more than one structure.

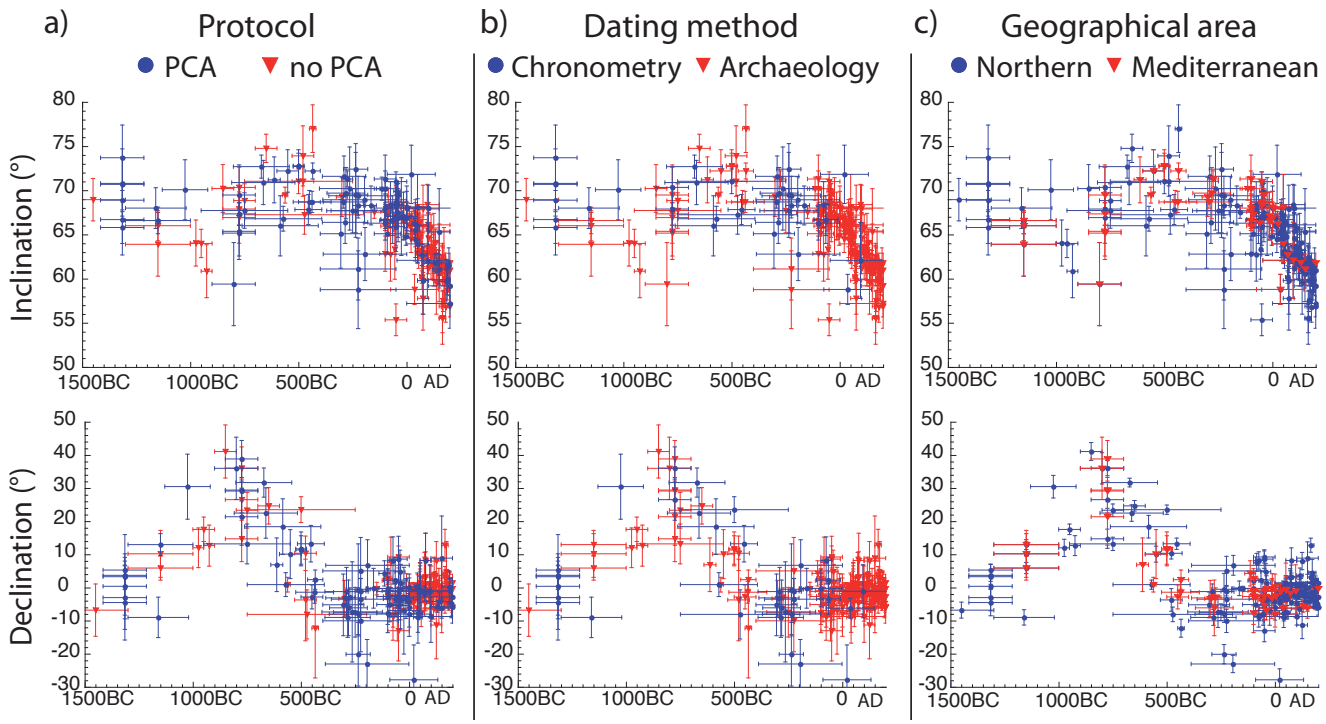


Figure 12: Tests of the consistency of the selected dataset for Western Europe between 1500BC and 200AD. (a) Archaeodirection determined by Principal Component Analysis are distinguished from the others data. (b) Distinction between data dated by chronometric or archaeological methods. (c) Distinction between data from the Mediterranean area (Spain, Southern France and Italy) and from the northern part (« Celtic » Europe during the Iron Age).

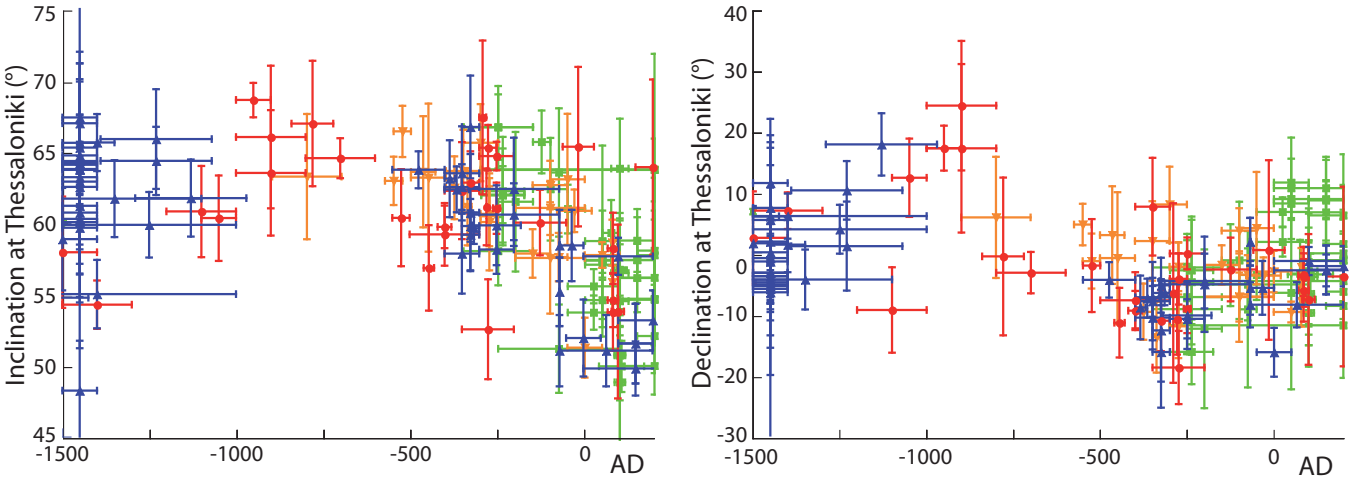


Figure 13: Eastern Europe data from Hungary (green squares, Marton, 2010), Southern Italy (orange inversed triangles, Evans & Hoye, 2005), Bulgaria-Serbia (red circles, Kovacheva *et al.*, 2009b) and Greece (blue triangles, compiled in Evans, 2006) relocated to Thessaloniki.

6. Building new reference curves between 1500BC and 200AD for Western Europe

A new SVC using our selected data set was built following the stratified bivariate statistic, which is a bivariate extension of Fisher statistics (Le Goff, 1990; Le Goff *et al.*, 1992). A mean archaeodirection was computed per time window. In each window, data are weighted following the percentage of their interval of date contained in the window. In order to take into account the secular variation of the field during the time interval of the window, the confidence interval around the mean direction is described by a confidence ellipse.

Figure 14a compares the new curve with the previous one of Gallet *et al*. (2002). Both curves were computed with sliding windows of 160 years shifted every 50 years. The first millenium BC part of the Gallet *et al.* (2002) curve was built with 49 data from France, England, Southern Italy and Tunisia. The number of data during the first millenium BC is now twice higher (90 data) over a smaller geographical area. This increased number of reference data improves the precision of the curve. New data from this study and those published since 2002 (Tema *et al.*, 2006; Aidona *et al.*, 2006; Kovacheva *et al.*, 2009a) also allow the extension of the reference curve during the second half of the second millenium BC in Western Europe (i.e. up to 1450BC). The mean archaeodirection each 50 years are given in Appendix C.

As the maximal angle between both curves is equal to 2°, they appear very similar (Fig. 14a), excepted between 850 and 500BC, for which the inclination is slightly lower with the new curve and secondly between 300 and 200BC, for which the small cusp of the direction is more pronounced in the new curve. This last directional change corresponds to the westerly declination obtained for this period. Figure 15 presents the marginal curves of inclination and declination with their 95 per cent confidence error band. No monotonous variation of inclination is observed between 1500BC and 100BC, contrary to between 100BC and 200AD. Mean inclination decreased of five degrees between 1500 and 1000BC, slightly increased to 71-72° until 500BC and next decreased to around 60° at 200AD (Bucur, 1994; Gomez-Paccard *et al.*, 2006). The secular variation of declination is much larger. Mean declination increased from -5° to 30° between 1500 and 800BC, then decreased to -5° at 250BC. Next, declination do not significantly vary until 700 AD (Gomez-Paccard *et al.*, 2006; Gallet *et al.*, 2002).

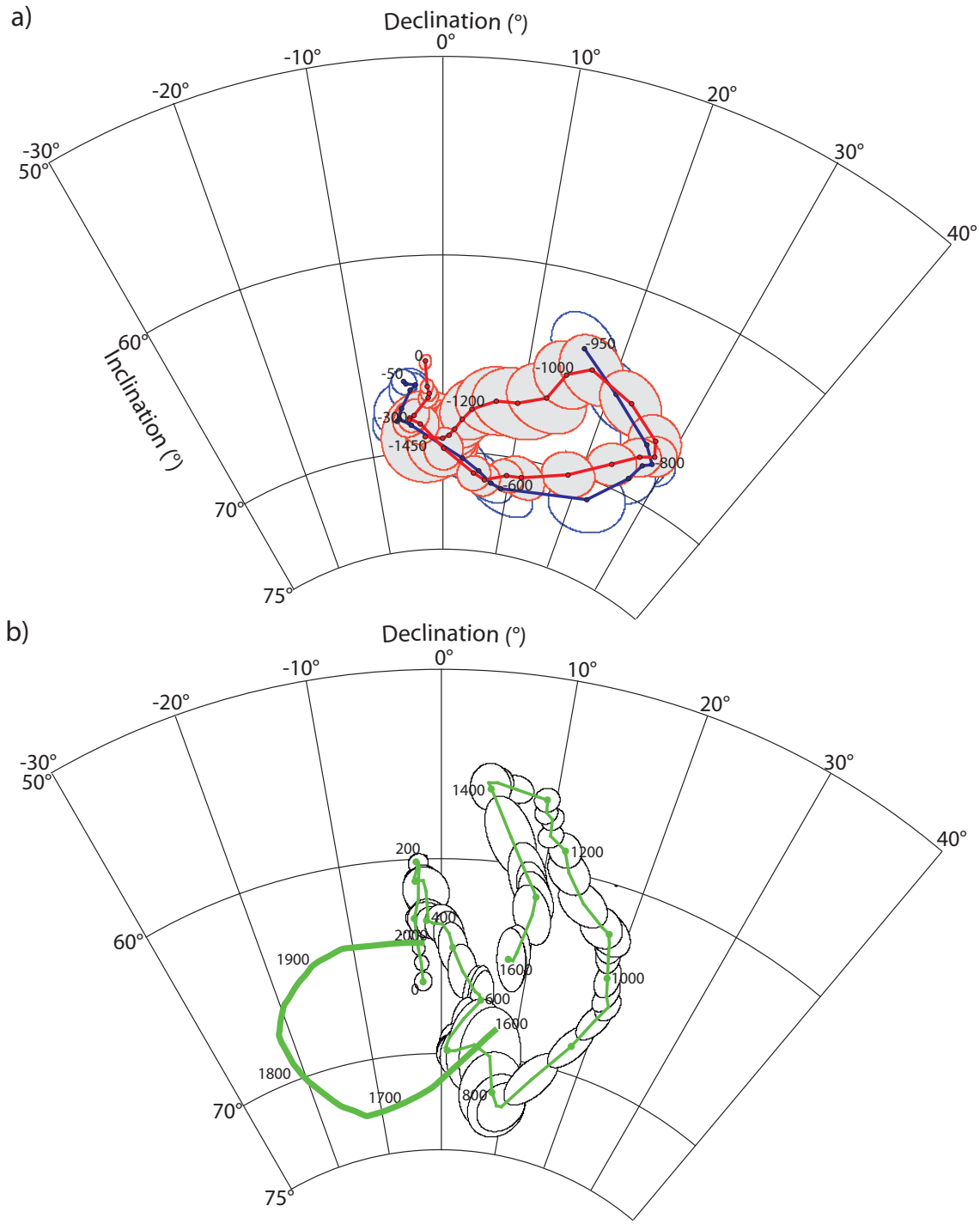


Figure 14: a) Comparison of the new bivariate curve (in red) with the old reference curve (in blue) of Gallet et al. (2002) during the BC period. Both curves were established in Paris location with sliding windows of 160 years shifted every 50 years. b) French secular variation during the last two millennia (from Bucur, 1994). The curve is built with sliding window of 80 years shifted every 25 years. The large line indicates the historical secular variation in Paris (Alexandrescu et al., 1994).

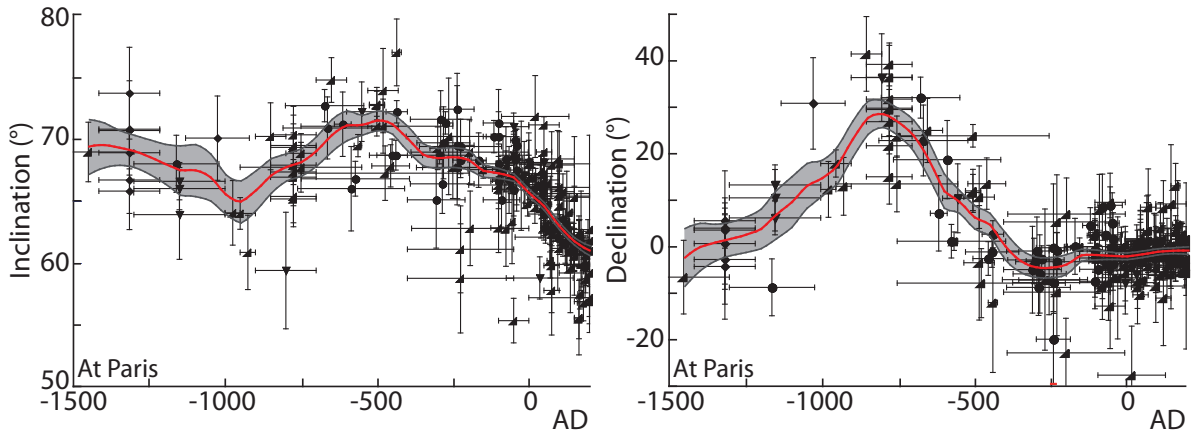


Figure 15: Marginal inclination and declination curves with 95 per cent confidence envelop.

7. Discussion

7.1 Directional secular variation in Western Europe

The directional secular variation of the geomagnetic field during the last 1500 years BC is characterized in Western Europe by two geomagnetic cusps, which are major changes in the curvature around 800BC and 250BC (Fig. 14a). Such cusps could reflect changes of azimuthal fluid motions at the core surface (Dumberry and Finlay, 2007). The dominant clockwise motion during the last 1500 years BC (Fig. 14a) would indicate a westward drift of these fluid motions. As Eastern Europe (Fig. 13) and Western Europe (Fig. 15) data are consistent, these characteristics of the directional variation of the geomagnetic field appear homogeneous at the European scale.

The strong variations mean that archaeomagnetic dating is a very useful dating tool. Even if the data set is constrained, the SVC does not allow the characterization of short-term (lower than a century) variations of the geomagnetic field, such as the possible westerly declination event around 250BC. This fact is probably explained by the larger dating uncertainties compared to more recent periods, because of plateau effects in radiocarbon dendrochronological calibration curve and because the chronological frame of archaeological methods is still not so precise during the Bronze and Iron Ages as opposed to during more recent periods.

The secular variation during the last 3500 years (Fig. 14a and 14b) deduced from this study, the SV curve of Bucur (1994) and the historical variation curve (Alexandrescu *et al.*, 1996) point out two comments. First, the direction of the geomagnetic field at Paris was quite similar at different periods: for example, the direction with a declination close to 0° and an inclination around 68° was observed at 1400BC, 400BC, 700AD and 1600AD. This direction is quite close to the direction assumed by a Geocentric Axial Dipole at Paris latitude and it is interesting to note that the interval between these dates around a thousand years is consistent with the correlation time of the dipolar component of the geomagnetic field (Hulot and Le Mouël, 1994).

Secondly, the declination over the last 3500 years was mainly either around 0° or with easterly values. The sedimentary data of Turner and Thompson (1981) shows that this observation could be extended to the eight last millennia (Fig. 9). The strong westerly declinations in Western Europe between the 17th and the 20th centuries appear quite exceptional.

7.2 Comparison with global and regional geomagnetic models

Figure 16 compares our Western Europe SV curves with three global geomagnetic models CALS3k.4, ARCH3k.1 and ARCH3K_cst.1. These models are built by regularized least-squares inversion of different data sets using spherical harmonics analysis (SHA) in space until degree 10. Cubic B-splines are used for the regularization in time. ARCH3k.1 model (Korte *et al.*, 2009) is built using archaeomagnetic and volcanic material without selection criteria. ARCH3k_cst.1 model (Korte *et al.*, 2009) is computed with data respecting the following criteria: α_{95} lower than 10°, σ_{VADM} lower than 2.10^{22} A.m^2 and σ_{Age} lower than 100 years. For future models, this last criteria should be enlarged to accept well-dated data by calibrated radiocarbon with large interval of date due to the methodological limit of the plateau effect in the dendrochronological calibration curve.

Most selected data from Western Europe are used to compute ARCH3k.1 and ARCH3k_cst.1 models and the quite good fit of models is not surprising. However, the constrained ARCH3k_cst.1 model fits better the data set than ARCH3k.1, for example the declination maximum around 800BC.

The third SHA model, CALS3K.4 (Korte and Constable, 2011) includes lake and marine sedimentary data as well as archaeomagnetic and volcanic data. Lower secular variation is predicted by this model and the addition of sedimentary data induces smoothing of the predicted SVC. This is certainly due to the inherent problems of Depositionnal Remanent Magnetization acquisition as the magnetization lock-in depth and the inclination flattening. The last point is a probable explanation for the slight underestimation of inclination by CALS3K.4 during the first millennium BC.

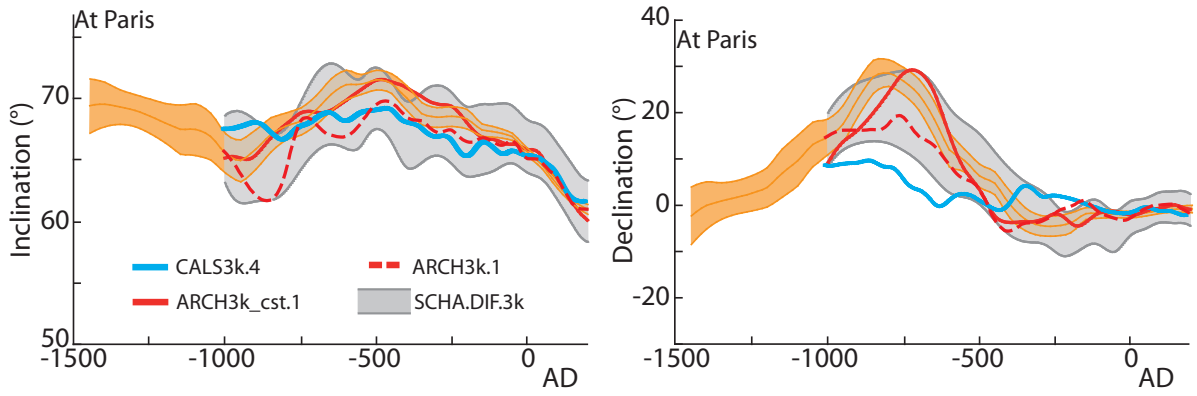


Figure 16: Comparison of Western Europe curve (orange curve) with regional SCHA.DIF.3k (Pavon-Carrasco et al., 2009) and global ARCH3k.1, ARCH3k_cst.1 (Korte et al., 2009) and CALS3k.4 geomagnetic models. Models are computed at Paris.

Currently, the inhomogeneous distribution of archaeomagnetic and volcanic data around the globe with very few data in the southern hemisphere requires to use sedimentary data in SHA models. The comparison of Western Europe data with the three SHA models emphasizes the need in the future to use only high-quality archaeomagnetic and volcanic material in order to obtain the most reliable geomagnetic models with a greater resolution.

An alternative to this current problem of global geomagnetic models is to use regional models as SCHA.DIF.3k (Pavon-Carrasco *et al.*, 2009). This European model is developed by inversion of archaeomagnetic data using the spherical cap harmonic analysis (SCHA) in space and sliding windows in time. The harmonic analysis until degree 2 (equivalent to degree 5 in SHA) is performed in an artificial conical area centered over Europe. The good fit of the model to the data during the first millennium BC, is not surprising (Fig. 16), as the model was built with all previously published European data and as the SVC are consistent all over Europe. Compared to our new SV curve, the model slightly

underestimates the declination maximum around 800BC and tends to smooth the sharpness of the declination decrease between 800 and 400AD.

The comparison of Western Europe data with models shows that SHA or SCHA models are very promising tools to not only characterize the geomagnetic field in the past but also for archaeomagnetic dating (Lodge and Holme, 2009; Pavon-Carrasco *et al.*, 2009). Currently the dating appears better with the regional secular variation curves, as SHA models are limited by the inhomogeneous geographical distribution of the data especially highlighted for the first millennium BC (Donadini *et al.*, 2009).

7.3 VGP curve and dipole tilt during the last 1500 years BC

Figure 17 illustrates the position of the Virtual Geomagnetic Pole (VGP) deduced from Western Europe data. Around 800BC, the latitude of the VGP reaches values close to 65-70°N over the northern part of Russia. The longitude varies slightly from East to West between 1500BC and 200AD. The dispersion of individual longitudes during the second half of the second millennium BC and around the BC/AD transition is probably an artefact due to the very high latitude of VGPs.

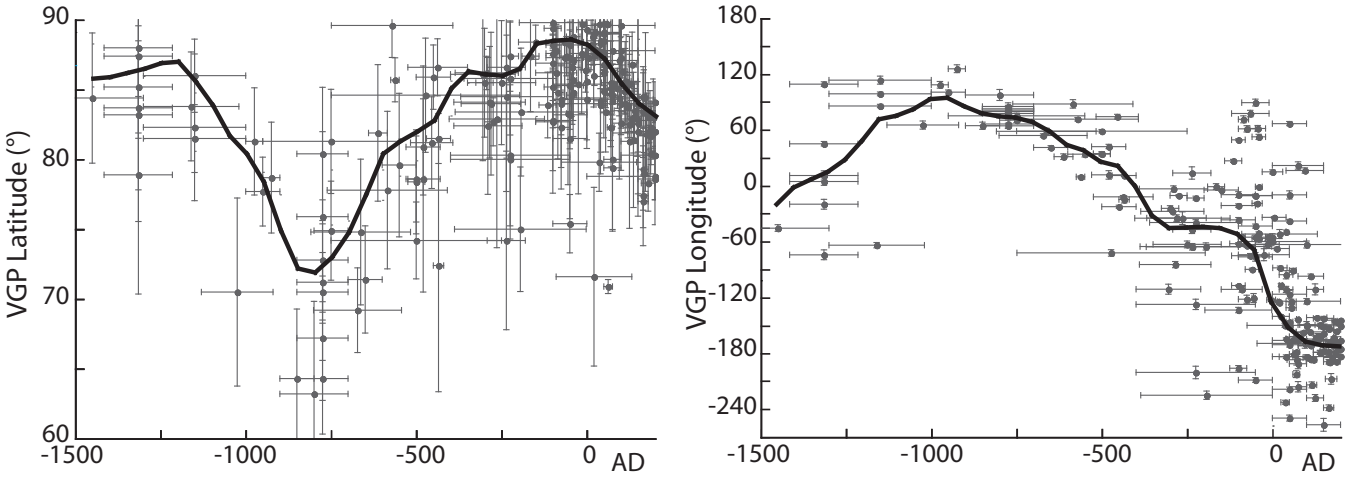


Figure 17: Variation between 1500BC and 200AD of the latitude and longitude of the Virtual Geomagnetic Pole deduced from Western Europe data. The mean curve (in black) is computed with sliding windows of 160 years shifted every 50 years.

The low-latitude values of the VGP during the first half of the first millennium BC was explained by a geomagnetic excursion (Dergachev *et al.,* 2004; Speranza *et al.*, 2006), by a strong tilted dipole or by an eccentric dipole (Gallet *et al.*, 2009a). The strong contemporaneous highly-reliable archaeointensities in Western Europe (Hill *et al.*, 2008; Gallet *et al.*, 2009b) could exclude the first hypothesis, as a transitionnal geomagnetic field has low intensity. Because an eccentric dipole is linked to a stronger non-dipolar and more precisely quadrupolar field (Gallet *et al.*, 2009a), this hypothese may be discriminated by the comparison of European data with data from other well-documented geographical areas and with global dipole models.

The most complete archaeomagnetic and volcanic data sets between 1500BC and 200AD in the Northern hemisphere come from Western USA, Hawaii and Eastern Asia (China, Korea and Japan) (Fig. 18a). Unfortunately, no directional data set is currently published for the southern hemisphere with only four data from Australia and one from New Zealand (Fig. 18a).

SV curves of the VGP localization in Europe (Western and Eastern Europe data), Western USA, Hawaii and Eastern Asia were built by the bivariate statistic with sliding windows of 200 years shifted every 100 years (Fig. 18a and 18b). The temporal distribution of the data do not allow a width of the sliding windows shorter than 200 years and the computation of the curve before 1200BC in Western USA and Eastern Asia.

Quite similar trends of the VGP path, especially for the longitude, are observed in Europe, Western USA and Eastern Asia. More discrepancies appear with the latitude (mainly because of scarcity and dispersion of data in Eastern Asia), but three curves show a minimum for latitude around 900-700 BC. The secular variation in Hawaii appears different and much lower, as observed at shorter (last centuries, Jackson *et al.*, 2000) and longer (last million years, Mankinen & Champion, 1993; Laj *et al.*, 2002) timescales. The Hawaiian curve presents an important change in the VGP path around 300-200BC, as the European and Eastern Asia curves. The two important changes in the European VGP path at 800 and 250BC consequently occur in other data sets from the Northern hemisphere, which seems to indicate that they are mainly due to a dipole motion.

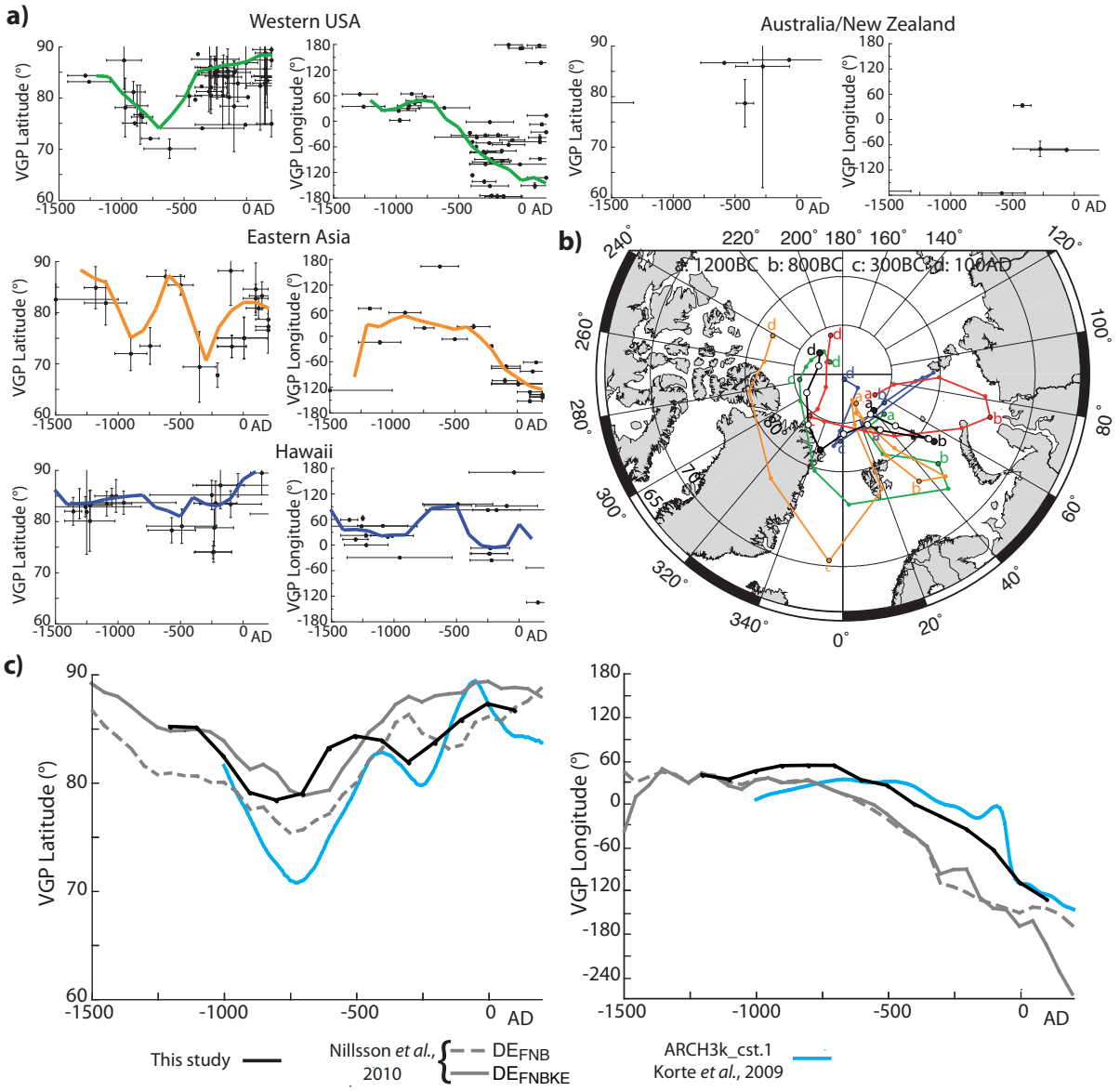


Figure 18: a) Variation of the VGP in Western USA, Eastern Asia, Hawaii and Australia. Mean VGP curves are computed from archaeomagnetic and volcanic data with the bivariate statistics with sliding windows of 200 years shifted every 100 years. b) Corresponding secular variation curves of the VGP (green for Western USA, orange for Eastern Asia and blue for Hawaii) between 1200BC and 100AD together with Europe curve (red curve built from Western and Eastern Europe data with sliding windows of 200 years shifted every 100 years). The global curve which is the mean of the four previous curves is plotted in black. c) Comparison of the global curve with ARCH3k_cst.1 dipole model and with dipole tilt models DE_{FNB} and DE_{FNBKE} (Nilsson et al., 2010). DE_{FNB} is built with three sedimentary records from the Northern hemisphere (Europe, Japan and Northern America). Two records from the southern Hemisphere (Australia and South America) are added in DE_{FNBKE}.

Following the approach of Valet *et al.* (2008), the four VGP secular variation curves were averaged to compute between 1200BC and 100 AD a VGP secular variation curve at the global scale (black curve, Fig. 18b). The curve exhibits a trend from Eastern to Western longitudes during the first millennium BC and two minimum of the latitude at 800 and 300BC. This curve is compared (Fig. 18c) to dipole tilt models DE_{FNB} and DE_{FNBKE} built with high-quality sedimentary records (Nilsson *et al.*, 2010) and to dipole model deduced from ARCH3k_cst.1 SHA model (Korte *et al.*, 2009). Almost all data (99 per cent) used for ARCH3k_cst.1 model between 1500BC and 200AD come from the Northern hemisphere. DE_{FNB} model was established with three sequences from the Northern hemisphere (Finnland, British Columbia and Japan). Two sequences from the Southern hemisphere (Australia and Argentina) were added for DE_{FNBKE}, which reflects consequently more precisely the variation of the dipole. Three models fit quite well our VGP global curve built with archaeomagnetic and volcanic data (Fig. 18c). The VGP is at lower latitudes around 800-700BC for all models and around 250BC for ARCH3k_cst.1 and DE_{FNB} models taken account of Northern hemisphere data. Conversely, DE_{FNBKE} does not present the latitude minimum around 250BC, which could be a non-dipolar feature of the geomagnetic field characteristic in the Northern hemisphere. More archaeomagnetic and volcanic data from the southern hemisphere are needed to verify these hypotheses.

8. Conclusion

This study brings 38 new French archaeodirections dated in the last 1500 years BC and one data for the fourth millennium BC. All archaeodirections were obtained by thermal or alternating field demagnetizations. The SV curve, established with new data and a selected Western Europe dataset, is characterized by quite low secular variation of inclination during the last 1500 years BC. Conversely, the variation of declination is very strong with a maximum of 30° around 800BC and a minimum of -5° around 250 BC. At these periods, the curve exhibits two cusps of the direction of the geomagnetic field.

The directional cusps at 800 and 250 BC seen in Western Europe data correspond to a location of the VGP at lower latitude. They appear characteristic features of the geomagnetic field at least in the Northern hemisphere. But the scarcity of data in

geographical areas outside Europe does not allow to explain further the secular variation by the variation of the dipolar or the non-dipolar field. The comparison of our SV curve with global geomagnetic models demonstrates that the best fit is obtained with ARCH3k_cst.1 model built from archaeomagnetic and volcanic data selected following reliability criteria. This type of high-quality data have to be acquired all over the globe, especially in the southern hemisphere, in order to improve the reliability of global models.

The SV curve also allows improvements of the archaeomagnetic dating in the second half of the second millennium BC (Late Bronze Age) and the first millennium BC (Iron Age). The strong variation of declination provides a very useful alternative to the imprecision of radiocarbon due to plateau effects in the dendrochronological calibration curve.

Acknowledgements

Archaeological teams are kindly ackowledged for their help about the archaeological and chronological context of their sites. We thank Hugues Savay-Guerraz (Musée gallo-romain de Lyon), Pascal Paris (Centre archéologique européen du Mont-Beuvray, Bibracte), Celine Jandot, Olivier Ginouvez, Louis Jeanson and Fabrice Charlier (INRAP) for the sampling of many structures. We are also grateful to Philippe Dufresne for his help at each step of the data acquisition and Pierrick Roperch for his touch to notice errors. Sarah-Jane Clelland (Bradford university) is kindly acknowledged for providing british sedimentary data. This work was partly financed by the CNRS/INSU Paléo2 program.

Bibliography

Abrahamsen, N., Jacobsen, B.H., Koppelt, U., De Lasson, P., Smekalova, T. & Voss, O., 2003. Archaeomagnetic investigations of Iron Age slags in Denmark, *Archeol. Prospect.*, 10, 91-100

Aidona, E., Scholger, R., Mauritsch, H.J., Schnepp, E. & Klemm, S., 2006. Spatial distribution of archaeomagnetic vectors within archaeological samples from Eisenerz (Austria), *Geophys. J. Int.*, 166, 46-58

Aitken, M.J. & Hawley, H.N., 1966. Magnetic dating III: further archaeomagnetic measurements in Britain, *Archaeometry*, 9, 187-194

Aitken, M.J. & Hawley, H.N., 1967. Archaeomagnetic measurments in Britain IV, *Archaeometry*, 10, 129-135

Aitken, M.J. & Weaver, G.H., 1962. Magnetic dating: further archaeomagnetic measurements in Britain, *Archaeometry*, 6, 76-80

Alexandrescu, M., Courtillot, V., Le Mouël, J.-L., 1996. Geomagnetic field direction in Paris since the mid-sixteenth century, *Phys. Earth planet. Inter.*, 98, 321-360

Bucur, I., 1994. The direction of the terrestrial magnetic field in France during the last 21 centuries, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 87, 95-109

Casas, Ll. & Incoronato, A., 2007. Distribution analysis of errors due to relocation of geomagnetic data using the « Conversion Via Pole » (CVP method): implications on archaeomagnetic data, *Geophys. J. Int.*, 169, 448-454

Chauvin, A., Garcia, Y., Lanos, P. & Laubenheimer, F., 2000. Palaeointensity of the geomagnetic field recovered on archaeomagnetic sites from France, *Phys. Earth planet. Inter.*, 120, 111-136

Clark, A.J., 1983. Archaeomagnetic dating at Bigberry, in Thompson, F.H. (Ed.) Excavations at Bigberry, 1978-1980, *Antiquaries Journal*, 63, 237-278

Clark, A.J., Tarling, D.H. & Noël, M., 1988. Developments in archaeomagnetic dating in Britain, *Journal of Archaeological Science*, 15, 645-667

Dergachev, V.A., Raspopov, O.M., van Geel, B. & Zaitseva, G.I., 2004. The Sterno-etrussia geomagnetic excursion around 2700BP and changes of solar activity, cosmic ray intensity and climate, *Radiocarbon*, 46, 2, 661-681

Di Vito, M.A., Zanella, E., Gurioli, L., Lanza, R., Sulpizio, R., Bishop, J., Tema, E., Boenzi, G., Laforgia, E., 2009. The Afragola settlement near Vesuvius, Italy: the destruction and abandonment of a Bronze Age village revealed by archaeology, volcanology and rock-magnetism, *Earth planet. Sci. Lett.*, 277, 408-421

Donadini, F., Korte, M. & Constable, C.G., 2009. Geomagnetic field for 0-3 ka: 1. New data sets for global modeling, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 10, 6, Q06007, doi:10.1029/2008GC002295

Dumberry, M. & Finlay, C.C., 2007. Eastward and westward drift of the Earth's magnetic field for the last three mellennia, *Earth planet. Sci. Lett.*, 254, 146-157

Evans, M.E. & Hoye, G.S., 2005. Archaeomagnetic results from southern Italy and their bearing on geomagnetic secular variation, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 151, 155-162

Evans, M.E., 2006. Archaeomagnetic investigations in Greece and their bearing on geomagnetic secular variation, *Phys. Earth planet. Int.*, 159, 90-95

Fisher, R.A., 1953. Dispersion on a sphere, *Proc. R. Soc. Lond.*, A-127, 295-305

Gallet, Y., Genevey, A. & Le Goff, M., 2002. Three millenia of directional variation of the Earth's magnetic field in Western Europe as revealed by archaeological artefacts, *Phys Earth planet Int.*, 131, 81-89

Gallet, Y., Hulot, G., Chulliat, A. & Genevey, A., 2009a. Geomagnetic field hemispheric asymmetry and archeomagnetic jerks, *Earth planet. Sci. Lett.*, 284, 279-286

Gallet, Y., Genevey, A., Le Goff, M., Warmé, N., Gran-Aymerich, J. & Lefèvre, A., 2009b. On the use of archaeology in geomagnetism and vice-versa: recent developments in archeomagnetism, *C.R. Physique*, 10, 630-648

Genevey, A., Gallet, Y. & Boudon, G., 2002. Secular variation study from non-welded pyroclastic deposits from Montagne Pelée volcano, Martinique (West Indies), *Earth planet. Sci. Lett.*, 201, 369-382

Gentles, D., 1989. Archaeomagnetic directional studies of large fired structures in Britain, Ph.D. thesis, Plymouth Polytechnic

Gomez-Paccard, M., Catanzariti, G., Ruiz-Martinez, V.C., McIntosh, G., Nunez, J.I., Osete, M.L., Chauvin, A., Lanos, P., Tarling, D.H., Bernal-Casasola, D., Thiriot, J. & "Archaeological working group", 2006, A catalogue of Spanish archaeomagnetic data, *Geophys. J. Int.*, 166, 1125-1143

Hammo-Yassi, N., 1983. Archaeomagnetic work in Britain and Iraq, Ph.D. thesis, Newcastle upon Tyne

Hervé, G., Schnepp, E., Chauvin, A., Lanos, P. & Nowaczyk, N., 2011. Archaeomagnetic results on three Early Iron Age salt-kilns from Moyenvic (France), *Geophys. J. Int.*, 185, 144-156

Hill, M.J., Lanos, P., Chauvin, A., Vitali, D. & Laubenheimer, F., 2007. An archaeomagnetic investigation of a Roman amphorae workshop in Albinia (Italy), *Geophys. J. Int.*, 169, 471-482

Hill, M.J., Lanos, P., Denti, M. & Dufresne, P., 2008. Archaeomagnetic investigation of bricks from the VIII century BC Greek-indigenous site of Incoronata (Metaponto, Italy), *Phys. Chem. Earth,* 33, 6-7, 523-533

Hulot, G., Le Mouël, J.L., 1994. A statistical approach to the Earth's main magnetic field, *Phys. Earth planet. Inter.*, 82, 167-183

Jackson, A, Jonkers, A.R.T. & Walker, M., 2000. Four centuries of geomagnetic secular variation from historical records, *Phil Trans. R. Soc. Lond.*, A 358, 957-990

Jonkers, A.R.T., Jackson, A. & Murray, A., 2003. Four centuries of geomagnetic data from historical records, *Rev. Geophys.*, 41, 1006, doi:10.1029/2002RG000115

Kirschvink, J.L., 1980. The least-squares line and plane and the analysis of palaeomagnetic data, *Geophys. J. R. astr. Soc.*, 62, 699-718

Korte, M., Donadini, F. & Constable, C.G., 2009. Geomagnetic field for 0-3 ka: 2. A new series of time-varying global models, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 10, 6, Q06008, doi:10.1029/2008GC002297

Korte, M. & Constable, C., 2011. Improving geomagnetic field reconstructions for 0-3ka, *Phys. Earth planet. Int.*, 188(3-4), 247-259

Kostadinova, M., Jordanova, N., Jordanova, D. & Kovacheva, M., 2004. Preliminary study on the effect of water glass impregnation on the rock-magnetic properties of baked clay, *Stud. Geophys.*

Geod., 48, 637-646

Kovacheva, M., Boyadziev, Y., Kostadinova-Avramova, M., Jordanova, N. & Donadini, F., 2009a. Updated archaeomagnetic data set of the past 8 millenia from the Sofia laboratory, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 10, Q05002, 6PP, doi:10.1029/2008GC002347

Kovacheva, M., Chauvin, A., Jordanova, N., Lanos, P. & Karloukovski, V., 2009b. Remanence anisotropy effect on the palaeointensity results obtained from various archaeological materials, excluding pottery, *Earth Planets Space,* 61, 711-732

Laj, C., Kissel, C., Scao, V., Beer, J., Thomas, D.M., Guillou, H., Muscheler, R. & Wagner, G., 2002. Geomagnetic intensity and inclination variations at Hawaii for the past 98 kyr from core SOH-4 (Big Island): a new study and a comparison with existing contemporary data, *Phys. Earth planet. Inter.*, 129, 205-243

Lanos, P., 2004. Bayesian inference of calibration curves, application to archaeomagnetism, *in* Buck, C.E., and Millard, A.R., *Tools for constructing chronologies, crossing discplinary boundaries*, Lecture notes in statistics, Springer, London, 177, 43-82

Lanos, P., Le Goff, M., Kovacheva, M. & Schnepp, E., 2005. Hierarchical modelling of archaeomagnetic data and curve estimation by moving average technique, *Geophys. J. Int.*, 160, 440-476

Lanza, R. & Zanella, E., 2003. Palaeomagnetic secular variation at Vulcano (Aeolian Islands) during the last 135 kyr, *Earth planet. Sci. Lett.*, 213, 321-336

Le Goff, M., 1990. Lissage et limites d'incertitude des courbes de migration polaire: pondération des données et extension bivariante de la statistique de Fisher, *C. R. Acad. Sci.*, Sér II, 311, 1191-1198

Le Goff, M., Henry, B. & Daly, L., 1992. Practical method for drawing a VGP path, *Phys Earth planet Int.*, 70, 201-204

Le Goff, M., Gallet, Y., Genevey, A. & Warmé, N., 2002. On archaeomagnetic secular variation curves and archaeomagnetic dating, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 134, 203-211

Lodge, A., Holme, R., 2009. Towards a new approach to archaeomagnetic dating in Europe using geomagnetic field modelling, *Archaeometry*, 51(2), 309-322

Mankinen, E.A. & Champion, D.E., 1993. Broad trends in geomagnetic paleointensity on Hawaii during Holocene time, *J. Geophys. Res.*, 98, 7959-7976

Marton, P., 2009. Prehistorical archaeomagnetic directions from Hungary in comparison with those south-eastern Europe, *Earth Planets Space*, 61, 1351-1356

Marton, P., 2010. Two thousand years of geomagnetic field direction over central Europe revealed by indirect measurements, *Geophys. J. Int.*, 181, 261-268

McFadden, P.L. & McElhinny, M.W., 1988. The combined analysis of remagnetization circles and direct observations in paleomagnetism, *Earth planet. Sci. Lett.*, 87, 161-172

McIntosh, G., Kovacheva, M., Catanzariti, G., Osete, M.L. & Casas, L., 2007. Widespread occurrence of a novel High coercivity, thermally stable, low unblocking température magnetic phase in heated archaeological material, *Geophys. Res. Lett.*, 34, L21302, doi:10.1029/2007GL031168

McIntosh, G., Kovacheva, M., Catanzariti, G., Donadini, F. & Osete, M.L., 2011. High coercivity rémanence in baked clay materials used in archaeomagnetism, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 12, Q02003, doi:10/10292010GC003310

Moutmir, A., 1995. *Analyses magnétiques de terres cuites protohistoriques en France. Apports en archéomagnétisme (Premier millénaire avant J.-C.) et en archéologie*. Ph.D. Thesis, Muséum National d'Histoire Naturelle, Paris, 245 pp.

Nilsson, A., Snowball, I., Muscheler, R. & Uvo, C.B., 2010. Holocene geocentric dipole tilt model constrained by sedimentary paleomagnetic data, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 11, Q08018, doi:10.1029/2010GC003118

Noël, M. & Batt, C.M., 1990. A method for correcting geographically separated remanence directions for the purpose of archaeomagnetic dating, *Geophys. J. Int.*, 102, 753-756

Pares, J.M., De Jonge, R., Pascual, J.O., Bermudez, A., Tovar, C.J., Luezas, R.A. & Maestro, N., 1993. Archaeomagnetic evidence for the age of a Roman pottery kiln from Calahorra (Spain), *Geophys. J. Int.*, 112, 533-537

Pavon-Carrasco, F.J., Osete, M.L., Torta, J.M. & Gaya-Piqué, L.R., 2009. A regional archaeomagnetic model for Europe for the last 3000 years, SCHA.DIF.3K : Applications to archaeomagnetic dating, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 10, 3, Q03013, doi:10.1029/2008GC002244

Pavon-Carrasco, F.J., Osete, M.L. & Torta, J., 2010. Regional modeling of the geomagnetic field in Europe from 6000BC to 1000BC, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 11, Q11008, doi:10.1029/2010GC003197

Reimer, P.J., Baillie, M.G.L., Bard, E., Bayliss, A., Beck, J.W., Bertrand, C.J.H., Blackwell, P.G., Buck, C.E., Burr, G.S., Cutler, K.B., Damon, P.E., Edwards, R.L., Fairbanks, R.G., Friedrich, M., Guilderson, T.P., Hogg, A.G., Hughen, K.A., Kromer, B., McCormac, G., Manning, S., Ramsey, C.B., Reimer, R.W., Remmele, S., Southon, J.R., Stuiver, M., Talamo, S., Taylor, F.W., van der Plicht, J. & Weyhenmeyer, C.E., 2004. IntCal04 terrestrial radiocarbon age calibration, 0-26 cal kyr BP. *Radiocarbon*, 46, 3, 1029-1058

Reinders, J. & Hambach, U., 2001. Archäomagnetische Datierung eines römischen Töpferofens aus Haltern, in *Die römischen Töpferofen von Haltern*, pp. 303-305, ed. Rudnic, B., Bodenaltertümer Westfalens von Zabern, Mainz

Ruiz-Martinez, V.C., Pavon-Carrasco, F.J. & Catanzariti, G., 2008. First archaeomagnetic data from northern Iberia, *Phys. Chem. Earth*, 33, 556-577

Salis, J.S., Bonhommet, N. & Levi, S., 1989. Paleointensity of the geomagnetic field from dated lavas of the Chaîne des Puys, France. 7-12 thousand years Before Present, *J. Geophys. Res.*, 94, B11, 15771-15794

Schnepp, E., Pucher, R., Reinders, J., Hambach, U., Soffel, H. & Hedley, I., 2004. A German catalogue of archaeomagnetic data, *Geophys. J. Int.*, 157, 64-78

Schnepp, E. & Lanos, P., 2005. Archaeomagnetic secular variation in Germany during the past 2500 years, *Geophys. J. Int.*, 163, 479-490.

Schnepp, E. & Lanos, P., 2006. A preliminary secular variation reference curve for archaeomagnetic dating in Austria, *Geophys. J. Int.*, 166, 91-96

Schnepp, E., Worm, K. & Scholger, R., 2008. Improved sampling techniques for baked clay and soft sediments, *Phys. Chem. Earth*, 33, 6-7, 407-413

Spassov, S., Hus, J., Geeraerts, R. & Heller, F., 2008. Archaeomagnetic dating of a High Middle Age likely iron working site in Corroy-le-Grand (Belgium), *Phys. Chem. Earth*, 33, 6-7, 544-556

Speranza, F., Maritan, L., Mazzoli, C., Morandi Bonacossi, D. & D'Ajello Caracciolo, F., 2006. First directional archaeomagnetic results from Syria: evidence from Tell Mishrifeh/Qatna, *Geophys. J. Int.*, 165, 47-52

Tanguy, J.-C., Le Goff, M., Principe, C., Arrighi, S., Chillemi, V., Paiotti, A., La Delfa, S. & Patanè, G., 2003. Archaeomagnetic dating of Mediterranean volcanics of the last 2100 years: validity and limits, *Earth planet. Sci. Lett.*, 211, 111-124

Tema, E., Hedley, I. & Lanos, P., 2006. Archaeomagnetism in Italy: a compilation of data including new results and a preliminary Italian secular variation curve, *Geophys. J. Int.*, 167, 1160-1171

Tema, E. & Kondopoulou, D., 2011. Secular variation of the Earth's magnetic field in the Balkan region during the last eight millennia based on archaeomagnetic data, *Geophy. J. Int.*, 186(2), 603-614, doi:10.1011/j.1365-246X.2011.05088.x

Thellier, E. & Thellier, O., 1959. Sur l'intensité du champ magnétique terrestre dans le passé historique et géologique, *Ann. Geophys.*, 1, 37-52

Thellier, E., 1981. Sur la direction du champ magnétique terrestre en France durant les deux derniers millénaires, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 24, 89-132

Turner, G.M. & Thompson, R., 1981. Lake sediment record of the geomagnetic secular variation in Britain during Holocene times, *Geophys. J. R. Astron. Soc.*, 65, 703-725

Valet, J.P., Herrero-Bervera, E., Le Mouël, J.L. & Plenier, G., 2008. Secular variation of the geomagnetic dipole during the past 2000 years, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 9, 1, Q01008, doi:10.1029/2007GC001728

Vitali, D. (Ed), 2007. *Albinia, le fornaci e le anfore di Albinia, primi dati su produzioni e scambi della costa tirrenica al modo gallico*, Seminario internazionale, Ravenna May 6-7th 2006, 206p.

Zananiri, I., Batt, C.M., Lanos, P., Tarling, D.H. & Linford, P., 2007, Archaeomagnetic secular variation in the UK during the past 4000 years and its application to archaeomagnetic dating, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 160, 97-107

Supplementary materials

Appendix A: Description of new archaeomagnetic sites

Appendix B: New dating of Albinia kilns (Hill *et al.*, 2007)

Appendix C: Directional bivariate curve for Western Europe at Paris

Appendix A: Description of new archaeomagnetic sites.

Agde, Saint-Michel (Hérault, région Languedoc-Roussillon), FR2 (34003A)

The rescue excavation of this archeological site, which was located at the edge of the Agathé greek colony, was directed by Elian Gomez (*Service archéologique de Béziers).* The excavation unearthed an agricultural exploitation specialized in wine growing, that was associated to two amphorae kilns (Gomez, 2002). The archeomagnetic study was carried out for the best-preserved kiln (FR2), that have a diameter of 4.40m. The kiln walls and the central bank of the plate were sampled. This kiln is dedicated to the production of greco-italic and Dressel 1A amphorae.

The use of the kiln FR2 is dated in the interval of date [140BC; 90BC] by pottery sherds (more particularly by campanian pottery) found in the filling of the kiln.

Béziers (Hérault, région Languedoc-Roussillon), ZAC-de-la-Domitienne, FR1009 (34032A)

A very-well preserved pottery kiln (kiln 1009) was discovered during the rescue excavations (directed by Christian Olive and Daniela Ugolini from the *Service archéologique de Béziers*, Olive *et al.*, 2010) at the ZAC de la Domitienne site located at the periphery of the ancient and contemporary city Béziers (Southern France). The heating room of the kiln had a diameter of 2.85m. The archaeomagnetic blocks were sampled from the well-heated kiln walls and from the central bank. The kiln produced *pithoi*, that are big potteries assigned to stocking.

The interval of date [525BC; 350BC] for the last use of the kiln was determined with pottery sherds from the filling of the kiln.

Bouriège (Aude, région Languedoc-Roussillon), « devant-la-ville », FR1 (11045A), FR6 (11045B) and FR7 (11045C)

The rescue excavation, directed by Pierre Séjalon (*INRAP*), were carried out in Bouriège (Southern France) in 1997. They revealed a pottery workshop formed by 8 kilns (Séjalon, 1998). The preservation of these kilns was very various and only the three most preserved kilns were sampled. The diameters of these kilns were between 1.40 and 2.50 meters.

No stratigraphic links were observed between these three kilns and their use is assumed to be contemporaneous. The site is dated by archaeological methods: the [150BC; 50BC] was determined by italic amphorae (Dressel1A) and local imitations of campanian potteries.

Chartres (Eure-et-Loire, région Centre), Beaulieu, Neolithic kiln (28085F)

The rescue excavation, directed by Laurent Coulon (from the *Service archéologique de la ville de Chartres*), revealed a very well-preserved Neolithic kiln. The kiln, whose the diameter is around 1.00m, was dug in the silty local substrate. The kiln was probably used for cooking or for pottery baking. Eighteen archaeomagnetic blocks were sampled from the plate.

The use of the kiln was dated by four radiocarbon analysis carried out (in the Lyon laboratory) on four charcoals found in the filling of the kiln. The uncalibrated ages are 3935±30BP, 4980±30BP, 4890±30BP and 5030±30BP. After calibration (Intcal04, Reimer, *et al.*, 2004), the four probability density functions were combined using RenDateModel software (Lanos, 2004). The resulting interval of date is [3804BC; 3658BC] (at 95% of confidence), which corresponds to a use of the kiln during the end of the Middle Neolithic.

Chateaumeillant (Cher, région Centre), le Paradis, zoneB, FR172 (18057A)

The *«le Paradis»* archaeological site, at the edge of the Gallic *oppidum* (typical city from the celtic area during the end of the Tène period) of Chateaumeillant is excavated since 2001 by Sophie Krausz (University of Bordeaux 3). In 2008, a gallo-roman pottery kiln was unearthed (Bouchet *et al.*, 2009). The baking chamber of the kiln, which diameter is 1.15m, is constitued by two central banks, that supported the plate. Kiln walls (15 blocks) and central banks (15 blocks) were sampled. Archaeomagnetic results showed movements of the central banks and these blocks have to be rejected.

The use of the kiln was dated in the interval [25AD; 50AD] by potteries (3306 sherds) found in the filling of the kiln. The pottery assemblage (particularly *terra nigra* and *terra sigillata*) is characteristic from the beginning of the gallo-roman period.

Gouy-Saint-André (Pas-de-Calais, région Nord-Pas-de-Calais), le Rossignol, FR23 (62382A), FR78 (62382B), FR24 (62382C), FR60 (62382D) and FR22 (62382E)

The *«le Rossignol»* site in Gouy-Saint-André revealed a workshop specialized in the production of salt, formed by 5 salt-kilns (Masse *et al.*, 2011). Salt-kilns have an elongated shape. Sampling was carried out on kiln walls.

The stratigraphy between five kilns were recovered and each kiln was dated by a radiocarbon analysis performed on a charcoal found in each filling. The stratigraphic constraints are taken into account during the bayesian computation of the secular variation curve. The intervals of date at 95% of confidence (not constrained by the stratigraphy) for kilns are from the most ancient (following the stratigraphy) to the most recent :

- FR78 (62382B): [360CalBC; 90CalBC] (2160±40BP)
- FR23 (62382A): [390CalBC; 180 CalBC] (2220±40BP)
- FR60 (62382D): [400CalBC; 340CalBC] and [320CalBC; 210CalBC] (2120±40BP)
- FR22 (62382E): [390CalBC; 190CalBC] (2230±40BP)

- FR24 (62382C): [370CalBC; 100CalBC] (2170±40BP) FR24 is assumed to be contemporaneous of FR22.

Lattes (Hérault, région Languedoc-Roussillon), Saint-Sauveur, FY54567 (34129A)

The ancient city of *Lattara* (contemporaneous Lattes) was an important native city of southern France during the second half of the first millenium BC. The city has been excavated since 1983 by the team of the *UMR5140 Archéologie des sociétés méditerranéennes* (University of Montpellier 3 and CNRS). Many big courtyard houses dated in the 3rd century BC were discovered (Dietler *et al.*, 2008). The FY54567 hearth was sampled (with the help of Elisabeth Schnepp) in the house 54501. The hearth, 0.90m long and 0.45m wide, was decorated along its periphery by geometric symbols (Moya i Garra *et al.*, 2008).

The dating of the hearth is well-established thanks to the stratigraphy and the numerous pottery sherds. Its use was dated in the interval [300BC; 250BC].

Le Cendre (Puy-de-Dôme, région Auvergne), Gondole, PT1209 (63069A) and FR36 (63069B)

The archaeological site of Gondole is an *oppidum* of the Arverns (ancient people from Auvergne). Excavations directed by Yann Deberge (*INRAP*) in 2008 revealed an artisanal quarter, located outside of the ramparts (Deberge *et al.*, 2009). Two burnt structures were studied, a pottery kiln (FR36) and an hearth (PT1209) built in the filling of a well. about the pottery kiln, only the entrance was sampled. The plate of the hearth is built by amphorae sherds below a thick clay layer.

The occupation of this small artisanal quarter is dated in the interval [60BC; 20BC] by the numerous archaeological artefacts (potteries, coins).

Lunel (Hérault, région Languedoc-Roussillon), Mas-de-Fourques-II, FR2110 (34145A)

Rescue excavation carried out in Lunel Mas-de-Fourques-II and directed by Mathieu Ott (*INRAP*) unearthed a small gallo-roman villa and an isolated pottery kiln dated from the second half of the first millenium BC (Ott & Pancin, 2007). The kiln, very well-preserved, presented a circular (diameter 2.55m) baking chamber, which is dug in the local substrate and is divised by a central bank. The sampling was carried out in the kiln walls and in the central bank. The production of the kiln is still unknown.

The use of the kiln was dated by a radiocarbon analysis carried out on a charcoal found at the entrance of the kiln. The calibrated interval of date at 95% of confidence is [386BC; 201BC] (Uncalibrated age: 2160±40BP), which confirms the archaeological dating.

Lyon, (Rhône, région Rhône-Alpes), Vaise, 4-6 rue-du-Mont-d'Or, FY63 (69123L)

Vaise, a northern quarter of Lyon, was probably the localization of the protohistoric city. Five buildings from the Earlier Iron Age were discovered during one rescue excavation in 2007 directed by Stéphane Carrara (*Service archéologique de la ville de Lyon*) at the 4-6 Mont d'Or Street (Carrara *et al.*, 2009). The living floor of one building (building 64) was particularly well-preserved and revealed the hearth sampled for archaeomagnetic study. This hearth 63 (69123L) was built above a pebble layer. The dimensions of the hearth are 1.10m long for 1.00m wide.

The abundant pottery and amphorae sherds (6205 sherds) found in the layers representative of the use of the house allows to date quite precisely the use of the kilns. This interval of date [500BC; 400BC] was fixed by the presence of amphorae from Marseille, etruscan potteries and attic potteries.

Marlenheim, (Bas-Rhin, région Alsace), Maison-Apprederis, FR70 (67282A)

The archaeological site of Marlenheim, Maison-Apprederis was particularly characterized by an occupation from the latenian period formed by a building, many wells and two pottery kilns (Châtelet, 2006). Only the well-preserved kiln, FR70 (67282A) was sampled. This kiln, with two entrances and a diameter of 0.90m, was dedicated to the production of *dolia* of the Zürich-Lindenhof type.

Potteries found in the filling of the kiln allows the dating of the kiln in the interval [60BC; 30BC].

Marseille, (Bouches-du-Rhône, région Provence-Alpes-Côte-d'Azur), 9 rue-Leca, FR1 (13055K)

During the second half of the first millenium BC, Marseille was the biggest greek city in the western Mediterranean. At the northern of the ancient city, a rescue excavation (directed by Frédéric Conche, *AFAN)* revealed a big kiln below an hellenistic thermal bath (Conche, 1998). The kiln is quite well-preserved. The baking chamber had a diameter of 4.40m. The baked clay was locally vitrified by the high temperatures necessary to bake the amphorae (of the Bertucchi 2 type). Fifteen large blocks were sampled from the kiln walls and from the central bank.

Numerous pottery sherds found in the filling of the kiln allows its precise dating. The interval of date established for the last use of the kiln is [470BC; 400BC] due to the presence of typical attic potteries and amphorae sherds. This type of kiln is currently unique in southern France.

Marseille, (Bouches-du-Rhône, région Provence-Alpes-Côte-d'Azur), place Villeneuve-Bargemon (13055L)

In 1996-1997, a big rescue excavation was carried out in Villeneuve-Bargemon Square at the northern of the «*Vieux-Port*» and at the location of the greek port. Behind the

ancient naval dockyard, a metallurgical workshop for the bronze working was discovered (Rothé & Tréziny, 2005). An hearth long from 1.60m and wide from 0.80m was sampled for archaeomagnetic study.

As pottery sherds were rare in the workshop, the use of the hearth was dated by a radiocarbon analysis (performed in the Poznan laboratory) carried out in two small charcoals included in the baked clay. The uncalibrated ages are 2180±35BP and 2230±30BP. After calibration (Intcal04, Reimer, *et al.*, 2004), the two probability density function were combined using RenDateModel software (Lanos, 2004). The resulting interval of date is [368BC; 193BC] at 95% of confidence,

Mont-Beuvray, (Saône-et-Loire, région Bourgogne), la Côme-Chaudron, FY1977 (58128D), FY3292 (58128E), FY3290 (58128F) and FY3160 (58128G)

The Mont-Beuvray, main city of the Eduan people, was one of the largest *oppidum* of the celtic Europe during the second and first centuries BC. First excavations were performed at the end of the XIX° century AD and at the beginning of the XX° century AD. New excavations, performed by different european teams, began in 1984. The Côme-Chaudron quarter, located near the entry of the *oppidum*, is formed by many small buildings specialized in metal working (Dhenequin *et al.*, 2008). The excavations are directed by Jean-Paul Guillaumet (university of Dijon), Tomasz Bochnak (university of Rzeszow) and Petra Golanova (university of Brno). Four hearths have been samples in 2005 and 2009.

The hearth FY2022 (58128D) is located in the 1977 room. Its shape was rectangular with a length of 0.60m and a width of 0.50m. The thickness of the baked clay was around 2-3cm. The *Terminus Post Quem* (66BC) was defined by dendrochronology carried out on woods from the walls of the room. The *Terminus Ante Quem* (20BC) was established with pottery sherds found in the layers just above the hearth.

The hearth FY3160 (58128G) was located in the upper terrace of the la Côme Chaudron site. Only the half of the hearth was preserved. The hearth was built above a pebble layer. The interval of date [90BC; 10BC] for its use was defined from pottery sherds from the contemporaneous and posterior layers to the hearth.

Also in the upper terrace, two superposed hearths were revealed. The lower hearth is named FY3290 (58128F) and the upper hearth FY3292 (58128E). The FY3290 was built above a pebble layer and the FY3292 above a layer of amphorae sherds. The *Terminus Post Quem* (119BC) of the use the two hearths was defined by a radiocarbon analysis carried out in a small charcoal found at the top of the lower hearth FY3290. The uncalibrated age is 2045±35BP. The *Terminus Ante Quem* (10BC) was established with pottery sherds found in the layers just above the hearth. The stratigraphic constraint between the two hearths is taken into account during the bayesian computation of calibration curves.

Mont-Beuvray, (Saône-et-Loire, région Bourgogne), la Pâture-du-Couvent, FY9534 (58128C)

The Pâture-du-Couvent site is located in the center of the Mont-Beuvray *oppidum*. The hearth sampled FY9534 comes from the room 30 of the north-western angle of the building named Grandes-Forges (Dhenequin *et al.*, 2008). The excavation was directed by Sabine Rieckhoff (university of Leipzig). The hearth FY9534 was 1.00m long and 0.60m wide. It was built during the first phase of the building. The dating [100BC; 50BC] was established with the analysis of pottery sherds found in the layers above and below the hearth.

Montmorillon, (Vienne, région Poitou-Charentes), Rocade-Est, zone 2, FR2008 (86165A)

A kiln of the end of the Later Iron Age was discovered in Montmorillon in 2010 during arescue excavation directed by David Guitton (*INRAP*). The kiln, well-preserved, is typical for this period with its circular baking chamber of 1.00m diameter. The baking chamber was divised by a central bank which was built with granitic stones and which supported the plate of the kiln. Baked clay had a width of 2-3cm. The kiln walls and the entrancy of the kiln were sampled.

The first study of pottery sherds found in the kiln and in the associated features date the kiln from the first century BC (Guitton, pers. comm.), that is in the interval of date [100BC; 1BC].

Moyenvic, (Moselle, région Lorraine), les Crôleurs, FR1003 (MOA), FR2086 (MOB) and FR3074 (MOC)

The archaeological context and the radiocarbon dating of the three salt-kilns from Moyenvic-les-Crôleurs, have already been described in Hervé *et al.* (2010).

Perpignan, (Pyrénées Orientales, région Languedoc-Roussillon), Ruscino, FY5106 (66136E)

The settlement of Ruscino (near the city of Perpignan) on a hill above the Tet valley was occupied from the 8th century BC to the VIIIth century AD. The site was mainly excavated during the XIX° and XX° centuries. Between 2000 and 2002, an excavation (directed by Rémi Marichal and Isabelle Rébé from the *Musée archéologique de Ruscino*) was carried out. A very well-preserved house from the Earlier Iron Age was particularly unearthed, which is exceptional for the southern France (Marichal & Rébé, 2003). The inside features were particularly formed by a small kiln, whose only the plate was preserved, The plate had a diameter of around 0.80m and 13 blocks were sampled.

The use of the kiln was dated by pottery sherds found in the house. The thickness of the archaeological layers indicates a short occupation. The most characteristic potteries for the dating are etruscan amphorae and etruscan *bucchero nero*. They allow a dating in the interval [640BC; 585BC].

Pont-Rémy, (Somme, région Picardie), Fond-de-Baraquin, FR227 (80635A)

Before the building of the A16 motorway in 1995, a rural latenian settlement associated to a small workshop of salt production was excavated (Prilaux, 2000). The rescue excavation was directed by Gilles Prilaux (*AFAN* and next *INRAP*). The salt-kiln of the workshop was 5.50m long and 1.70m wide. The salt was produced by evaporation in small containers put on a grid. Sampling was carried out in kiln walls.

The dating of the kiln [150BC; 90BC] was determined by pottery sherds found in the workshop. The assemblage of sherds is characteristic from the Tène D1 period.

Saint-Martin de Fressengeas, (Dordogne, région Aquitaine), grotte-des-Fraux, FY8 (24453A)

The Fraux cave, discovered in 1989 dated from the Bronze Age is exceptionnal with its cave patterns. The associated features are very-well preserved, as the entrance of the cave collapsed. The cave has been studied and excavated since 2007 by a team directed by Laurent Carozza (CNRS, university of Toulouse 3). The function of this cave remains currently unknown. Thirty-two hearths, more or less large, were by in the cave during the excavation or by magnetic survey (Carozza, 2010). Eighteen small cores were sampled from one of the largest (0.8m^2) and most preserved hearth FY8. The clay is baked between 0.8 and 2.5cm depth.

The use of the hearth FY8 was dated by a radiocarbon analysis carried out (by the Beta laboratory, Miami) in a small charcoal included in the baked clay. The uncalibrated age is 2950±40BP and the calibrated (Reimer *et al.*, 2004) interval of date at 95% of confidence is [1300BC; 1020BC]. This result is rather coherent with the archaeological estimations between 1400 and 1200BC, corresponding to the transition between the Middle Bronze Age and the Final Bronze Age (Carozza, 2010).

Sorrus, (Pas-de-Calais, région Nord-Pas-de-Calais), la Bruyère, zone 3, FR1 (62799A), FR2B (62799B1) and FR2C (62799B2)

The rescue excavation (directed by Yves Desfossés, *AFAN*, currently at the *Service Régional de l'archéologie Champagne-Ardennes*) carried out in 1996 before the building of the A16 motorway revealed at Sorrus, la Bruyère, a workshop of salt-production formed by six kilns and eight wells (Desfossés & Weller, 1999). Kiln-walls of the most-preserved salt-kilns, FR1 and FR2 were sampled for archaeomagnetic studies.

The kiln FR1 (named also 62799A), located in a small enclosure, was 4.20m long and 1.20m wide. As pottery sherds were very rare and do not allow a dating of the use of the kiln, the dating was established by dendrochronology performed in woods found in a well located in the enclosure. In fact, the salt-production technology needed water and it is assumed (at Sorrus) that each kiln was associated to one or more wells (Desfossés & Weller, 1999). The result of the dendrochronology is the interval [190BC; 140BC].

Around 200m far from FR1, FR2 is in fact formed by three successive salt-kilns : FR2B (sampled kiln 62799B1, whose only the south-western wall was preserved), then FR2C

(sampled kiln 62799B2, whose only the north-eastern wall was preserved) and at last FR2A (not sampled). The succession of these three kilns was probably very quick. Their use was dated in the interval [292BC; 180BC] by dendrochronology carried out in woods from two neighbouring wells (Desfossés & Weller, 1999). The stratigraphic succession of 62799B1 and 62799B2 kilns is taken into account for the bayesian computation of the secular variation curves.

Sorrus, (Pas-de-Calais, région Nord-Pas-de-Calais), la-Pâture-à-vaches, FR2 (62799C)

The archaeological site of Sorrus, la Pâture-à-vaches, is located 300m southern from Sorrus, la-Bruyère archaeological site. The rescue excavation revealed a small workshop of salt production. The most-preserved kiln FR2 (62799C) was sampled. As other kilns from Sorrus, the dating [250BC; 200BC] was established by dendrochronological analysis of woods found in the well associated to the kiln (Desfossés & Weller, 1999).

Valence, (Drôme, région Rhône-Alpes), Angle-rue-d'Arménie–rue-Bouffier, FR40 (26362A)

The first layers of the gallo-roman city of Valence (which is more precisely a roman colony) were studied for the first time during rescue excavation at the angle between Arménie Street and Bouffier Street. The rescue excavation was directed by Tony Silvino (*Archeodunum*). One of the main features was a kiln (FR40) apparently isolated (Silvino, 2009). This kiln was maybe a pottery kiln or a baking kiln. The circular baking chamber had a diameter of 1.60m. Twenty samples were sampled from the kiln walls.

The use of the kiln was dated by the potteries (1284 sherds) found in the kiln or in the associated layers. The most characteristic sherds (campanian and *terra sigillata* potteries from Italy) allows the dating in the interval of date [50BC; 30BC], which is almost contemporaneous of the date for the city foundation mentionned in texts (between 40 and 30BC).

Vix, (Côte d'Or, région Bourgogne), Sondage Mont-Lassois-Est (21711A)

Vix, located in Burgundy in the Seine valley, is one of the most famous site from the Iron Age in Europe. The hallstattian settlement is formed by very rich tombs and exceptionnal buildings established in a hill named Mont-Lassois. In 2009, a kiln was accidently discovered below the Mont-Lassois during archaeological test excavations for the study of the paleoenvironment of the Seine river during Iron Age (Chaume & Wirth, 2010). The kiln was not fully excavated : its function remains consequently unknown and its diameter was apparently around 1.00m.

The dating of this kiln was determined by a radiocarbon analysis performed on charcoal found just above the plate of the kiln. The uncalibrated age is 2400±40BP. Many intervals of date at 95% of confidence were obtained after calibration because of the plateau effect in the dendrochronological calibration curve (Reimer *et al.*, 2004) :

[749BC; 687BC], [666BC; 643BC], [592BC; 577BC] and [568BC; 393BC]. The last interval is the most probable (76.9% of confidence) and the example of Vix kiln illustrates the interest to use the probability density function as *a priori* dating for the bayesian computation of the secular variation curve.

Archaeological references (appendix A) :

Bouchet, M., Surgent, M., Hervé, G., 2009. Le four de potier gallo-romain de Chateaumeillant/*Mediolanum* (Cher). Etudes céramique et archéomagnétique., *SFECAG, Actes du congrès de Colmar (21-24 mai 2009)*, 441-452

Carrara, S., Monin, M., Bertrand, E., Mège, C., 2009. Les habitats de la fin du VI^{ème} et du V^{ème} s. av. J.-C., rue du Mont d'Or à Lyon-Vaise (Rhône), *Bulletin de l'association française pour l'étude de l'âge du Fer*, 27, 13-18

Carozza, L., 2010. *L'âge du Bronze de la grotte des Fraux, Saint Martin de Fressengeas (Dordogne)*, Rapport de fouille programmée triannuelle 2008-2010, SRA Aquitaine, 226 p.

Châtelet, M. (dir.), 2006. *Marlenheim « Maison Apprederis » (Bas-Rhin). Du premier âge du Fer à l'époque médiévale : à l'origine du village actuel*, Document Final de Synthèse, INRAP Grand Est Nord, Strasbourg

Chaume, B., Wirth, S., (dir.), 2010. *Projet collectif de recherche, rapport 2010, Vix et son environnement*, Dijon, Université de Bourgogne, 216 p.

Conche, F. (dir.), 1998. *Marseille, 9 rue Jean-François Leca, Document final de synthèse*, SRA Provence Alpes Côte d'Azur, AFAN, 2 volumes, 533 p.

Deberge, Y., Cabezuelo, U., Cabanis, M., Foucras, S., Garcia, M., Gruel, K., Loughton, M., Blondel, F., Caillat, P., 2009. L'*oppidum* arverne de Gondole (Le Cendre, Puy-de-Dôme). Topographie de l'occupation protohistorique (La Tène D2) et fouille du quartier artisanal : un premier bilan, *Revue archéologique du Centre de la France*, 48, 33-130

Desfossés, Y. & Weller, O., 1999. *Sorrus, la »Pâture à vaches » et la »Bruyère »,* Document Final de Synthèse, SRA Nord Pas-de-Calais, 121 p.

Dietler, M., Kohn, A., Moya i Gara, A., Rivalan, A., 2008. Les maisons à cour des III^{ème}-II^{ème} siècles av. J.-C. à Lattes, émergence d'une différenciation dans l'habitat indigène, *Gallia*, *Dossier Lattara/Lattes (Hérault), nouvelles données, nouveaux acquis sur une ville portuaire protohistorique et romaine,* 65, p. 111-122

Dhenequin, L., Guillaumet, J.P., Szabó, M. dir., 2008. L'*oppidum* de Bibracte (Mont-Beuvray, France). Bilan de 10 années de recherche (1996-2005), *Acta Archaeologica Hungarica*, 59

Gomez, E., 2002. Aspects de la colonisation d'Agde et de l'exploitation de son territoire : le site de Saint-Michel du Bagnas. Mémoire de DEA, Université d'Aix en Provence, France

Marichal, R., Rébé, I., 2003. *Les origines de Ruscino (Château-Roussillon, Perpignan, Pyrénées-Orientales) du Néolithique au premier âge du Fer,* Monographies d'archéologie méditerranéenne, 16, Lattes, 300 p.

Masse, A., (dir.), Tachet, N., Chombart, J., Delage, M., Meurisse-Fort, M., 2011. *Gouy-Saint-André « le Rossignol », Rapport final d'opération de fouille archéologique*, Dainville, Centre départemental d'archéologie, Pas-de-Calais, 232 p.

Moya i Garra, A., Munos, S., 2008. Recherche sur l'habitat récent de Lattes, une maison à cour centrale du III^{ème} siècle av. n.è. : la zone 54, *Lattes 2008, Rapport intermédiaire 2008,* UFRAL, Lattes, 115-152

Olive, C., Ugolini, D., Ratsimba, A., Jandot, C., Wiégant, J.P., 2010. Un four de potier de l'Age du Fer pour la cuisson de *pithoi* à Béziers (Herault), production, diffusion et fonction du *pithos* dans le Midi (VI^{e}-IV^{e} s. av. J.-C.), *Gallia,* 66, 2, 29-57

Ott, M., Pancin, S., 2007. *Mas de Fourques II à Lunel (Hérault), Rapport final d'opération de fouille archéologique*, SRA Languedoc-Roussillon, Montpellier, 158 p.

Prilaux, G., 2000. *La production du sel à l'Age du Fer, contribution à l'établissement d'une typologie à partir des exemples de l'autoroute A16*, Eds Monique Mergoil, AFAN, Coll. Protohistoire européenne, vol 5, 109 p.

Rothé, M.P., Tréziny, H., 2005. *Marseille et ses alentours*, Carte archéologique de la Gaule 13/3, Académie des inscriptions et des belles-lettres, p. 468-483

Séjalon, P., 1998. Un atelier de potiers gaulois des années 150/50 av. n.è. à Bouriège (Aude), *Revue archéologique de Narbonnaise*, 31, 1-11

Silvino, T., (dir.), 2009. *Valence, angle rue-d'Arménie – rue Bouffier*, Rapport Final d'Opération, Archéodunum SA, SRA Rhône-Alpes, 328 p.

Appendix B: New dating of Albinia kilns (Hill *et al.*, 2007).

Five amphorae kilns from Albinia (Tuscany, Italy) were studied by Hill *et al.* (2007). Kilns were previously dated in the interval [-200; 100] AD. New informations about the chronological context of the kilns were published in Vitali *et al.* (2007).

The new dating of the five Albinia kilns are more precise :

- kiln A: [-100; 0] AD
- kiln B: [-100; 0] AD
- kiln C: [-100; 0] AD
- kiln D: [0; 100] AD
- kiln E: [-100; 100] AD

The dating of the amphorae, studied for archaeointensity, remains unchanged, [-100; 0] AD.

Appendix C: Directional bivariate curve in Western Europe at Paris.

t (AD)	N	W	I (°)	D(°)	α_x	α_y	Ω (°)
-1450	7	24.3	69.3	-2.6	2.2	2.3	4.8
-1400	7	46.5	69.4	-0.3	1.8	1.9	179.7
-1350	11	74.2	69.2	0.7	1.4	1.5	169.5
-1300	11	89.9	68.9	1.4	1.3	1.4	159.4
-1250	11	78.9	68.4	2.3	1.4	1.5	146.1
-1200	11	62.8	67.9	3.6	1.5	1.6	130.5
-1150	11	44.4	67.4	6.7	1.7	2.0	90.6
-1100	5	41.5	67.3	9.3	1.7	2.3	78.6
-1050	7	46.1	66.8	12.8	1.7	2.1	71.9
-1000	9	53.2	65.4	14.5	1.5	1.8	47.2
-950	11	57.1	64.8	17.2	1.5	1.9	47.9
-900	14	77.0	65.7	22.9	1.4	1.8	56.4
-850	16	102.4	66.9	27.5	1.3	1.4	64.7
-800	17	132.5	67.6	28.3	1.0	1.1	123.0
-750	18	136.9	68.0	26.5	1.0	1.1	120.3
-700	18	115.3	68.9	23.6	1.1	1.2	116.1
-650	20	96.7	70.2	18.3	1.1	1.3	93.3
-600	16	88.0	71.0	11.7	0.9	1.3	61.5
-550	18	130.3	71.0	9.4	0.8	0.9	61.5
-500	18	160.8	71.4	6.1	0.8	0.8	137.8
-450	24	166.6	71.1	4.5	0.8	0.9	166.6
-400	27	149.9	69.9	-0.1	1.0	1.1	175.9
-350	26	156.6	68.6	-3.3	0.9	1.0	168.9
-300	21	180.9	68.3	-4.7	0.8	0.9	152.7
-250	23	189.9	68.4	-4.7	0.8	0.9	145.6
-200	30	183.5	68.2	-4.1	0.7	0.9	145.3
-150	49	370.3	67.3	-2.1	0.5	0.5	148.4
-100	52	559.7	67.1	-2.0	0.4	0.4	152.7
-50	71	730.1	66.8	-2.2	0.3	0.4	153.1
0	85	842.9	65.5	-2.3	0.3	0.4	165.8

Mean archaeomagnetic directions in Western Europe between 1450BC and 0AD. Directions are obtained by the bivariate statistic (Le Goff, 1990; Le Goff et al., 1992) with sliding windows of 160 years shifted every 50 years. The comparison of these results with directions of Gallet et al. (2002, Table 3) illustrates the improvements of the directional secular variation curve in Western Europe thanks to the acquisition of new reference data.

From left to right: mean age of the 160-years window; number of sites in the window; sum of weights relative to sites in each window; Inclination; Declination; 95% dispersion angles of the ellipse of the bivariate statistic; angle between the elongation direction of the confidence ellipse and the mean meridian

Chapitre 9

Variation séculaire de l'intensité du champ géomagnétique en Europe Occidentale au premier millénaire av. J.-C.

Article : New archaeointensity data from France and variation of the geomagnetic dipole during the first millennium BC

(à soumettre)

Gwenaël Hervé, Annick Chauvin, Philippe Lanos

Abstract

In order to extend the secular variation curve (SVC) of archaeointensity in Western Europe to the first millennium BC, 24 kilns and hearths and 8 sets of pottery sherds from French archaeological sites were studied. The time acquisition of the thermoremanent magnetization (TRM) was dated by archaeological artefacts, by radiocarbon or by dendrochronology. Rock magnetism experiments (thermomagnetic curves, Isothermal Remanent Magnetization acquisition) suggest that the main carrier of the magnetization is a Ti-poor titanomagnetite. The direction of the Characteristic Remanent Magnetization was determined by thermal and alternating field demagnetizations. Archaeointensity was determined by the Thellier-Thellier classical protocol with pTRM-checks. The direction of the laboratory field was applied with a strong angular deviation with the NRM direction, in order to better detect mineralogical evolutions. A strict

criteria set was applied to select only the most reliable specimens with linear NRM-TRM diagram (55% of total specimens). Archaeointensities were corrected from the effects of the anisotropy of TRM and cooling rate. This study demonstrates that pottery sherds with two components of magnetization give reliable archaeointensities in the interval of unblocking temperatures of the low-temperature component, if the NRM-TRM diagram is adequately adjusted. Eighteen mean archaeointensities were computed. The comparison with previously published Western Europe data show a strong dispersion between data primarily due to their variable quality. Western Europe data were weighted following the archaeointensity protocol, the number of specimens per site and the type of studied materials, in order to better highlight the secular variation of archaeointensity during the first millennium BC. The SVC, built with sliding windows of 160 years shifted every 50 years, presents a maximum of 90µT around 800BC and a minimum of 60µT around 250BC at Paris. This new curve is consistent with Mesopotamian and Eastern Europe data**.** The archaeointensity secular variation in Western Europe predicted by global geomagnetic models CALS3k.4, ARCH3k.1 and ARCH3k_cst.1 is smooth and our new data (within other data sets) will allow improvements of future models. The archaeointensity maximum in 800BC and the minimum in 250BC correspond to cusps of the geomagnetic field direction in Western Europe. These periods are maybe linked to a stronger non-dipolar field. But the number of data outside Western Eurasia has to be increased to validate this assumption. Finally, we note that the strong variations of intensity of the geomagnetic field (with a mean decrease rate per century close to 6µT) will be useful for archaeomagnetic dating purposes.

1. Introduction

Beyond 1832AD and the first direct measurements of the absolute intensity of the geomagnetic field, the estimation of the past field strength relies on archaeomagnetic and volcanic materials. These data give fruitful knowledge of the geometry of the magnetic field at the Earth's surface and at the Core Mantle Boundary (Jackson & Finlay, 2007) and consequently about the geodynamo in terms of core processes and its interactions with the mantle (Gubbins *et al.*, 2007). The knowledge of the past intensity variation is also used for others purposes such as archaeomagnetic dating (see for

example Gomez-Paccard *et al.*, 2008; Kostadinova and Kovacheva, 2008; Gallet *et al.*, 2009a) or calibration of cosmogenic nuclides dating methods (Lifton *et al.*, 2008).

Compared to the direction of the geomagnetic field, the secular variation of the intensity remains quite unknown, as many problems can occur during the palaeointensity protocols (Dunlop, 2011). The main problems are unstable ferromagnetic grains, multidomain grains (Biggin *et al.*, 2007; Dunlop *et al.*, 2005; Chauvin *et al.*, 2005) or inappropriate remanence (Draeger *et al.*, 2006; Fabian, 2009). Moreover, palaeointensities have to be corrected for the effects of the anisotropy of the thermoremanent magnetization (TRM) and of the cooling rate upon TRM intensity (Chauvin *et al.*, 2000). These problems were recognized long time ago (see for example Levi, 1977; McClelland-Brown, 1984), but have only been investigated more closely in recent years.

These recent improvements of protocols allow a significant increase in the number of reliable published archaeointensities mainly in Europe and the Near East (Gallet *et al.*, 2006; Shaar *et al.*, 2011a) from which around 60 per cent of all data (following Geomagia50v2 database, Donadini *et al.*, 2009) are computed. Data from South-America (Hartmann *et al.*, 2011; Goguitchaichvili *et al.*, 2011), Meso-America (Rodriguez-Ceja *et al.*, 2009; Alva-Valdivia *et al.*, 2010) and South-Western Pacific (Stark *et al.*, 2010) have alsobeen recently published. Therefore the global coverage of intensity data is increasing, which is fruitful for global geomagnetic modelling (Korte *et al.*, 2009; Korte & Constable, 2011).

In Western Europe, many studies (Chauvin *et al.*, 2000; Genevey *et al.*, 2002; Genevey *et al.*, 2009; Gomez-Paccard *et al.,* 2006 and 2008) allow the building of a secular variation curve over the last two millennia. The lack of data during the second half of the first millennium AD (that is Early Middle Ages) is currently being filled (Sapin *et al.*, 2008; Gallet *et al.*, 2009a; Tema *et al.*, 2009; Catanzariti *et al.*, 2012 ; Gomez-Paccard *et al.*, 2011a and b). But the extension of the curve to the millennia BC is currently limited by the lack of reliable data corrected for anisotropy of TRM and cooling rate effects. So far, only six results dated in the first century BC (Hill *et al.*, 2007) and two others dated between the eighth and the sixth century BC (Hill *et al.*, 2008; Gallet *et al.*, 2009a) heve been published. These studies indicate a strong variation of the archaeointensity during the first millennium BC.

To complete the data set and make clear these variations, we investigated twenty-four in place structures (kilns or hearths) and nine sets of displaced materials. Eighteen new mean archaeointensities were added to the Western Europe data set. Together with peviously published data, it allows the extension of the secular variation curve over the first millennium BC. Our results will contribute to the future improvements of geomagnetic models and will also be used for archaeomagnetic dating purposes.

2. Archaeological sampling

2.1 Kilns and hearths

The twenty-four kilns (pottery kilns, amphorae kilns, salt kilns or baking kilns) and hearths were sampled all over France (Fig. 1 and 2a). These structures are dated between the end of the second millennium BC and the transition BC/AD by archaeological (i.e. stratigraphy and archaeological artefacts) or chronometric (radiocarbon and dendrochronology) methods. Between six and 27 large blocks were sampled using the plaster cap method and they were oriented using a magnetic compass and also a sun compass for 18 structures. The 24453A hearth was sampled by a method inspired from the soft core technique of Schnepp *et al.* (2008). Large blocks were cut in the laboratory into small cubic specimens (8 cm^3) after a consolidation by sodium silicate. The dating and sampling of these 24 structures (Tab. 1) are detailed in Hervé *et al.* (submitted), that presents their archaeodirection results together with 15 others archaeological structures.

2.2 Displaced materials

The hearths 33296A from Mouliets-et-Villemartin (Lacoste, Fig. 2b) and 47323B from Villeneuve-sur-Lot (la Dardenne-Haut) are composed of a lower layer of horizontally put pottery sherds and an upper layer of a thick (2cm) plate of baked clay. As the plates were broken, the samples of baked clay (6 for 33296A and 11 whose 4 with inclusions of a pottery sherd for 47323B) were not oriented. Eleven sherds from 33296A hearth and 13 from 47323B hearth were collected. During the last heating of each hearth, both material are assumed to acquire contemporaneously a thermoremanent magnetization (TRM). The archaeological artefacts found in the associated layers date the use of both

hearths. Baked clay fragments were cut in 8 cm^3 cubic specimens. Each sherd was divided in at least four specimens (around 1 cm^3), each one packed into cylindrical quartz holder filled by quartz wool. The Z axis corresponds to the thickness of the pottery sherd, that is approximatively to the vertical during TRM acquisition.

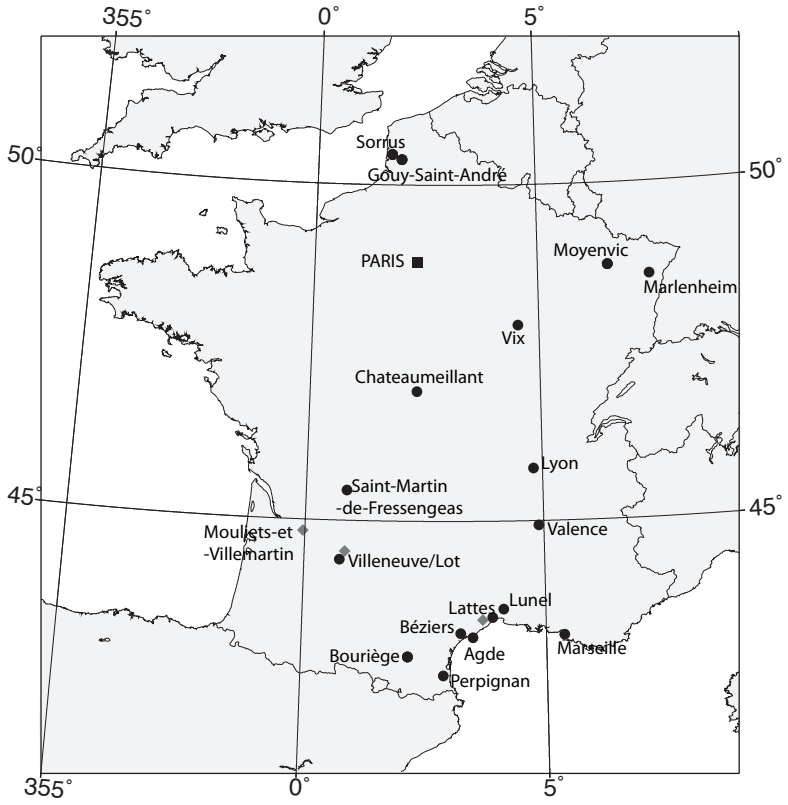


Figure 1: Location of archaeomagnetic sites with in place (squares) or displaced (diamonds) material.

Six sets (called 34129B to 3412G) of 11 or 12 pottery sherds were also collected in the archaeological site of Lattes Saint-Sauveur (Figs. 1 and 2c). This site was a small indigenous city of Southern France during the second half of the first millennium BC (Py, 2009). Each set was sampled from an archaeological layer that is very well dated with stratigraphic constraints. Only domestic common potteries, not-wheeled and used for cooking, were choosen for two reasons. First, they were produced locally contrary to higher-quality fine ceramics, for which the production area is very imprecise or unknown. Secondly, cheap domestic potteries were daily used and consequently often changed: the production of the pottery, which is the moment of the acquisition of the thermoremanent magnetization (TRM) is consequently assumed to be equivalent to the dating of the archaeological layers. The hypothesis of use from generation to generation

of finer ceramics cannot be excluded. Therefore the dating of their TRM acquisition could be difficult and not accurate. Selected sherds are generally grey-colored, which shows a baking into quite reducing atmospheric conditions. In the laboratory, the pottery sherds were prepared with the same protocol as those from Mouliets-et-Villemartin 33296A and Villeneuve-sur-Lot 47323B (see above).

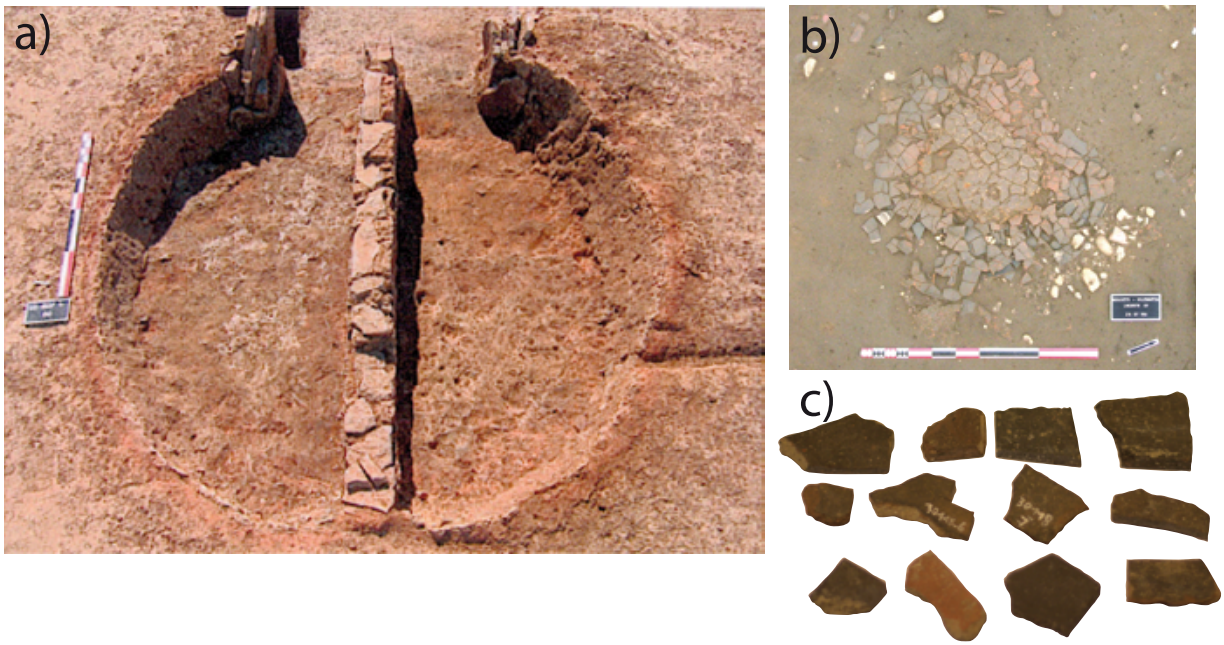


Figure 2: a) Pottery kiln 34129A from Lunel, Mas-de-Fourques b) Hearth 33296A from Mouliets-et-Villemartin formed by a pottery sherd layer below a thick plate of baked clay, c) representative set of pottery sherd from Lattes (34129G)

3. Archaeodirections and rock magnetism

Remanent magnetizations were measured with a 2G cryogenic or with a Molspin spinner magnetometers. The samples from kilns and hearths are characterized by a Natural Remanent Magnetization (NRM) between 0.05 and 20 A/m and by a low field susceptibility (measured with a Bartington MS2 susceptibility meter) between 10^{-4} and 10^{-1} SI (Fig. 3left). Pottery sherds specimens have a NRM between $1x10^{-4}$ and $5x10^{-3}$ Am^2kg^{-1} and a low field susceptibility between $3x10^{-8}$ and $1x10^{-5}$ m^3kg^{-1} (Fig. 3right).

3.1 Thermal and alternating field demagnetizations

Prior to the intensity experiments, thermal and alternating field demagnetizations were carried out on one specimen of each large block or pottery sherd, in order to identify the number of magnetization components and select samples accordingly. This pilot demagnetization also allow the characterisation of the direction of the thermoremanent magnetization (TRM). Thermal demagnetization were performed in a MMTD oven and stepwise alternating field demagnetization using a Schonstedt demagnetizer or a 2G-AF demagnetizer in line with the 2G cryogenic magnetometer.

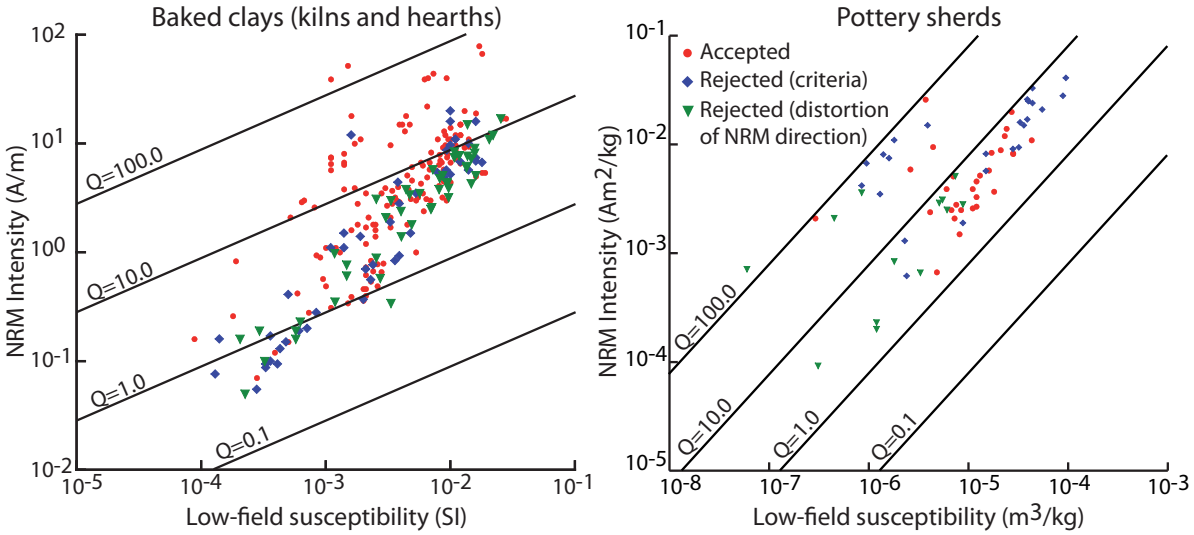


Figure 3: NRM intensity (A/m) versus bulk susceptibility (SI) for kilns and hearths (left) and pottery sherds (right). Koenigsberger ratio (defined as the ratio of NRM to the induced magnetization, a field of 80 A/m was used) isolines are shown. Accepted specimens during archaeointensity experiments are plotted by red circles. Rejected samples by the selection criteria are plotted by blue diamonds and rejected due to deviation of the NRM directions by green triangles.

In the case of in place hearths and kilns, only samples carrying a single component of magnetization (acquired during the last heating of the structure) were selected for the archaeointensity experiment. Indeed, the presence of two components of magnetization is due to an insufficient heating to remove the previously acquired magnetization, which makes the sample unsuitable for archaeointensity.

The pottery sherds and the four baked clay fragments with an inclusion of sherds from 33296B (Mouliets-et-Villemartin) and 47323B (Villeneuve-sur-Lot) hearths carry two

components of magnetization, whereas other baked clay fragments have a single component magnetization (Fig. 4a). For sherds, the high-temperature component was acquired during the baking of the pottery sherds. The low-temperature component of magnetization was acquired during the re-use of pottery sherds in the hearth. As the sample 33296B-T14D (Fig. 4a), the low-temperature component has after the correction for the anisotropy of TRM inclinations around 60-70° (or corresponding negative values) which are consistent with horizontal heating of the sherd *in situ* in the hearth. As the dating corresponds to the use of the hearth, the archaeointensity has to be determined in the temperature range of the low-temperature component of magnetization.

The results of pottery sherds from Lattes are more difficult to interpret. They have a single component of magnetization, probably acquired during their baking, or a complex behavior with two or more components of magnetization (Fig. 4b). This last behavior is explained by the domestic use of pottery for cooking. Only the sherds with a single component of magnetization were selected, that is 44 of the 71 sherds from the six collections.

3.2 Magnetic mineralogy

In order to investigate the carriers of the TRM of the selected samples for archaeointensity studies, thermomagnetic curves and isothermal remanent magnetization (IRM) acquisition were carried out. Thermomagnetic curves were obtained for 137 chips with a KLY3 Agico susceptibility meter with fitted furnace by heating-cooling cycles successively up to 400-450°C and 600-620°C. 57 IRM acquisition curves until 1.2T and backfield curves were performed using an ASC impulse magnetizer.

Following IRM curves (Fig. 5), the magnetization is mainly carried by low-coercivity magnetic phases, as the IRM of 80 per cent of specimens is (or almost) saturated in a field below 300mT. A high coercivity ferromagnetic mineral is also present in samples of salt kilns from Northern France (62799A-B1-B2-C, 62382B-D-E) and in pottery sherds from Mouliets-et-Villemartin (33296A) and Villeneuve-sur-Lot (47323B) hearths. This high-coercivity mineral is probably a (titano)hematite, as unblocking temperatures are

higher than 600°C. Saturation remanence (Jrs) and the coercivity of remanence (Hcr) of samples are presented in the supplementary material together with archaeointensity results. The Hcr are mainly between 19 and 26mT, except for kilns from Bouriège (11045A-B-C) and above mentionned specimens with titanohematite which have Hcr value around 40mT or much higher (285mT for 62799C-10 specimen).

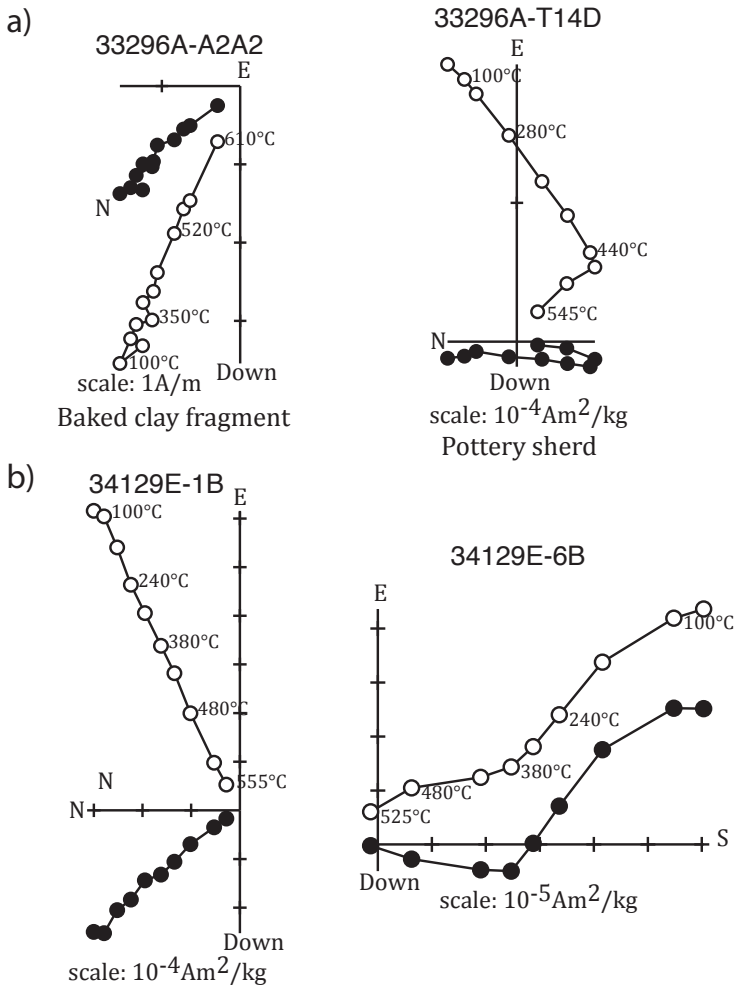


Figure 4: Representative thermal demagnetization results. (a) Results for baked clay fragments (left) and pottery sherds (right) from Mouliets-et-Villemartin hearth (similar to 47323B Villeneuve-sur-Lot hearth). Plots are in sample coordinates. However, the z-axis of both specimens corresponds to the vertical during the acquisition of the thermoremanent magnetization. (b) Results for pottery sherds of Lattes: on the left, sample carrying a single component of magnetization, which have been selected for archaeointensity experiment. On the right, sample carrying a complex natural remanent magnetization rejected for archaeointensity experiment.

The most usual Curie points are between 540 and 585°C (Fig. 6), that indicates the dominant low-coercivity minerals are Ti-poor titanomagnetites. Ferromagnetic phases with Curie points around 350-450°C and 150-200°C are also observed and suggest that Ti-rich titanomagnetites are also present in some samples. The shape of these curves also points out the variability of the magnetic mineralogy between structures, within a structure and even within a same block especially for kilns. Thermomagnetic curves are reversible after the first heating-cooling cycle until 400-450°C (Fig. 6), but for some samples mineralogical evolutions are supposed to occur at higher temperatures during the archaeointensity experiment.

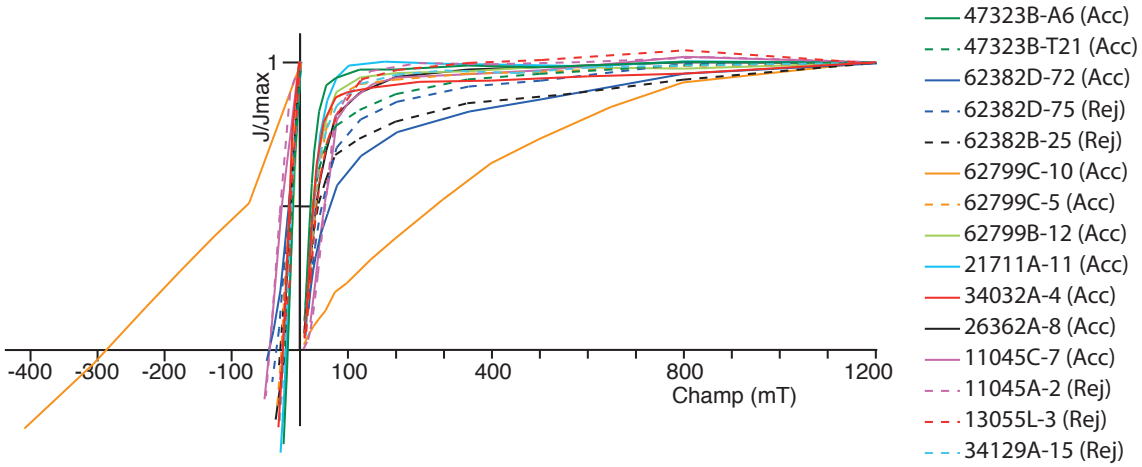


Figure 5: Representative normalized isothermal remanent magnetization acquisition and backfield curves. Acc/Rej indicates Accepted/Rejected archaeointensity results.

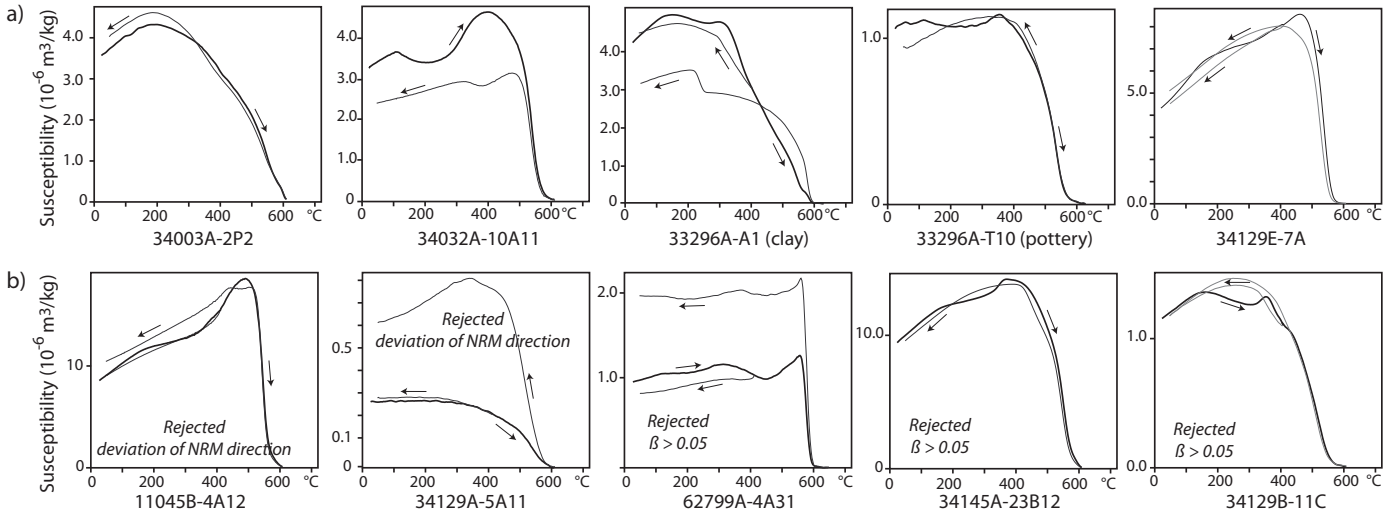


Figure 6: Representative thermomagnetic curves of sisters-specimens from specimens with (a) accepted and (b) rejected archaeointensity results.

4. Archaeointensity study

4.1 Protocol

Archaeointensities were determined by the classical Thellier-Thellier method (Thellier and Thellier, 1959) with partial thermoremanent magnetization (pTRM) checks on 328 specimens. Heating steps were realized in air in a MMTD oven or in a homemade oven. Experiments were also realized in vacuum on eight pottery sherds from Lattes. At each temperature step, specimens were heated and cooled twice, first in a laboratory field $+F_{lab}$ and secondly in the opposite field $-F_{lab}$. The intensity of the laboratory field was fixed at 60 or 70µT. Laboratory field was applied with a large angular deviation with the NRM direction (higher than 60°), in order to better detect unsuitable specimens due to mineralogical evolutions (Hervé *et al.*, 2011) or pseudo-single domain (PSD) and multidomain (MD) grains (Yu *et al.*, 2004; Biggin, 2006). Eight to thirteen temperature steps were performed from 100 to 605°C. Low field susceptibility was measured after each heating step.

The anisotropy of TRM tensor was determined on each specimen of 15 structures, when 70 per cent of the initial NRM was removed (that is usually between 450 and 550°C). Six successive heatings were performed with a laboratory field applied along +x, -x, +y, -y, +z and –z axis of the specimens. A thermal stability check followed these heatings. The archaeointensity was individually corrected (Veitch *et al.*, 1984; Chauvin *et al.*, 2000).

Archaeointensity of samples from 17 structures were also corrected from cooling rate effects (Fox and Aitken, 1980; Genevey and Gallet, 2002; Chauvin *et al.*, 2000). The cooling rate correction was not applied for others structures, as they give unreliable archaeointensity results (except 34129B). We used the procedure in four heating steps described by Gomez-Paccard *et al.* (2006). The first and second steps are classical Thellier-Thellier ($+F_{lab}$ and $-F_{lab}$) steps with a fast cooling (around 1.5 hour). The third $+F_{lab}$ step is carried out with a slow cooling rate and finally the fourth $-F_{lab}$ step with a fast cooling is a stability check. The slow cooling rate defined to mimic the original cooling was chosen following the nature and the size of the archaeological structures. The cooling time was fixed around 12 hours (0.4°C/min) for hearths and small (that is with a diameter smaller than 1m) kilns and around 24 hours (0.8°C/min) for bigger kilns.

4.2 Archaeointensity results and selection criteria

Ideal archaeointensity results consist in linear NRM-TRM diagram, which is theoretically only observed for non-interacting single-domain (SD) grains. Pseudo-single domain (PSD) and multi-domain (MD) grains typically give concave-up NRM-TRM diagrams (Levi, 1977; Dunlop *et al.*, 2005), but can give reliable archaeointensities, if they are properly interpreted (Coe *et al.*, 2004; Chauvin *et al.*, 2005; Shaar *et al.*, 2011b). For archaeomagnetic materials, the main problem is mineralogical alteration during successive laboratory heatings, which are indicated by negative pTRM-checks and an obvious distortion of the NRM direction towards the direction of the laboratory field (Fig. 7). pTRM-checks were considered positive, if at a given temperature step, the difference between the original pTRM and the pTRM check does not exceed 10 per cent of the total TRM acquired. The distortion can only be detected with classical Thellier-Thellier, Aitken (Aitken *et al.*, 1988) and IZZI (Yu *et al.*, 2004) protocols and if the laboratory field F_{lab} has a large angular deviation with the NRM direction (Hervé *et al.*, 2011), which is the case for all our specimens. If F_{lab} and NRM are parallel, the distortion is not visible and the detection of unreliable archaeointensities is much more difficult: for example, without the distortion of the NRM direction, the archaeointensity computed between 100 and 320°C for specimen 11045B-4A12 (Fig. 7a) would be accepted.

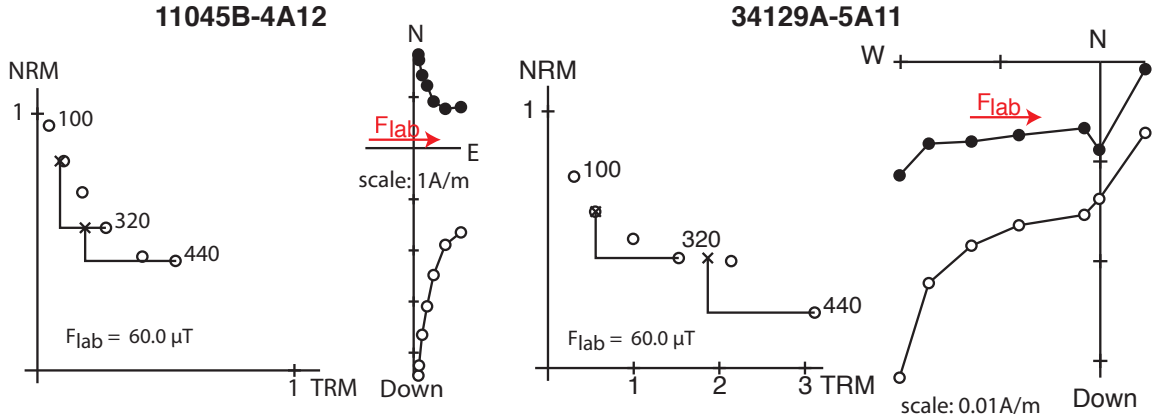


Figure 7: Examples of rejected specimens because of a strong distortion of the NRM direction towards the direction of the laboratory field. This distortion indicates that mineralogical evolutions occur, even if they not detected by pTRM checks. Directions in the orthogonal plots are shown in sample coordinates. Temperatures are indicated in Celsius degrees.

As they show such obvious mineralogical evolutions, archaeointensity was not computed for 78 specimens (24 per cent of total specimens). Almost all specimens from 24453A, 11045A, 11045B, 18057A and 34129F structures were rejected. For others specimens (see supplementary material), the archaeointensity was computed from the first or second temperature step to the last step before any CRM acquisition.

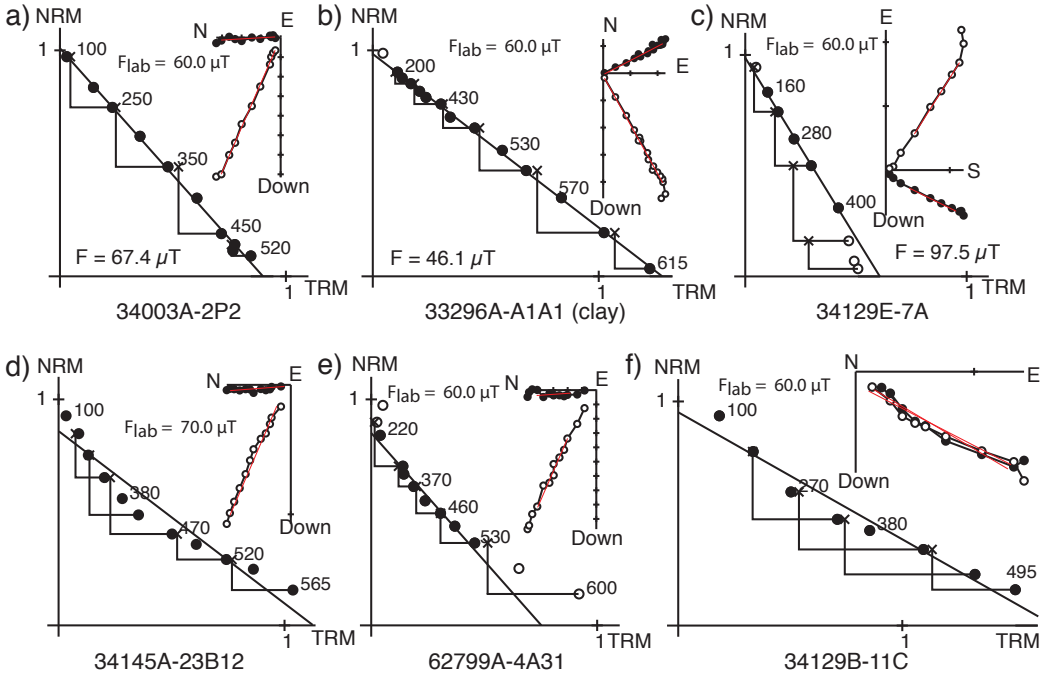


Figure 8 : Representative archaeointensity results. Archaeointensity is estimated in the interval of temperature for which no mineralogical alteration is detected by negative pTRM checks or strong distortion of the NRM direction towards the laboratory field direction. a-c : accepted specimens following defined selection criteria; d-f : rejected specimens. Directions in the orthogonal plots are shown in in situ coordinates. Temperatures are indicated in Celsius degrees.

NRM-TRM diagrams are linear for 60% of specimens and concave-up for the others (Fig. 8). Positive pTRM-checks and no significant variation of low-field susceptibility could indicate that concave-up NRM-TRM diagrams are induced by the presence of large magnetic grains. But in this case, the slope of the line through the first and final temperature steps yields the expected field strength (Biggin and Thomas, 2003; Chauvin *et al.*, 2005), that should be equal to the archaeointensities computed from linear NRM-TRM diagram. The Figure 9a shows that specimen 34145A-23B12 with concave-up NRM-TRM diagram (Fig. 8d) gives a much lower archaeointensity than other specimens with perfectly linear NRM-TRM diagram (see also supplementary material).

Consequently, the concave-up behaviour is probably due to mineralogical evolutions, that are not detected by pTRM-checks. Positive pTRM-checks are consequently not sufficient to prove that no mineralogical evolutions occur during the archaeointensity protocol. For many sites (as 62799A, Fig. 9b, but also 13055K, 13055L, 34129A, 34129B, 34129D, 34129E and 34129G), concave-up NRM-TRM diagram are probably also due to mineralogical evolutions, as archaeointensities are very scattered. Only for two sites (21711A, Fig. 9c and 69123L), linear and concave-up NRM-TRM diagrams give quite similar slopes, which do not exclude the hypothesis of the presence of PSD or MD grains.

As concave-up behaviour is mainly due to mineralogical evolutions rather than MD grains effect, only the most reliable archaeointensity estimations with linear NRM-TRM diagrams were selected following a strict criteria set (Hervé *et al.*, 2011): NRM fraction factor f (Coe *et al.*, 1978) higher than 0.4, maximum angular deviation (MAD, Kirschvink, 1980) lower than 5°, deviation angle (DANG, Selkin & Tauxe, 2000) lower than 5° and the ratio of the standard error of the slope to the absolute value of the slope (ß) lower than 0.05. All these criteria were followed by 180 specimens, for which the f factor is generally higher than 0.7 (Fig. 8a-c). It yields a success rate of 55%, varying per structure from 0 to 100%. The rejection criteria is for most specimens a high values of ß (between 0.05 and 0.10 usually) due to a slightly concave-up NRM-TRM diagram (Fig. 8d-e).

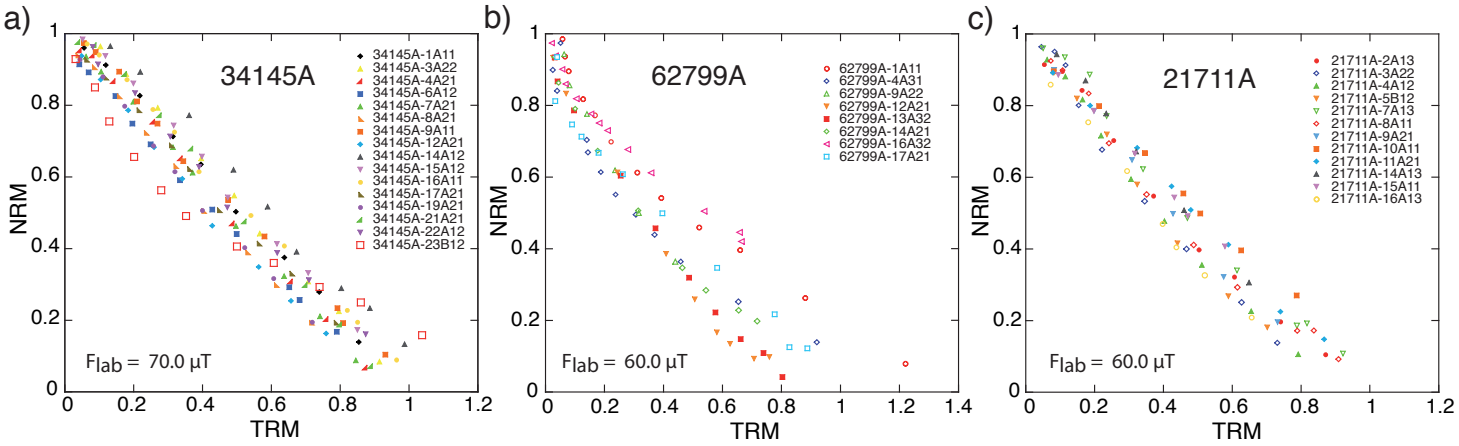


Figure 9: Composite NRM-TRM diagrams of 34145A, 62799A and 21711A structures. Each panel shows the behaviour of all samples with positive pTRM checks and no strong distortion of NRM towards the laboratory field direction. Closed (open) symbols represent specimens with a linear (concave-up) NRM-TRM diagram. The rejected specimen of 34145A structure is plotted line in Figure 8e.

No	Site	Structure	Lat (°N)	Long (°E)	T_{mean}	*TPQ*	*TAQ*	Meth.	N_{dir}	D_s (°)	I_s (°)	α_{95} (°)	N_{int}/N_o	F ± s.d. (µT)	F_w (µT)	F_{wa} ± s.d. (µT)	F_{wcr} ± s.d. (µT)	Cooling rate	F_{PVADM} (µT)	F_{PVDM} (µT)	VADM (10^{22} A/m^2)	VDM (10^{22} A/m^2)
24453A	St-Martin-de-Fressengeas / Grotte des Fraux / FY8	Hearth	45.447	0.854	-1160	-1300	-1020	^{14}C	15	-8.3	65.6	2.3	0/4	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MOB*	Moyenvic / les Crôleurs / FR2086	Salt kiln	48.780	6.570	-672	-801	-543	^{14}C	22	30.9	73.6	1.3	12/40	86.3 ± 6.9	86.6	-	-	-	86.7	85.7	13.6	12.4
MOC*	Moyenvic / les Crôleurs / FR3074	Salt kiln	48.780	6.570	-663	-809	-517	^{14}C	12	21.8	71.6	2.5	0/17	-	-	-	-	-	-	-	-	-
66136E	Perpignan / Ruscino / FY5106	Hearth	42.699	2.896	-612.5	-640	-585	Arch.	12	5.9	67.0	2.6	3/5	72.2 ± 5.6	72.2	77.4 ± 5.1	74.7 ± 2.7	12h	78.8	79.6	12.5	11.7
MOA*	Moyenvic / les Crôleurs / FR1003	Salt kiln	48.780	6.570	-585	-761	-409	^{14}C	20	18.6	66.6	3.4	4/23	82.1 ± 14.5	80.1	-	-	-	80.2	79.5	12.6	12.6
21711A	Vix / Sondage-Mont-Lassois-Est 2009	Kiln	47.911	4.533	-571	-749	-393	^{14}C	14	0.5	65.8	1.4	8/12	70.7 ± 5.2	70.5	-	66.1 ± 5.5	12h	66.7	66.7	10.5	10.5
34129B	Lattes / Saint-Sauveur / u.s. 27576	Pottery	43.565	3.907	-462.5	-475	-450	Arch.	-	-	-	-	1/5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
69123L	Lyon / Vaise, 4-6 rue du Mont-d'Or / FY63	Hearth	45.780	4.810	-450	-500	-400	Arch.	20	-2.9	66.8	1.3	6/14	77.5 ± 11.7	77.3	77.8 ± 10.4	77.3 ± 10.5	12h	79.7	79.6	12.5	12.1
34032A	Béziers / ZAC-de-la-Domitienne / FR1009	Pottery kiln	43.330	3.250	-437.5	-525	-350	Arch.	11	-1.3	64.7	1.2	14/14	75.1 ± 3.7	75.0	79.2 ± 3.2	70.1 ± 2.8	24h	74.2	73.9	11.7	11.3
13055K	Marseille / 9 rue Leca / FR1	Amphorae kiln	43.500	5.620	-435	-470	-400	Arch.	15	1.3	68.7	0.9	19/26	73.1 ± 9.0	72.9	75.0 ± 8.3	75.0 ± 8.6	24h	79.2	78.3	12.5	11.5
34129C	Lattes / Saint-Sauveur / u.s. 27345	Pottery	43.565	3.907	-412.5	-425	-400	Arch.	-	-	-	-	0/4	-	-	-	-	-	-	-	-	-
34129D	Lattes / Saint-Sauveur / u.s. 27346	Pottery	43.565	3.907	-412.5	-425	-400	Arch.	-	-	-	-	3/8	55.2 ± 5.5	55.3	49.5 ± 4.3	-	-	52.2	-	8.2	-
34129E	Lattes / Saint-Sauveur / u.s. 4796	Pottery	43.565	3.907	-362.5	-375	-350	Arch.	-	-	-	-	3/7	-	-	-	-	-	-	-	-	-
62382D	Gouy-Saint-André / le Rossignol / FR60	Salt kiln	50.375	1.920	-305	-400	-210	^{14}C	18	-5.4	66.3	3.9	1/7	-	-	-	-	12h	-	-	-	-
34145A	Lunel / Mas-de-Fourques / FR2110	Pottery kiln	43.691	4.135	-293.5	-386	-201	^{14}C	23	-2.9	64.9	0.7	15/16	74.3 ± 3.3	74.6	75.1 ± 3.7	67.0 ± 3.2	24h	70.6	70.4	11.1	10.7
62382E	Gouy-Saint-André / le Rossignol / FR22	Salt kiln	50.375	1.920	-290	-390	-190	^{14}C	21	-1.3	72.6	2.3	9/11	63.1 ± 9.5	64.7	66.0 ± 8.6	62.6 ± 5.6	12h	61.7	61.9	9.7	9.1
13055L	Marseille / place Villeneuve-Bargemon	Hearth	43.297	5.369	-281	-368	-194	^{14}C	14	-5.8	65.6	2.9	2/7	-	-	-	-	12h	-	-	-	-
34129A	Lattes / Saint-Sauveur / FY4567	Hearth	43.565	3.907	-275	-300	-250	Arch.	16	-2.9	67.7	0.9	3/13	80.3 ± 3.5	80.5	-	73.2 ± 2.7	12h	77.3	76.6	12.2	11.3
62799B1	Sorrus / la Bruyère, zone 3 / FR2B	Salt kiln	50.450	1.700	-236	-292	-180	DC	6	1.2	69.9	4.8	2/3	-	-	-	-	12h	-	-	-	-
62799B2	Sorrus / la Bruyère, zone 3 / FR2C	Salt kiln	50.450	1.700	-236	-292	-180	DC	7	-23.4	73.2	2.9	0/3	-	-	-	-	-	-	-	-	-
62799C	Sorrus / la Pâture à vaches / FR2	Salt kiln	50.450	1.700	-225	-250	-200	DC	13	-1.1	69.3	1.4	8/13	57.8 ± 5.8	57.3	-	55.1 ± 5.5	12h	54.3	54.3	8.5	8.4
62382B	Gouy-Saint-André / le Rossignol / FR78	Salt kiln	50.375	1.920	-225	-360	-90	^{14}C	12	-4.7	69.7	2.2	5/8	63.9 ± 4.6	63.3	63.3 ± 4.3	61.7 ± 4.5	12h	60.8	60.9	9.6	9.3
33296A	Mouliets-et-Villemartin / Lacoste / u.s. 6044	Hearth	44.831	-0.039	-190	-210	-170	Arch.	-	-	-	-	6/6	49.0 ± 3.1	48.7	51.3 ± 3.9	50.4 ± 4.4	12h	52.5	-	10.8	-
		Pottery											9/9	79.8 ± 8.9	80.7	74.7 ± 6.0	66.2 ± 4.4	12h	68.9	-	8.3	-
62799A	Sorrus / la Bruyère, zone 3 / FR1	Salt kiln	50.450	1.700	-165	-190	-140	DC	14	-0.2	69.4	2.2	2/10	-	-	-	-	12h	-	-	-	-
34003A	Agde / Saint-Michel / FR2	Amphorae kiln	43.267	3.500	-115	-140	-90	Arch.	18	3.6	66.4	1.3	18/18	62.0 ± 4.3	62.0	63.0 ± 4.3	62.8 ± 4.0	24h	66.5	66.0	10.5	9.8
47323A	Villeneuve-sur-Lot / la Dardenne-Haut / FR3186	Pottery kiln	44.418	0.733	-100	-125	-75	Arch.	27	-0.8	63.2	0.9	0/8	-	-	-	-	-	-	-	-	-
47323B	Villeneuve-sur-Lot / la Dardenne-Haut / FR3186	Hearth	44.418	0.733	-100	-125	-75	Arch.	-	-	-	-	11/11	58.1 ± 7.4	59.7	65.2 ± 8.4	60.1 ± 7.7	12h	63.5 ± 10.5	-	10.0	-
		Pottery											12/13	76.9 ± 7.1	78.2	70.6 ± 10.4	62.0 ± 9.0	12h				
11045A	Bouriège / devant-la-ville / FR1	Pottery kiln	42.980	2.170	-100	-150	-50	Arch.	6	-2.3	67.3	2.7	1/8	-	-	-	-	12h	-	-	-	-
11045B	Bouriège / devant-la-ville / FR6	Pottery kiln	42.980	2.170	-100	-150	-50	Arch.	11	-1.8	64.1	1.6	0/11	-	-	-	-	-	-	-	-	-
11045C	Bouriège / devant-la-ville / FR7	Pottery kiln	42.980	2.170	-100	-150	-50	Arch.	9	-6.8	66.1	2	4/9	45.3 ± 8.3	44.0	41.8 ± 4.3	39.6 ± 4.5	12h	42.1	41.7	6.6	6.3
34129F	Lattes / Saint-Sauveur / u.s. 2956	Pottery	43.565	3.907	-87.5	-100	-75	Arch.	-	-	-	-	0/8	-	-	-	-	-	-	-	-	-
34129G	Lattes / Saint-Sauveur / u.s. 30118	Pottery	43.565	3.907	-87.5	-100	-75	Arch.	-	-	-	-	1/12	-	-	-	-	-	-	-	-	-
67282A	Marlenheim / Maison-Apprederis / FR70	Pottery kiln	48.620	7.500	-45	-60	-30	Arch.	19	-4	69.6	0.8	8/9	66.5 ± 4.1	66.0	67.9 ± 3.7	63.3 ± 3.6	24h	63.4	63.5	10.0	9.6
26362A	Valence / Angle-rue-d'Arménie-rue-Bouffier / FR40	Baking kiln	44.934	4.895	-40	-50	-30	Arch.	19	-0.7	66.7	0.7	8/10	65.2 ± 4.9	66.1	64.9 ± 4.6	62.1 ± 4.6	12h	64.6	64.4	10.2	9.7
18057A	Chateaumeillant / le Paradis, zone B / FR172	Pottery kiln	46.930	2.317	37.5	25	50	Arch.	11	0.4	64.8	1.6	1/6	-	-	-	-	12h	-	-	-	-

Table 1: Description and archaeointensity results of new french reference sites. (Legend in the following page)

Legend of Table 1, columns from left to right:

No, structure number; Site, name of the archaeological site; Structure, kind of structure; Lat and Long, site latitude and longitude; T_{mean}, mean age of the structure in years AD; TPQ, minimum age of the structure in years AD; TPQ, maximum age of the structure in years AD; Meth., dating method (Arch.: archaeological methods as stratigraphy and typology; ^{14}C: calibrated AMS radiocarbon; DC: dendrochronology); N_{dir}, number of samples taken into account in the calculation of the site mean direction; D_s and I_s, mean declination and inclination in situ; a_{95}, 95 per cent confidence limit of mean direction of magnetization; N_{int}/N_0, number of accepted/studied samples by the Thellier-Thellier protocol; F ± s.d., mean intensity and standard deviation; F_w, mean intensity weighted by the quality factor q and the number of heating steps n (Prévôt, 1985); F_{wa} ± s.d., weigthed mean intensity corrected from anisotropy effects; F_{wcr} ± s.d., weigthed mean intensity corrected from anisotropy and cooling rate effects; Cooling rate, duration of the slow cooling; F_{PVADM}, mean intensity relocated at Paris with the Virtual Axial Dipole Moment correction; F_{PVDM}, mean intensity relocated at Paris with the Virtual Dipole Moment correction; VADM, Virtual Axial Dipole Moment; VDM, Virtual Dipole Moment

** Already published in Hervé et al., 2011*

4.3 The particular case of pottery sherds with two components of magnetization

The pottery sherds of Mouliets-et-Villemartin (33296B) and Villeneuve-sur-Lot (47323B) hearths carry two components of magnetization. Pilot thermal demagnetizations show that the magnetization acquired during the last use of the hearth is the low-temperature component (see section 3.1). Therefore the archaeointensity was determined in the interval of unblocking temperatures of this component. The presence of two components of magnetization results in concave-up or concave-down or complex NRM-TRM diagrams (Fig. 10) following the angle between the two components of magnetization and the ratio of both paleointensities (Yu and Dunlop, 2002; Paterson, 2011). In some cases, the NRM-TRM diagram appear linear in all the unblocking temperature range (Fig. 10b) and without the orthogonal plot, the archaeointensity seems very reliable. Some studies (see figure 5 in Rodriguez-Ceja *et al.*, 2009) compute the archaeointensity in the temperature interval with such an acceptable linear fit (approach A, Fig. 10). This approach is wrong and the example of our pottery sherds show that it gives doubtful archaeointensity results.

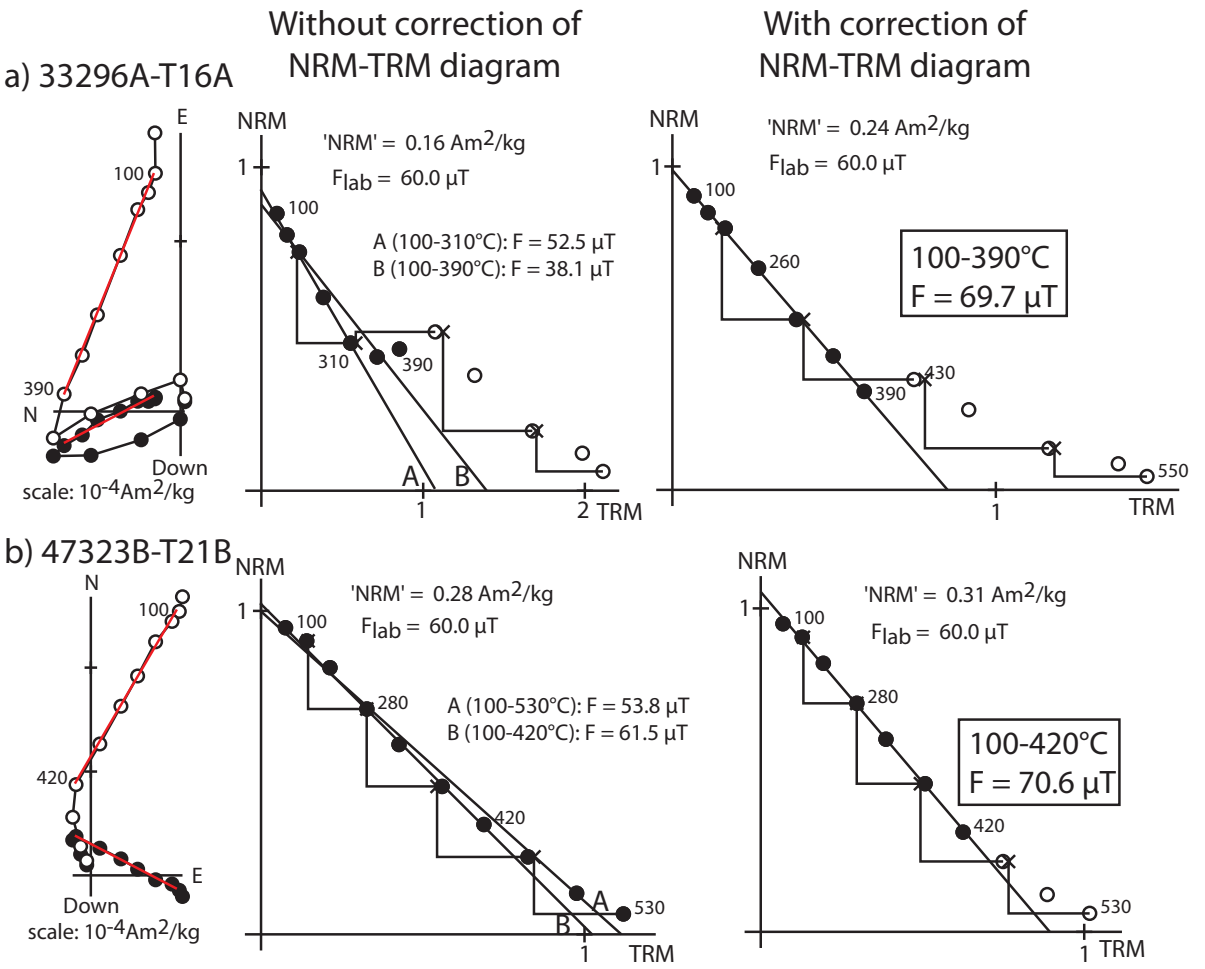


Figure 10: Determination of archaeointensity for two pottery sherds with two components of magnetization from 33296A (a) and 47323B (b) hearths. On the left, orthogonal plots. Directions are shown in sample coordinates, but the z-axis corresponds to the vertical during the acquisition of the magnetization. In the middle, NRM-TRM diagrams before the two-component correction. A is the archaeointensity estimated in the temperature interval for which NRM-TRM diagram is linear (usual approach to compute the archaeointensity). B is the archaeointensity estimation in the interval of unblocking temperature of the low-temperature component determined by the orthogonal plots. On the right, NRM-TRM diagrams after the two-component correction with adjusted NRM and TRM values at each heating step. The correction gives the reliable archaeointensity in the temperature range of the low-temperature component. Temperatures are indicated in Celsius degrees. Indicated archaeointensity values are corrected for the anisotropy of TRM.

In order to compute properly the archaeointensity associated to the low-temperature TRM, NRM-TRM diagrams have to be corrected (Garcia, 1996). The first step of the correction (Barbetti, 1979; Yu and Dunlop, 2002) is the determination of the junction temperature between the two components thanks to the pilot thermal demagnetizations. The NRM remaining at this junction temperature is vectorially substracted from the NRM at each previous heating step, giving adjusted NRM values. TRM values do not need to be adjusted, because the same laboratory field was applied during the demagnetization of the low and the high-temperature components of magnetization. The second step of the correction is the normalization of NRM and TRM values at each heating step by the sum of the intensity of the high-temperature and of the intensity of the low-temperature components (named below total NRM).

The two-components correction changes considerably the NRM-TRM diagram and makes it linear in the interval of the low unblocking temperature (Fig. 10). The archaeointensity, computed on the corresponding slope, is very different (almost twice) of the values computed without correction.

The archaeointensity of pottery sherds after the two-components correction are selected with the same criteria than specimens with one component of magnetization except for the DANG parameter, which is not significative for specimens carrying two components of magnetization. The f factor is also normalized by the total NRM. Only one specimen of pottery sherds from 33296A and 47323B (22 were studied) is rejected. The standard deviation of the mean archaeointensity is similar to those of kilns and hearths, which highlights the reliability of the two-components correction.

4.4 Acceptance/rejection of archaeointensity results and rock magnetism

Only 8 (18%) grey-coloured pottery sherds from Lattes give successful results, whereas almost all red-coloured sherds from Mouliets-et-Villeneuve and Villeneuve-sur-Lot are accepted. Colour of sherds reflects, al least in part, the type of atmosphere (oxidizing or reducing) during baking. The heatings in the laboratory were performed either in totally oxidizing or reducing atmospheric conditions. But grey pottery sherds from Lattes are heated in the laboratory in atmospheric conditions that do not mimic the initial intermediate conditions during their last baking. The archaeointensity experiments

performed in air and in vacuum have similar high rejection rates (see supplementary material), due to laboratory induced chemical changes of the magnetic grains. Archaeointensity studies are more successful with red-coloured pottery sherds, because they were most probably baked in oxidizing conditions that can be reproduced in the laboratory. In French archaeological sites dated during the first millennium BC, they are unfortunately often imported ceramic with a long lifetime.

The Figure 3 compares NRM intensity and low field susceptibility of accepted and rejected results. Specimens with Koenigsberger ratio higher than 10 are generally accepted and specimens with ratio lower than 1 rejected. But no systematic trend appears for ratio between 1 and 10, which are obtained for most specimens. The archaeointensity results are quite coherent compared to the reversibility of the thermomagnetic curves (Fig. 6). Generally, rejected specimens have less reversible curves after the heating to 600°C. But, some specimens with irreversible curves (as 34032A-10A11) give very reliable archaeointensities. Moreover, specimens from Bouriège (11045A-B-C) are mostly (23/28) rejected due to a very strong deviation of the NRM direction (Fig. 7) despite their reversible thermomagnetic curves, high NRM intensity and Koenigsberger ratio. Their Hcr are higher than specimens from others kilns, which normally indicates smaller ferromagnetic grains (titanomagnetite for Bouriège kilns) more suitable for archaeointensity experiments.

4.5 Anisotropy correction

Individual archaeointensity values were corrected, if the alteration (deduced from the stability check) during the six heatings of the anisotropy correction is not higher than 10%. The anisotropy tensor of thermoremanent magnetization (ATRM) was determined for all structures, except 34129A, 21711A and 62799A, as archaeodirection study (Hervé *et al.*, submitted) showed that the anisotropy rate was very low (only a few per cent). The anisotropy tensor of kilns and hearths are consistent with those determined in Hervé *et al.* (submitted) and their anisotropy degree is generally lower than 12% except for the 66136E hearth.

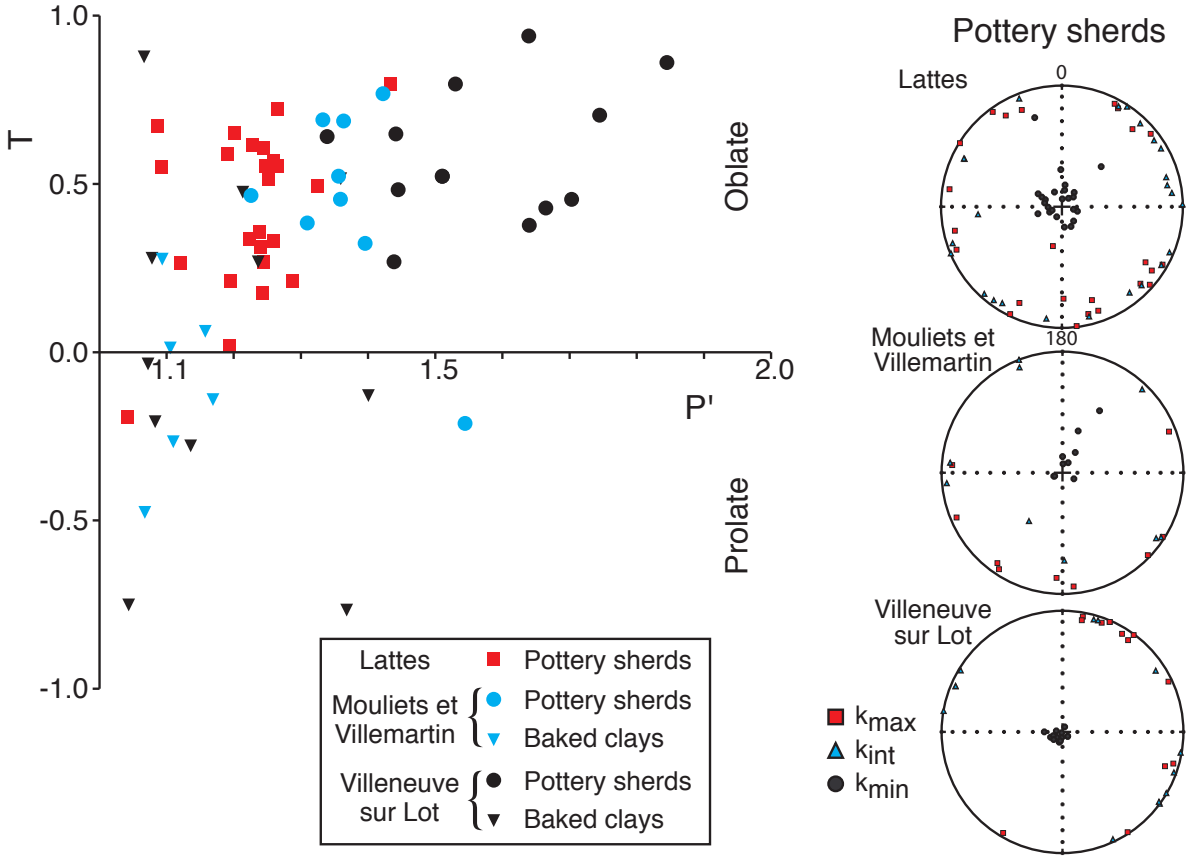


Figure 11: Anisotropy of thermoremanent magnetization (ATRM) properties of displaced materials, that is pottery sherds from Lattes, fragments of baked clays and pottery sherds from the hearths of Mouliets-et-Villemartin (33296A) and Villeneuve-sur-Lot (47323B). On the left, T-P' diagram of all samples with reliable anisotropy (that is with a positive stability check lower than 10 per cent). On the right, stereographic plots of the main axis of the ATRM tensor for pottery sherds. Following the sampling protocol, the z axis corresponds to the thickness of the sherd.

Figure 11 presents the characteristics of the ATRM tensor of displaced material, that is pottery sherds from Lattes and baked clay fragments and pottery sherds from Mouliets-et-Villemartin and Villeneuve-sur-Lot. Baked clay fragments have anisotropy degrees generally between 5 and 20% but reaching 40% if a small pottery sherd is included. Pottery sherds have higher values from 20 to 73%. Their anisotropy properties reflect their manufacturing (Rogers *et al.*, 1979) and wheeled pottery from Mouliets-et-Villemartin and Villeneuve-sur-Lot are more anisotropic than the thicker not-wheeled sherds from Lattes. The ATRM tensor of pottery sherds is mostly oblate, whereas no

particular shape dominates for baked clay fragments. The easy plane of magnetization corresponds to the flattening plane of the pottery (also observed by Tema *et al,*. 2009a; Genevey and Gallet, 2002), as the z axis of the sherds was defined along the thickness (Fig. 11). After correction for anisotropy of TRM the archaeointensity values are typically decreased by 6µT but this decrease can reach 17µT. This study of pottery sherds is another demonstration that such anisotropic material has to be corrected from ATRM, in order to avoid large overestimation or underestimation of the archaeointensity.

4.6 Cooling rate correction

Following Gomez-Paccard *et al.* (2008), the cooling rate correction was applied for 128 specimens on which the absolute value of the correction factor is higher than the alteration factor. The correction factor is usually between 0 and 16 per cent (Fig. 12) and sometimes very variable within the same structure (see supplementary material). The correction factor appears linked to the magnetic mineralogy (Gomez-Paccard *et al.*, 2008) and has to be determined individually on each sample. However, the link with rock magnetism results is not clear. Five specimens give negative correction factor, that could be linked to interacting ferromagnetic grains or MD grains as shown by experimental and theoretical (McClelland-Brown, 1984; Yu, 2011) studies. But, as their NRM-TRM diagram is perfectly linear, the magnetization of these samples is probably carried by non-interacting single-domain grains.

4.7 New mean archaeointensities

Eighteen mean archaeointensity were computed using at least three specimens per site (Tab. 1). All accepted specimens were used for the computation except for two structures (62799C and 62382B), on which one specimen was considered as an outlier (see supplementary material). Archaeointensity means were weighted by the number of temperature steps used for archaeointensity estimation and by the quality factor following Prévôt *et al.* (1985). The anisotropy (applied for 15 structures) and cooling rate (applied for 17 structures) corrections decreases by 10 per cent on average the

standard deviation around the mean intensity. After corrections, the standard deviations vary from 3.6 to 14.0 per cent with a average value of 8.0 per cent.

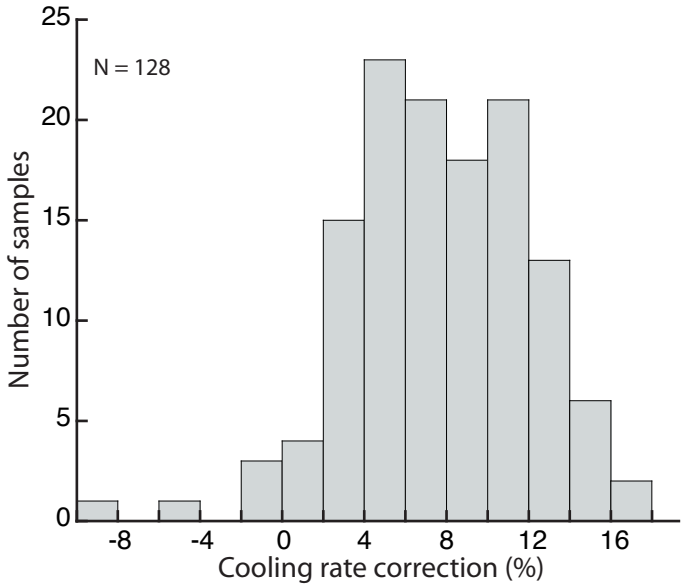


Figure 12: Histogram of the cooling rate correction factor (Gomez-Paccard et al., 2008). Correction factor lower than the alteration factor are not taken into account.

For Villeneuve-sur-Lot 47323B hearth, the corrections for anisotropy and cooling rate give very consistent mean archaeointensities for baked clay fragments (59.7 ± 7.4 µT before and 60.1 ± 7.7 µT after corrections) and pottery sherds (78.2 ± 7.1 µT before and 62.0 ± 9.0 µT after corrections). Therefore a mean archaeointensity was computed using all accepted specimens of both materials. However for the similar structure 33296A of Mouliets-et-Villemartin, mean archaeointensities for baked clay fragments (49.0 ± 3.1 µT before and 50.4 ± 4.4 µT after corrections) and pottery sherds (79.8 ± 8.9 µT before and 66.2 ± 4.4 µT after corrections) remain statistically different. Each material gave very reliable archaeointensity results (Fig. 8b and 10above). The difference between material could be due to an experimental artefact not fully recognised, a false cooling rate correction or an acquisition of the TRM at two different times. As no argument allows choosing among these three assumptions, we decided here to keep separately the two mean archaeointensity values. Mean archaeointensities of 34129D set of pottery sherds from Lattes and 11045C pottery kiln of Bouriège are much lower than those from contemporaneous structures.

5. Variation of intensity during the first millennium BC

Mean archaeointensities relocated at the latitude of Paris (48.85°N) using the Virtual Axial Dipole Moment (VADM) are plotted in Figure 13. The dispersion between structures between 800-450BC and 400-200BC is enhanced by the imprecision of radiocarbon dating due to plateau effects in the dendrochronological calibration curve (Reimer *et al.*, 2004) (Fig. 13). The plotting of the probability density functions of the calibrated datings makes clearer the secular variation of the archaeointensity. High values are obtained during the first half of the first millennium BC, around twice the present value at Paris (48µT). Next the archaeointensities decreases quite regularly.

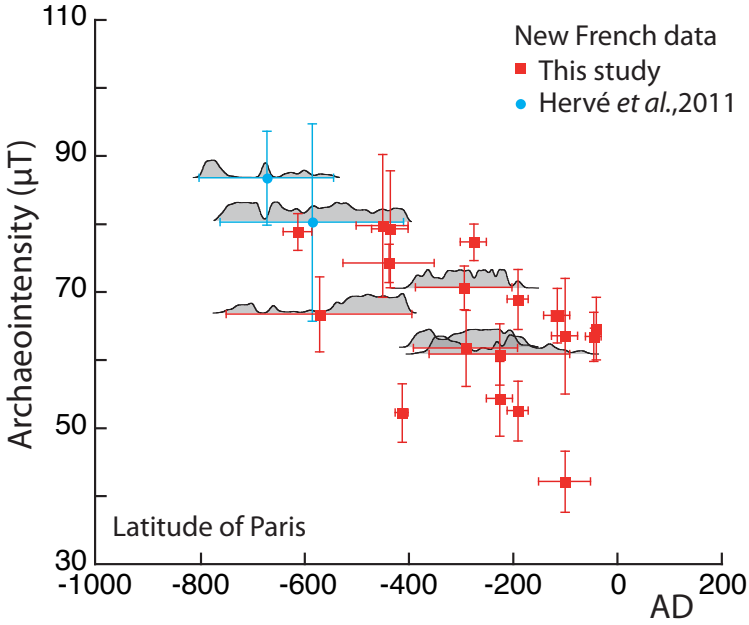


Figure 13: New French archaeointensity data dated in the first millennium BC. Grey curves are the probability density functions (pdf) of radiocarbon dating after calibration in the dendrochronological calibration curve (Reimer et al., 2004). The pdf are uniform for others data dated by dendrochronology or archaeological artefacts.

5.1 Comparison with other Western Europe data

Our results are compared to all Western Europe archaeointensity data determined by the Thellier-Thellier protocol or its variants with pTRM-checks (Fig. 14). Only eight data from Italy were corrected both for anisotropy of thermoremanent magnetization (ATRM) and cooling rate effects (Hill *et al.,* 2007 with archaeological dating corrected following Hervé *et al.*, 2011; Hill *et al.,* 2008; Gallet *et al.*, 2009a). The five Italian data of

Hedley & Wagner (1991) obtained on pottery sherds were only corrected for the ATRM effects. The archaeointensity of the Swiss kiln of Kovacheva *et al.* (2004) was corrected for the anisotropy of anhysteretic remanent magnetization (AARM). The Spanish (six data, Burakov *et al.*, 2006) and Portuguese (61 data, Nachasova and Burakov, 2009) archaeointensities were determined on pottery sherds and corrected for the anisotropy of the magnetic susceptibility (AMS). Finally, no correction was applied on the archaeointensity of a Swiss kiln dated from the transition between the second and the first millennium BC (Kovacheva *et al.*, 2009).

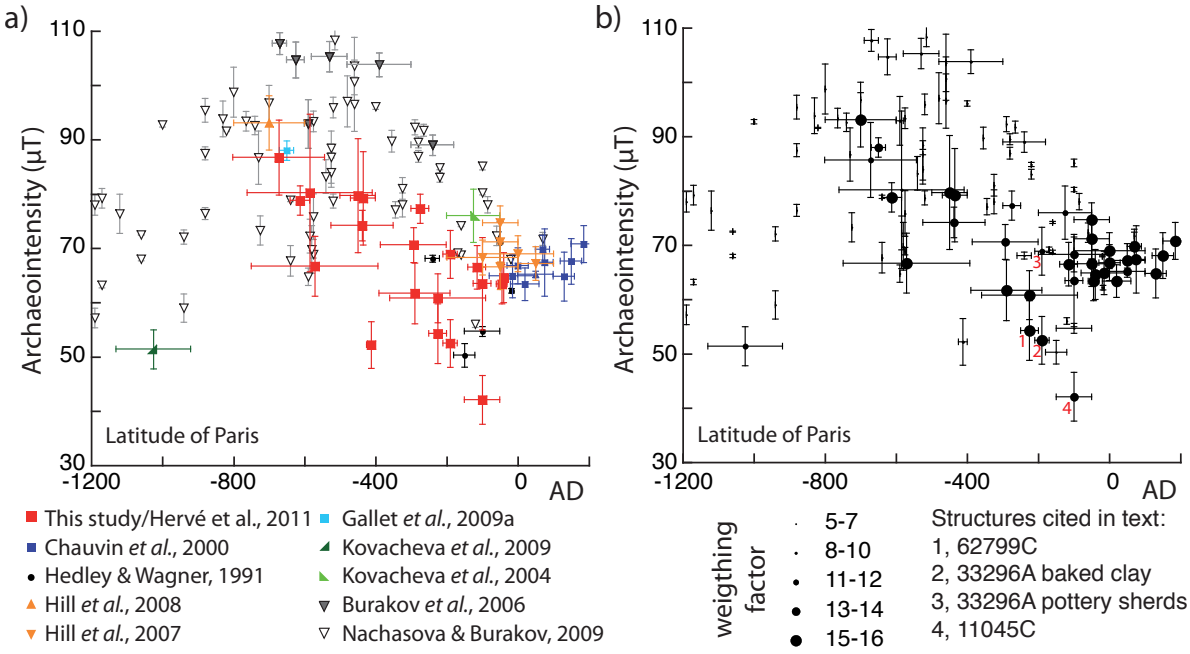


Figure 14: a) Comparison of new French data (red squares) with previously published Western Europe data (France, Switzerland, Spain, Portugal, Italy). b) Weighting of the data following the archaeointensity method, the material and the number of samples (see text). All data are relocated to the latitude of Paris by the VADM correction.

Large dispersion between data relocated at Paris is observed (Fig. 14). For example, around 200BC, archaeointensity results vary from 40 to 85µT. This dispersion is probably mainly explained by the archaeointensity determination protocol. Archaeointensities published by Burakov *et al.* (2006) and Nachasova and Burakov (2009) studies were carried out on pottery sherds that are usually a strongly anisotropic material. Chauvin *et al.* (2000) and Tema (2009) showed that the anisotropy degree could be underestimated twice to three times with AMS compared to ATRM. As Burakov *et al.* (2006) and Nachasova and Burakov (2009) used AMS to correct their

archaeointensity estimates, that could explain why their intensity data are always higher than other contemporaneous data. The archaeointensity of Kovacheva *et al.* (2004) is corrected from AARM, which is more similar to ATRM (Chauvin *et al.*, 2000) and in this case the apparent higher archaeointensity is maybe due to cooling rate effects. But data corrected from ATRM and cooling rate effects remain quite scattered. As suggested by Gomez-Paccard *et al.* (2006), this dispersion could be due to a quick and strong secular variation or to a wrong estimate of the last cooling time of archaeological structures or to dating errors of some structures or to inherant limit of the method (e.g. local magnetic anomalies).

5.2 Weighting of archaeointensity data

In order to take into account the variability of archaeointensity protocols, a weight W was attributed to each data. This weight is the sum of three weights (Tab. 2) based on the type of materials analyzed (w_M), the number of samples per structure used to compute the mean archaeointensity (w_N) and the palaeointensity technique (w_T). Compared to older studies (Chauvin *et al.,* 2000, Schnepp *et al.*, 2009 and De Marco *et al.*, 2008), w_T takes into account the technique used for anisotropy correction, it has a lower (higher) value when AMS (AARN or ATRM) tensor was used. In the same way, w_T depends also on the cooling rate factor, defined as the difference ΔF_{mean} between the mean archaeointensity only corrected for anisotropy effect and the mean archaeointensity corrected for anisotropy and cooling rate effects (Tab. 2). The precise initial cooling rate is never known and experimental studies are uncommon (Genevey and Gallet, 2002; Morales *et al.*, 2011), making the cooling rate correction quite delicate. We consider results obtained with low ΔF_{mean} more reliable, because the use of a wrong cooling rate in the laboratory would have a small effect on them. Three classes (ΔF_{mean} >10%, 5%<ΔF_{mean} <10% and ΔF_{mean} <5%) were defined (Tab. 2).

This weighting approach allows an easier estimate of archaeointensity changes (Fig. 14b). Between 1200 and 800BC, there is some lack of reliable data, but archaeointensity at Paris probably increased from 60µT to more than 90µT. After this strong maximum, archaeointensity decreased to 55 µT around 250BC. Next, archaeointensity increased to 65µT during the gallo-roman period (Chauvin *et al.*, 2000; Gomez-Paccard *et al.*, 2008).

Only Thellier-Thellier methods with pTRM checks

weighting w_T	cooling rate correction	anisotropy correction
6	$\Delta F_{mean} < 5\%$	ATRM, AARM
5	$5 < \Delta F_{mean} < 10\%$	ATRM, AARM
4	$\Delta F_{mean} > 10\%$	ATRM, AARM
3	no	ATRM, AARM
2	no	AMS
1	no	no

weighting w_M	material
4	baked clay, bricks or lava flows
3	tiles
2	pottery
1	small objects with a strong effect of shape: pipes

weighting w_N	number of archaeointensity determinations
6	6 or more
1 to 5	weight equal to the number of determinations

Table 2: Weighting of archaeointensity data. The weight is equal to the sum of the three weights w_T defined by the archaeointensity method and cooling rate results, w_M defined by the archaeomagnetic material and w_N defined by the number of archaeointensity determinations.

The minimum of intensity around 250-200BC was not pointed out by previous studies. It is supported by 62799C and 33296A baked clay structures dated around 250BC (numbers 1 and 2 in Fig. 14b). Thanks to the weighting, the 33296A baked clay archaeointensity mean (number 2 in Fig. 14b) seems more reliable than the 33296A pottery sherds mean (number 3 in Fig. 14b). This intensity minimum is also enhanced by two accepted specimens of 62799B1 structure (see supplementary material). The 11045C kiln of Bouriege (number 4 in Fig. 14b) let suppose that the minimum could be younger around 200BC.

In the following, we have decided to use only data with a weight at least equal to 11.

5.3 Comparison with Eastern Europe and Middle-East data

Most of the numerous Bulgarian (compiled in Kovacheva *et al.*, 2009) and Greek data are determined without pTRM checks or they were not corrected for anisotropy of TRM and cooling rate effects, except data from De Marco *et al.* (2008). Data from the Middle East more recently acquired are corrected for both effects (Syria, Genevey *et al.*, 2003 and

Gallet and Le Goff, 2006; Iran, Gallet *et al.*, 2006; Israel and Jordan, Ben-Yosef *et al.*, 2008, Ben-Yosef *et al.*, 2009, Shaar *et al.*, 2011a). We follow the same approach as for Western Europe data: we selected only data acquired with Thellier's method and pTRM checks and we keep only data with an associated weight higher than 11 (Fig. 15). VADM was used for relocation.

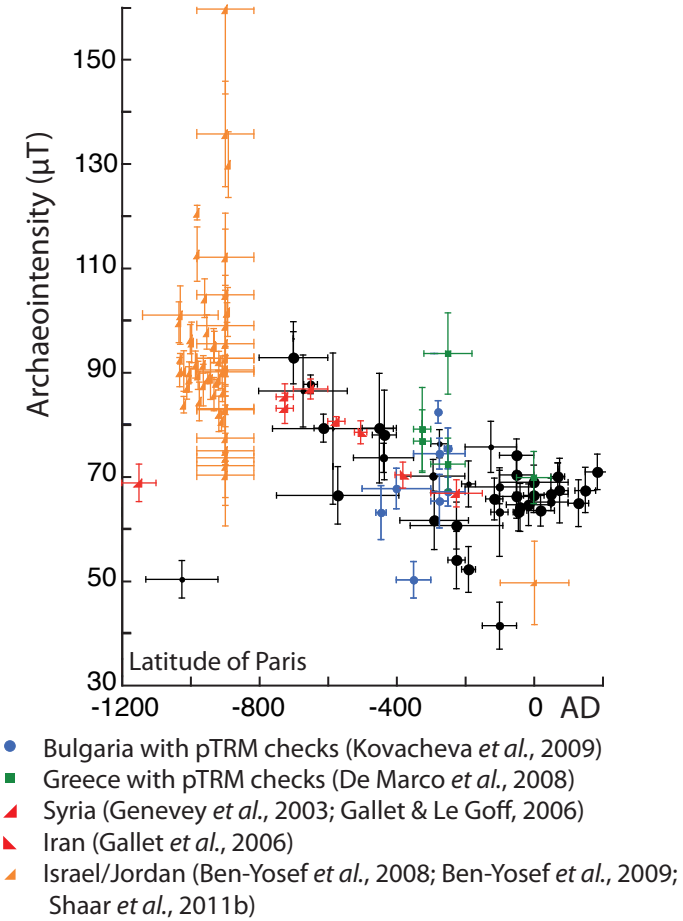


Figure 15: Comparison of Western Europe data with Eastern Europe and Near Eastern data. Only data with an associated weight higher than 11 are selected. Contrary to Bulgarian data, data from Greece, Syria, Iran, Israel and Jordan are corrected from anisotropy and cooling rate effect. All data are relocated to Paris by the Virtual Axial Dipole Moment assumption.

Values of the selected Western Europe and Eastern Europe data sets are quite consistent at the latitude of Paris. For Middle-East, high quality Syrian and Iranian data also point out the maximum of archaeointensity between 800 and 600 BC and the sharp decrease of archaeointensity, but not the archaeointensity minimum around 200BC. European data show no evidence of geomagnetic spikes (Ben-Yosef *et al.*, 2009), defined as very

sharp and short increases of the archaeointensity, that were detected at the beginning of the first millennium BC by the study of copper slags from Israel and Jordan (Ben-Yosef *et al.*, 2008; Ben-Yosef *et al.*, 2009; Shaar *et al.*, 2011a). However, we can note that the mean value of these archaeointensities is very consistent with the high intensity field recognized in the other studied places.

5.4 Mean curves of archaeointensity changes for Western and Eastern Europe

The Western Europe secular variation curve of archaeointensity was built by sliding windows of 160 years shifted every 50 years. The minimal number of data per window was fixed at three. The curve was computed using only the most reliable data with a weight higher than 11. In addition to the weight W, data were weighted by the proportion of their interval of dating contained in the sliding window (Le Goff, 1990). Figure 16 shows the mean secular variation curve and its 95 per cent envelope. Between the maximum of 88µT in 800 BC and the minimum of 63µT in 250-200BC, the archaeointensity decreases with a very high mean rate around 6µT per century. This strong variation will be very useful for archaeomagnetic dating.

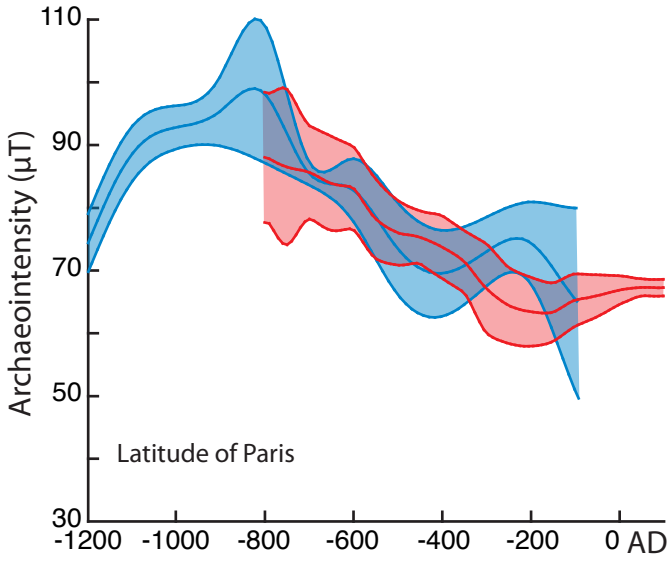


Figure 16: Archaeointensity secular variation curves of Western Europe (red curve) and Eastern Europe–Middle Eastern (blue curve) with their 95 per cent envelop between 850BC and 100AD.

As the number of selected data is lower than in Western Europe, the Eastern Europe curve was built with larger sliding windows of 200 years shifted every 100 years. Both curves are very consistent except between 400BC and 0AD. During this period, Eastern Europe curve presents a maximum which is mainly due to Greek data corrected for anisotropy and cooling rate effect. The discrepancy between the two curves reflects maybe a secular variation between 400 and 200BC quicker than supposed by Western Europe data and curve.

6. Discussion

6.1 Link with the directional variation of the geomagnetic field

Recently, we proposed a new Western Europe secular variation curve of the inclination and the declination of the geomagnetic field (Hervé *et al.*, submitted) (Fig. 17a). During the first millennium BC, the directionnal secular variation is characterized by no monotonous variation of the inclination between 65 and 75° and a very strong variation of the declination from 30°East in 800BC, associated to a maximum of intensity, to 5°West in 250BC, associated to a minimum of intensity. Changes in declination and archaeointensity appear simultaneous. Gallet *et al.* (2003) recognized already directional cusps associated to maxima of intensity at 800BC, 200AD, 800AD and 1400AD. They called those events « archaeomagnetic jerks », which would be linked to changes of the azimuthal flow on the core surface (Dumberry and Finlay, 2007; Wardinski and Korte, 2008). This study points out that a directional change can also be associated to an intensity minimum.

Figure 17b presents the variation of the Virtual Geomagnetic Pole (VGP) associated to Western Europe archaeodirections during the first millennium BC. The curve was computed using the bivariate statistic (Le Goff, 1990; Le Goff *et al.*, 1992) with sliding windows of 160 years shifted every 50 years. Sharp changes of the VGP path are observed in 800BC and 250BC. Around 800BC, the VGP is located at quite low-latitude around 70° in Northern Russia.

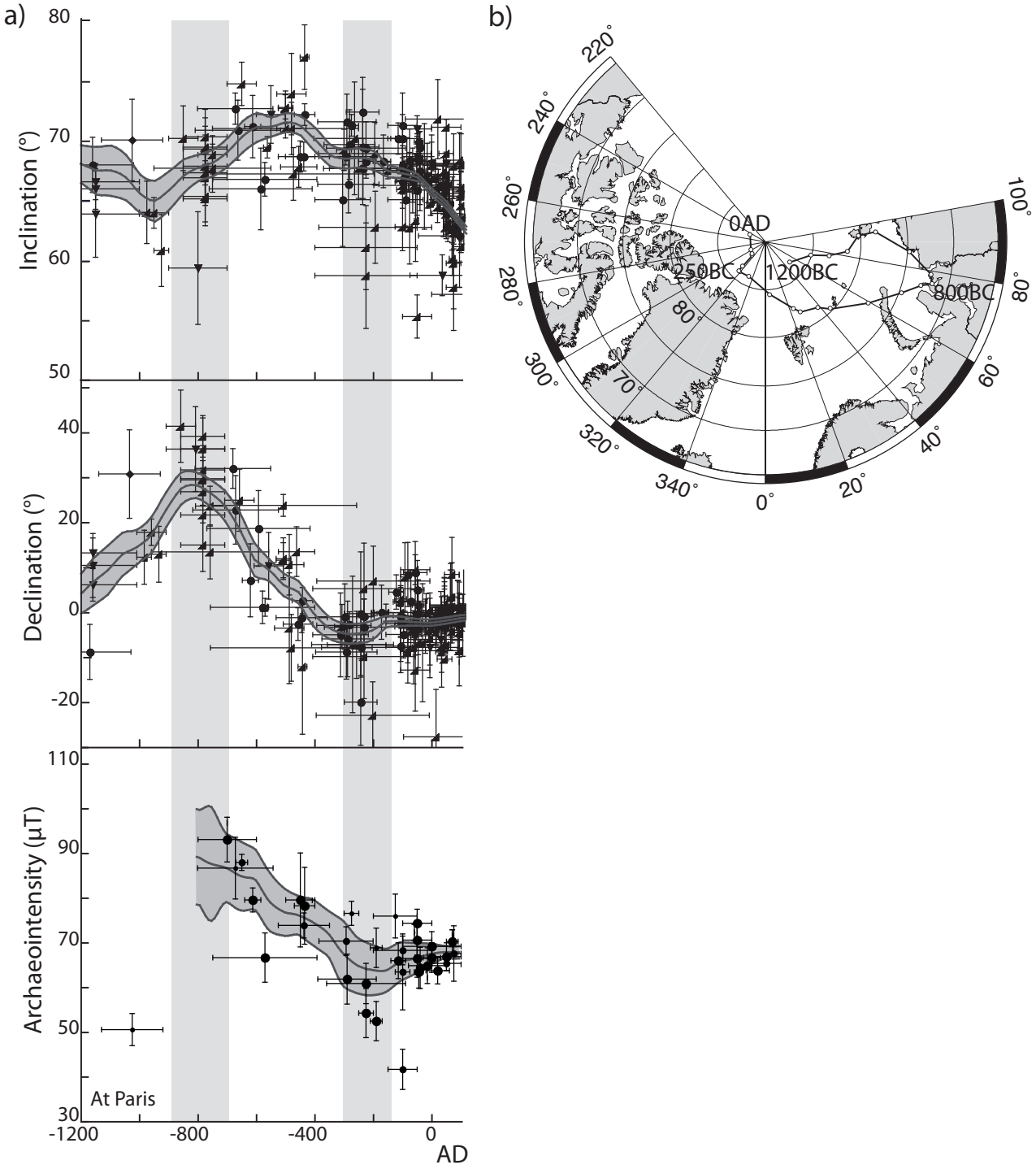


Figure 17: a) Variation of the direction (Hervé et al., submitted) and the intensity of the geomagnetic field in Western Europe during the first millennium BC. All data are relocated to Paris and curves are built with sliding windows of 160 years shifted every 50 years. b) Variation of the Virtual Geomagnetic Pole deduced from Western Europe directional curve between 1200BC and 0AD.

6.2 Comparison of the archaeointensity curve with global and regional geomagnetic models

Our Western Europe secular variation curve is compared to the prediction at Paris of the regional SCHA.DIF.3k geomagnetic model (Pavon-Carrasco *et al.*, 2009) (Fig. 18), which is built by inversion of European archaeomagnetic data using the spherical cap harmonic analysis (SCHA). Those predictions are not consistent with our Western Europe curve and a shift in time of 400 or 500 years appears. This is not surprising as the regional model was mainly built for the first millennium BC with Greek and Bulgarian data without any selection (see above part 5.3).

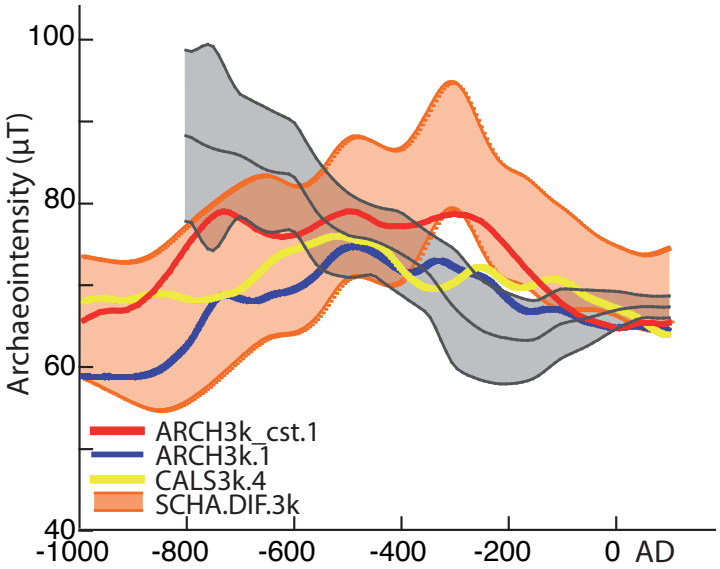


Figure 18: Comparison of Western Europe curve (black curve with its 95 per cent envelop in grey) with global ARCH3k_cst.1, ARCH3k.1 (Korte et al., 2009), CALS3k.4 (Korte & Constable, 2011) and regional SCHA.DIF.3k (Pavon-Carrasco et al., 2009) geomagnetic models. Models are computed at Paris.

The fit between the data and the predictions of ARCH3k.1, ARCH3k_cst.1 (Korte *et al.*, 2009) and CALS3k.4 (Korte & Constable, 2011) geomagnetic global models is not better (Fig. 18). They are built by regularized least-squares inversion using spherical harmonic analysis until degree 10. The models smooth the secular variation of archaeointensity that is probably due to the inhomogeneity of the quality of the data. We can notice that models ARCH3k.1 and ARCH3k_cst.1 built with only volcanic and archaeomagnetic data predict stronger archaeointensity variation than CALS3k.4 model, which adds relative paleointensity data from sedimentary records in the initial data set. Figure 18 also

shows that the constrained ARCH3k_cst.1 model built with a selected data set (σ_{VADM} lower than $2x10^{22}$ Am^2 and σ_{Age} lower than 100 years) give higher archaeointensities than the unconstrained ARCH3k.1 model. These comparisons highlight the need of a high-quality data set in order to compute more reliable models.

6.3 Dipole moment during the first millennium BC

Figure 19a presents the variation of the Virtual Axial Dipole Moment (VADM) and of the Virtual Dipole Moment (VDM) deduced from Western Europe data. The VADM introduces a bias in the estimation of the dipole moment because higher inclinations than the inclination of the axial dipole field are observed in Western Europe during almost all the first millennium BC. For the new 16 kilns or hearths, the overestimation of the VADM compared to the VDM (Tab. 1) is on average $0.5x10^{22}$ $A.m^2$ and reaches $1.2x10^{22}$ $A.m^2$ for the kiln MOB dated in the first half of the first millennium BC. Using the VDM relativises the high intensity (around $12\text{-}12.5x10^{22}$ Am^2) of the dipole moment during the first half of the first millennium BC. The VDM decreases until 200-250BC and next increases until 200AD (Chauvin *et al.*, 2000; Gomez-Paccard *et al.*, 2008) for which its intensity (around $11x10^{22}$ Am^2) is almost as high as that during the first half of the first millennium BC.

This variation of the VDM in Western Europe takes account of the variation of the dipolar and non-dipolar part of the geomagnetic field. The comparison of Western Europe data with global models may point out the periods with a stronger non-dipolar component in Western Europe. The VADM and VDM are compared to dipole moments (Fig. 19a) of ARCH3k_cst.1 (blue dotted curve, Korte *et al.*, 2009) and Archeoint (orange dots, Genevey *et al.*, 2008) models. ARCH3k_cst.1 was chosen because the directional (Hervé *et al.*, submitted) and intensity (Fig. 18) Western Europe curves are better fitted by this model than by other global models ARCH3k.1 (Korte *et al.*, 2009) and CALS3k.4 (Korte and Constable, 2011). The Western Eurasia curve of dipole moment obtained from the compilation of mixed VADM and VDM (Genevey *et al.*, 2008) fits rather well our new data, even if the 800-600BC maximum and the 200BC minimum are smoothed. The global time-averaged VADM or mixed VADM/VDM of Archeoint (orange dots) show a lower variation of the dipole moment.

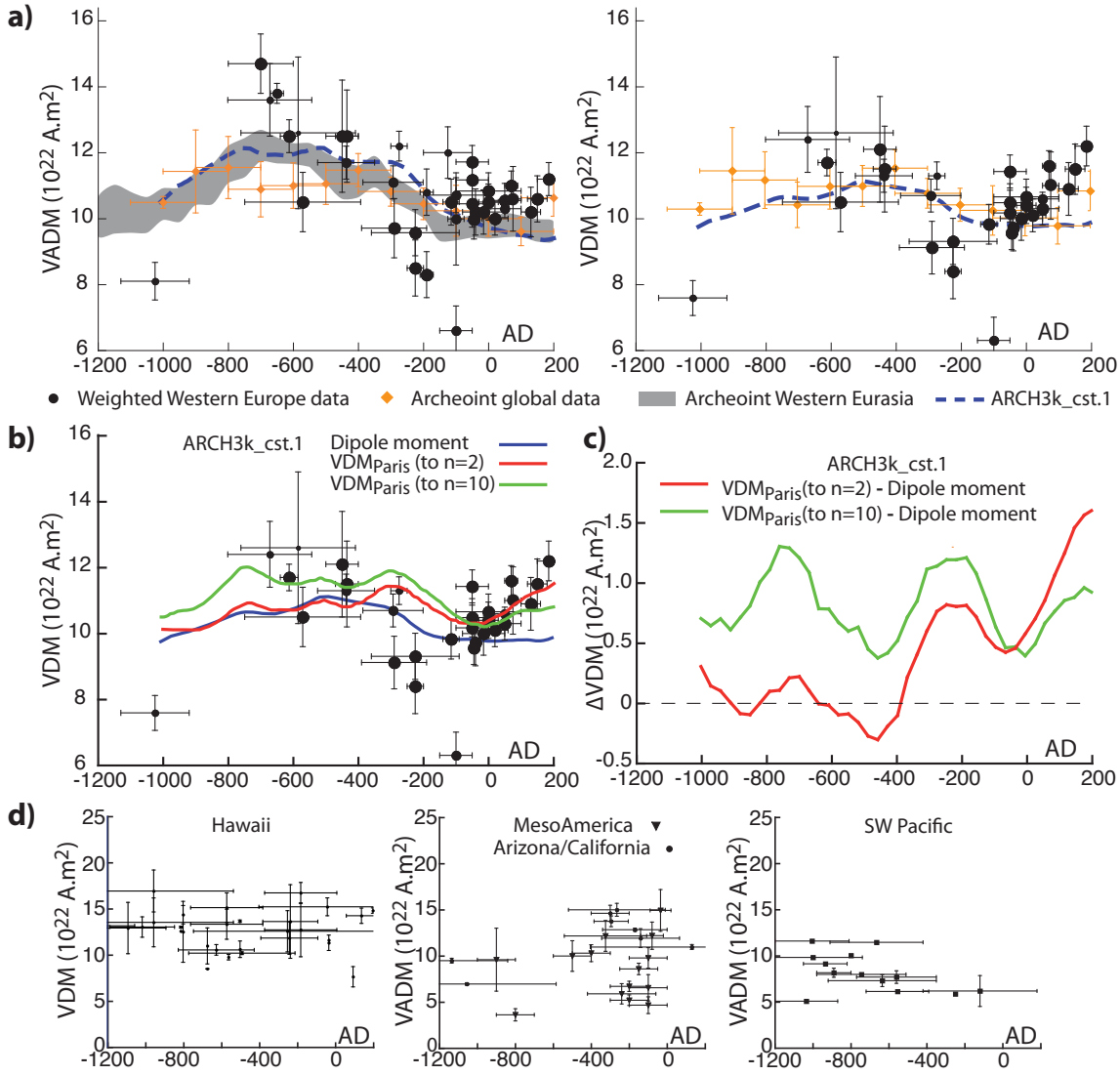


Figure 19: *Variation of the dipole moment during the first millenium BC. a) Comparison of weigthed Virtual Axial Dipole Moment (VADM) and Virtual Dipole Moment (VDM) deduced from selected Western Europe data with geomagnetic models. The Western Eurasia VADM curve (Genevey et al., 2008) deduced from Archeoint database is plotted in grey with its envelop. Orange diamonds are the global time-averaged VADM (left) and mixed VADM/VDM (right) from Archeoint (Genevey et al., 2008). The blue dotted curve is the dipole moment curve from ARCH3k_cst.1 model (Korte et al., 2009). b) Comparison of Western Europe VDM with ARCH3k_cst.1 model dipole moment and with VDM curves deduced from ARCH3k_cst.1 computed in Paris until the second (dipole and quadrupole) and tenth harmonic degrees. c) Differences between the dipolar moment of ARCH3k_cst.1 model and the two VDM estimations. d) VADM or VDM inferred from data from Hawaii, Meso America, South-Western USA and South-Western Pacific. Data are compiled from Archeoint (Genevey et al., 2008) and Geomagia50v2 (Donadini et al., 2009) databases.*

The dipole moment of ARCH3k_cst.1 model (Korte *et al.*, 2009) is quite consistent with Archeoint estimations (Fig. 19a) and it allows to better investigate the variation of the dipolar and non-dipolar component of the geomagnetic field (Fig. 19b and c). In Figure 19b, the Western Europe VDM are compared to the dipole moment of ARCH3k_cst.1 and to the VDM curves deduced from ARCH3k_cst.1 model computed in Paris until the second and tenth harmonic degrees. Not surprisingly, estimations to higher harmonic degrees better fit our data than the dipole moment, especially during the first half of the first millennium BC and during the two first centuries AD (Fig. 19b). The differences between different curves reveal that the non-dipolar field is stronger in 800-700BC and 250BC (Fig. 19c) during the cusps of the direction and the maximum/minimum of the intensity of the geomagnetic field in Western Europe (Fig. 17).

Gallet *et al.* (2009b) suggest that archaeomagnetic jerks are explained by an eccentric dipole. As it implies a stronger non-dipolar field and mainly a stronger quadrupolar field, the spherical harmonic content of ARCH3k_cst.1 global model is consistent with this hypothesis in 800BC, as already pointed out by Gallet *et al.* (2009). As the quadrupolar field appears particularly strong, we suggest that the dipole may also be eccentric around 250BC. In this case, the eccentricity would be towards the opposite hemisphere of Western Europe.

But these assumptions of a stronger non-dipolar field at these periods could also be an artefact of the scarcity and the various quality of data. Outside Europe, high-quality archaeointensity data determined by Thellier-Thellier or microwave protocol with pTRM-checks are very scarce (Fig. 19d). Only four geographical areas, Hawaii, Meso-America, South-Western USA and South-Western Pacific have quite sufficient data, but the variation of the VDM is less clear than in Europe. The Hawaiian data set, that is formed by volcanic data dated by radiocarbon, is quite noisy. The American data set has a lack of data during the first half of the first millennium BC and shows a strong dispersion between VADM during the second half. The South-Western Pacific data set determined by microwave methods (Stark *et al.*, 2010) presents a decrease of the VADM during the first half of the first millennium BC, as in Western Eurasia, but the VADM are much lower. This difference during this period (that is around 800BC) could be explained by a dipole eccentric towards the Northern hemisphere. But the difference may also be due to the archaeointensity method used, because the microwave method

tends to give lower archaeointensities than thermal methods (Biggin, 2010). The global high-quality data set determined by Thellier-Thellier or microwave protocol with pTRM-checks is consequently very limited and one has to wonder about the reliability of the models of the dipole moment which also include data of lower quality. More data have to be acquired all over the world during the first millennium BC, before the assumption of a stronger non-dipolar field possibly linked to an eccentric dipole in 800BC and 250BC could be verified.

7. Conclusion

Fifteen kilns or hearths and three sets of displaced materials allows to extend the Western Europe archaeointensity curve during the first millennium BC. Reliable archaeointensity values were obtained in the temperature interval of the low-temperature component for pottery sherds with a complex NRM. Data were corrected from anisotropy and cooling rate effects. In order to better estimate the variation of archaeointensity and take account of the discrepancies between new and previously published Western Europe data, data were weighted following a new system inspired from Chauvin *et al.* (2000), which takes into account the anisotropy protocol and the cooling rate results. The archaeointensity curve exhibits a maximum around 90µT in 800-700BC and a minimum around 60µT in 250 BC. The comparison with the new directional curves from Western Europe (Hervé *et al.*, submitted) points out that directional cusps are contemporaneous with the maximum but also the minimum of the archaeointensity. The comparison of Western Europe data with data from other geographical areas and with global models points out a possible link between these two major changes of the geomagnetic field and a stronger non-dipolar field, which could be implied by an eccentric dipole as suggested by Gallet *et al.* (2009b). Finally, this very strong variation of archaeointensity in Western Europe during the first millennium BC will be useful for archaeomagnetic dating.

Acknowledgements

We wish to thank archaeologists and their teams for providing informations about the context and the dating of the structures. We are also grateful to Philippe Dufresne and Pierrick Roperch for their experimental help and comments. This work was partly financed by the CNRS/INSU Paléo2 program.

Bibliography

Aitken, M.J., Allsop, A.L., Bussell, G.D. & Winter, M.B., 1988. Determination of the intensity of the Earth's magnetic field during archaeological times: reliability of the Thellier technique, *Rev. Geophys.*, 26, 3-12

Alva-Valdivia, L.M., Morales, J., Goguitchaivili, A., Popenoe de Hatch, M. & Hernandez-Bernal, F., 2010. Absolute geomagnetic intensity data from preclassic Guatemalan pottery, *Phys. Earth planet. Inter.*, 180, 1-2, 41-51

Barbetti, M., 1979. Determination of ancient geomagnetic strengths from specimens with multi-component magnetizations, *J. Arch. Sci.*, 6, 195-199

Ben-Yosef, E., Ron, H., Tauxe, L., Agnon, A., Genevey, A., Levy, T.E., Avner, U. & Najjarr, M., 2008. Application of copper slag in geomagnetic archaeointensity research, *J. Geophys. Res.*, 113, B08101, doi:10.1029/2007JB005235

Ben-Yosef, E., Tauxe, L., Levy, T.E., Shaar, R., Ron, H. & Najjar, M., 2009. Geomagnetic intensity spike recorded in high resolution slag deposit in southern Jordan, *Earth planet. Sci. Lett.*, 287, 529-539

Biggin, A.J., 2006. First-order symmetry of weak-field partial thermoremanence in multi-domain (MD) ferromagnetic grains: 2. Implications for Thellier-type paleointensity determination, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 245, 454-470, doi:10.1016/j.epsl.2006.02.034

Biggin, A.J., 2010. Are systematic differences between thermal and microwave Thellier-type palaeointensity estimates a consequence of multidomain bias in the thermal results ?, *Phys. Earth planet. Inter.*, 180, 16-40

Biggin, A.J. & Thomas, D.N., 2003. The application of acceptance criteria to results of Thellier paleointensity experiments performed on samples with psuedo-single-domain-like characteristics, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 138, 279-287

Biggin, A.J., Perrin, M. & Dekkers, M.J., 2007. A reliable absolute palaeointensity determination obtained from a non-ideal recorder, *Earth planet. Sci. Lett.*, 257, 545-563

Burakov, K.S., Nachasova, I.E. & Mata, C., 2006. Geomagnetic field intensity in the first millenium BC from data on ceramics of the Los Villares archaeological monument (Spain), *Fizika Zemli*, 11, 84-92 [Izvestiya Physics of the Solid Earth, 42(11), 942-950]

Catanzariti, G., Gomez-Paccard, M., McIntosh, G., Pavon-Carrasco, F.J., Chauvin, A. & Osete, M.L., 2012. New archaeomagnetic data recovered from the study of Roman and Visigothic remains from central Spain (3rd-7th centuries), *geophys. J. Int.*, doi:10.1111/j.1365-246X.2011.05315.x

Chauvin, A., Garcia, Y., Lanos, P. & Laubenheimer, F., 2000. Palaeointensity of the geomagnetic field recovered on archaeomagnetic sites from France, *Phys. Earth planet. Inter.*, 120, 111-136

Chauvin, A., Roperch, P &, Levi, S., 2005. Reliability of geomagnetic paleointensity data: the effects of the NRM fraction and concave-up behavior on paleointensity determinations by the Thellier method, *Phys. Earth planet. Inter.*, 150, 265-286

Coe, R.S., Gromme, S. & Mankinen, E.A., 1978. Geomagnetic palaeointensities from radiocarbon-dated lava flows on Hawaii and the question of the Pacific nondipole low, *J. geophys. Res.*, 83, 1740-1756

Coe, R.S., Riisager, J., Plenier, G., Leonhardt, R. & Krasa, D., 2004. Multidomain behavior during Thellier paleointensity experiments: results from the 1915 Mt. Lassen flow, *Phys. Earth planet. Inter.*, 147, 141-153

De Marco, E., Spatharas, V., Gomez-Paccard, M., Chauvin & A., Kondopoulou, D., 2008. New archaeointensity results from archaeological sites and variation of the geomagnetic field intensity for the last 7 millennia in Greece, *Phys. Chem. Earth*, 33, 578-595

Donadini, F., Korte, M. & Constable, C.G., 2009. Geomagnetic field for 0-3 ka: 1. New data sets for global modeling, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 10, 6, Q06007, doi:10.1029/2008GC002295

Draeger, U., Prévôt, M., Poidras, T. & Riisager, J., 2006. Single-domain chemical, thermochemical and thermal remanences in a basaltic rock, *Geophys. J. Int.*, 166, 12-32

Dumberry, M., Finlay, C.C., 2007. Eastward and westward drift of the Earth's magnetic field for the last three mellennia, *Earth planet. Sci. Lett.*, 254, 146-157

Dunlop, D.J., Zhang, B. & Özdemir, Ö, 2005. Linear and nonlinear Thellier paleointensity behaviour of natural minerals, *J. Geophys. Res.*, 110, B01103, doi:10.1029/2004JB003095

Dunlop, D.J., 2011. Physical basis of the Thellier-Thellier and Related Paleointensity Methods, *Phys. Earth planet. Inter.*, 187(3-4), 118-138

Fabian, K., 2009. Thermochemical remanence acquisition in single-domain particle ensembles: a case for possible overestimation of the geomagnetic palaeointensity, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 10, Q06Z03, doi:10.1029/2009GC002420

Fox, J.M.W. & Aitken, M.J., 1980. Cooling rate dependance of thermoremanent magnetization, *Nature*, 283, 462-463

Gallet, Y., Genevey, A. & Courtillot, V., 2003. On the possible occurrence of « archaeomagnetic jerks » in the geomagnetic field over the past three millennia, *Earth planet. Sci. Lett.*, 214, 237-242

Gallet, Y. & Le Goff, M., 2006. High-temperature archeointensity measurements from Mesopotamia, *Earth planet. Sci. Lett.*, 241, 159-173

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

Gallet, Y., Genevey, A., Le Goff, M., Warmé, N., Gran-Aymerich, J. & Lefèvre, A., 2009a. On the use of archaeology in geomagnetism and vice-versa: recent developments in archeomagnetism, *C.R. Physique*, 10, 630-648

Gallet, Y., Hulot, G., Chulliat, A. & Genevey, A., 2009b. Geomagnetic field hemispheric asymmetry and archeomagnetic jerks, *Earth planet. Sci. Lett.*, 284, 279-286

Garcia, Y., 1996. *Variation de l'intensité du champ magnétique en France durant les deux derniers millénaires*, PhD thesis, University of Rennes 1, Mémoires de Géosciences Rennes, 354 p.

Genevey, A. & Gallet, Y., 2002. Intensity of the geomagnetic field in Western Europe over the past 2000 years: new data from ancient French pottery, *Phys. Earth. planet. Inter.*, 131, 81-89

Genevey, A., Gallet, Y. & Margueron, J.-C., 2003. Eight thousand years of geomagnetic field intensity variations in the Eastern Mediterranean, *J. Geophys. Res.*, 108(B5), 2228, doi:10.1029/2001JB001612

Genevey, A., Gallet, Y., Constable, C.G., Korte, M. & Hulot, G., 2008. Archeoint: an upgraded compilation of geomagnetic field intensity data for the past ten millennia and its application to the recovery of the past dipole moment, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 9(4), Q04038, doi:10.1029/2007GC001881

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

Goguitchaichvili, A., Greco, C. & Morales, J., 2011. Geomagnetic field intensity behavior in South America between 400AD and 1800AD: first archeointensity results from Argentina, *Phys. Earth planet. Inter.*, 186, 3-4, 191-197

Gomez-Paccard, M., Chauvin, A., Lanos, P., Thiriot, J. & Jimenez-Castillo, P., 2006. Archeomagnetic study of seven contemporaneous kilns from Murcia (Spain), *Phys. Earth planet. Inter.*, 157, 16-32

Gomez-Paccard, M., Chauvin, A., Lanos, P. & Thiriot, J., 2008. New archaeointensity data from Spain and the geomagnetic dipole moment in Western Europe over the past 2000 years, *J. Geophys. Res.*, 113, B09103, doi:10.1029/2008JB005582

Gomez-Paccard, M., McIntosh, G., Chauvin, A., Beamud, E., Pavon-Carrasco, & F.J., Thiriot, J., 2012a. Archaeomagnetic and rock magnetic study of six kilns from NorthAfrica (Tunisia and Morocco), *Geophys. J. Int.*, doi :10.1111/j.1365-246X.2011.05335.x

Gomez-Paccard, M., Chauvin, A., Lanos, P., Dufresne, P., Kovacheva, M., Hill, M.J., Beamud, E., Blain, S., Bouvier, A., Guibert, P. and Archaeological Working Team, 2011b. Improving our knowledge of the rapid geomagnetic intensity variation observed in Europe around 800 AD: new archaeointensity data from Western Europe, submitted to *Earth Planet. Sci. Lett.*

Gubbins, D., Willis, A.P. & Streenivasan, B., 2007. Correlation of Earth's magnetic field with lower mantle thermal and seismic structure, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 162, 256-260

Hartmann, G.A., Genevey, A., Gallet, Y., Trindade, R.I.F., Le Goff, M., Najjar, R., Etchevarne, C. & Afonso, M.C., 2011. New historical archeointensity data from Brazil: evidence for a large regional non-dipole field contribution over the past few centuries, *Earth planet. Sci. Lett.,* doi:10.1016/j.epsl.2011.03.030

Hedley, I. & Wagner, G.C., 1991. A magnetic investigation of roman and pre-roman pottery, in *Archaeometry'90*, pp. 275-284, eds Pernicka, E. & Wagner, G.C., Birkhauser Verlag, Basel

Hervé, G., Schnepp, E., Chauvin, A., Lanos, P. & Nowaczyk, N., 2011. Archaeomagnetic results on three Early Iron Age salt-kilns from Moyenvic (France), *Geophys. J. Int.*, 185, 144-156

Hill, M.J., Lanos, P., Chauvin, A., Vitali, D. & Laubenheimer, F., 2007. An archaeomagnetic investigation of a Roman amphorae workshop in Albinia (Italy), *Geophys. J. Int.*, 169, 471-482

Hill, M.J., Lanos, P., Denti, M. & Dufresne, P., 2008. Archaeomagnetic investigation of bricks from the VIII century BC Greek-indigenous site of Incoronata (Metaponto, Italy), *Phys. Chem. Earth,* 33, 6-7, 523-533

Jackson, A. & Finlay, C.C., 2007. Geomagnetic secular variation and its applications to the core, *Treatise on Geophysics*, vol. 5, Geomagnetism, edited by M. Kono, chap. 5, Elsevier, New York

Kirschvink, J.L., 1980. The least-squares line and plane and the analysis of palaeomagnetic data, *Geophys. J. R. astr. Soc.*, 62, 699-718

Korte, M., Donadini, F. & Constable, C.G., 2009. Geomagnetic field for 0-3 ka: 2. A new series of time-varying global models, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 10, 6, Q06008,

doi:10.1029/2008GC002297

Korte, M. & Constable, C., 2011. Improving geomagnetic field reconstructions for 0-3ka, *Phys. Earth planet. Int.*, 188(3-4), 247-259

Kostadinova, M. & Kovacheva, M., 2008. Case study of the Bulgarian Neolithic archaeological site of Piperkov Chiflik and its archaeomagnetic dating, *Phys. Chem. Earth*, 33, 511-522

Kovacheva, M., Hedley, I., Jordanova, N., Kostadinova, M. & Gigov, V., 2004. Archaeomagnetic dating of archaeological sites from Switzerland and Bulgaria, *Journal of Archaeological Science,* 31, 1463-1479

Kovacheva, M., Boyadziev, Y., Kostadinova-Avramova, M. & Jordanova, N., 2009. Updated archeomagnetic data set of the past eight millenia from the Sofia laboratory, Bulgaria, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, doi:10.1029/2008GC002347

Le Goff, M., 1990. Lissage et limites d'incertitude des courbes de migration polaire: pondération des données et extension bivariante de la statistique de Fisher, *C. R. Acad. Sci.*, Sér II, 311, 1191-1198

Le Goff, M., Henry, B. & Daly, L., 1992. Practical method for drawing a VGP path, *Phys Earth planet Int.*, 70, 201-204

Levi, S., 1977. The effect of magnetic particle size on palaeointensity determinations of the geomagnetic field, *Phys. Earth planet. Inter.*, 13, 245-259

Lifton, N., Smart, D.F. & Shea, M.A., 2008. Scaling time-integrated in situ cosmogenic nuclide production rates using a continuous geomagnetic model, *Earth. Planet. Sci. Lett.*, 268, 190-201

McClelland Brown, E., 1984. Experiments on TRM intensity dependence on cooling rate, *J. geophys. Res.*, 11, 205-208

Morales, J., Goguitchaichvili, A., Aguilar-Reyes, B., Pineda-Duran, M., Camps, P., Carvallo, C. & Calvo-Rathert, M., 2011. Are ceramics and bricks reliable absolute geomagnetic intensity carriers?, *Phys. Earth planet. Inter.*, 187(3-4), 310-321

Nachasova, I.E. & Burakov, K.S., 2009. Variation of the intensity of the Earth's magnetic field in Portugal in the 1st Millenium BC, *Fizika Zemli*, 7, 54-62 [Izvestiya Physics of the Solid Earth, 45(7), 595-603]

Paterson, G.A., 2011. A simple test for the presence of multidomain behavior during paleointensity experiments, *J. geophys. Res.*, 116, B10104, doi:10.1029/2011JB008369

Pavon-Carrasco, F.J., Osete, M.L., Torta, J.M. & Gaya-Piqué, L.R., 2009. A regional archaeomagnetic model for Europe for the last 3000 years, SCHA.DIF.3K: Applications to archaeomagnetic dating, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 10, 3, Q03013, doi:10.1029/2008GC002244

Prévôt, M., Mankinen, E.A., Coe,, R.S. & Gromme, C.S., 1985. The Steens Mountain (Oregon) geomagnetic polarity transition, 2. Field intensity variations and discussion of reversal models, *J. geophys. Res.*, 90, B12, 10417-10448

Py, M. (ed), 2009. *Lattara, Lattes (Hérault), comptoir méditerranéen entre Etrusques, Grecs et Romains*, Errance, Paris, 348 p.

Reimer, P.J., Baillie, M.G.L., Bard, E., Bayliss, A., Beck, J.W., Bertrand, C.J.H., Blackwell, P.G., Buck, C.E., Burr, G.S., Cutler, K.B., Damon, P.E., Edwards, R.L., Fairbanks, R.G., Friedrich, M., Guilderson, T.P., Hogg, A.G., Hughen, K.A., Kromer, B., McCormac, G., Manning, S., Ramsey, C.B., Reimer, R.W., Remmele, S., Southon, J.R., Stuiver, M., Talamo, S., Taylor, F.W., van der Plicht, J. & Weyhenmeyer, C.E., 2004. IntCal04 terrestrial radiocarbon age calibration, 0-26 cal kyr BP. *Radiocarbon*, 46, 3, 1029-1058

Rodriguez-Ceja, M., Goguitchaichvili, A., Morales, J., Ostrooumov, M., Manzanilla, L.R., Aguilar-Reyes, B. & Urrutia-Fucugauchi, J., 2009. Integrated archeomagnetic and micro-Raman

spectroscopy study of Pre-Columbian ceramica from the Mesoamerican formative village of Cuanalan, Teotihuacan Valley, Mexico, *J. Geophys. Res.*, 114, B4, doi:10.1029/2008JB006106

Rogers, J., Fox, J.M.W. & Aitken, M.J., 1979. Magnetic anisotropy in ancient pottery, *Nature*, 277, 644-646

Sapin, C., Baylé, M., Büttner, S., Guibert, P., Blain, S., Lanos, P., Chauvin, A., Dufresne, P. & Oberlin, C., 2008. Archéologie du bâti et archéométrie au Mont-Saint-Michel, nouvelles approches de Notre-Dame-sous-Terre, *Archéologie Médiévale*, 38, 71-122

Schnepp, E., Lanos, P. & Chauvin, A., 2009. Geomagnetic paleointensity between 1300 and 1750 A.D. derived from a bread oven floor sequence in Lübeck, Germany, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 10, Q08003, doi:10.1029/2009GC002470

Selkin, P.A. & Tauxe, L., 2000. Long-term variations in palaeointensity, *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A*, 358, 1065-1088

Shaar, R., Ben-Yosef, E., Ron, H., Tauxe, L., Agnon, A. & Kessel, R., 2011a. Geomagnetic field intensity: How high can it get ? How fast can it change ? Constraints from Iron Age copper slag, *Earth planet. Sci. Lett.*, 301, 1-2, 297-306

Shaar, R., Ron, H., Tauxe, L., Kessel, R., Agnon, A., 2011b. Paleomagnetic field intensity derived from non-SD. Testing the Thellier IZZI technique on MD slag and a new bootstrap procedure, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 310, 213-224

Stark, F., Cassidy, J., Hill, M.J., Shaw, J. & Sheppard, P., 2010. Establishing a first archaeointensity record for the SW Pacific, *Earth planet. Sci. Lett.*, 298, 113-124

Tema, E., 2009. Estimate of the magnetic anisotropy effect on the archaeomagnetic inclination of ancient bricks, *Phys. Earth planet. Inter.*, 176, 213-223

Tema, E., Goguitchaichvili, A. & Camps, P., 2009. Archaeointensity determinations from Italy: new data and the Earth's magnetic field strength variation over the past three millenia, *Geophys. J. Int.*, 180, 2, 596-608

Thellier, E. & Thellier, O., 1959. Sur l'intensité du champ magnétique terrestre dans le passé historique et géologique, *Ann. Geophys.*, 1, 37-52

Veitch, R.J., Hedley, G. & Wagner, J.J., 1984. An investigation of the intensity of the geomagnetic field during Roman times using magnetically anisotropic bricks and tiles, *Arch. Sci (Geneva)*, 37, 3, 359-373

Wardinski, I & Korte, M., 2008. The evolution of the core-surface flow over the last seven thousands years, *J. Geophys. Res.*, 113, B05101, doi:10.1029/2007JB005024

Yu., Y., Dunlop, D.J., 2002. Multivectorial paleointensity determination from the Cordova Gabbro, southern Ontario, *Earth planet. Sci. Lett.*, 203, 983-998

Yu, Y., Tauxe, L. & Genevey, A., 2004. Toward an optimal geomagnetic field intensity dtermination technique, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 5(2), Q02H07, doi:10.1029/2003GC000630

Yu, Y., 2011. Importance of cooling-rate dependence of thermoremanence in paleointensity determination, *J. Geophys. Res.*, 116, B09101, doi:10.1029/2011JB008388

Supplementary materials

Appendix A: Archaeointensity results of kilns and hearths

Appendix B: Archaeointensity results of Mouliets-et-Villemartin 33296A and Villeneuve-sur-Lot 47323B hearths

Appendix C: Archaeointensity results of Lattes pottery sherds (34129B-C-D-E-F-G)

Appendix C: Archaeointensity curve in Western Europe at Paris.

Appendix A: Archaeointensity results of kilns and hearths

	Sample	NRM (A/m)	χ (10^{-5} SI)	Jrs (A/m)	Hcr (mT)	T1 - T2 (°C)	n	D (°)	I (°)	F ± std (µT)	Mad (°)	Dang (°)	f	g	q	ß	Derive (%)	Anisotropy K_1/K_3	K_1/K_2	K_2/K_3	D_a(°)	I_a (°)	F_a ± std (µT)	Cooling rate correction %corr	%evol	F_{a+c} ± std (µT)
24453A	**St Martin de Fressengeas / Grotte des Fraux / FY8**																									
	All specimens were rejected due to mineralogical evolution during heating																									
MOB*	**Moyenvic / les Crôleurs / FR2086**																									
	Already published in Hervé *et al.*, 2011																									
MOC*	**Moyenvic / les Crôleurs / FR3074**																									
	Already published in Hervé *et al.*, 2011																									
66136E	**Perpignan / Ruscino / FY5106**																									
	66136E-7N14	9,4E-02	4,1E+01			100 - 440	6	2.2	68.4	77.0 ± 5.9	2.7	1.9	0.81	0.80	8.4	0.077	59.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	66136E-10N12	1,1E+00	1,2E+02			100 - 550	10	7.6	54.4	65.2 ± 2.7	2.6	0.7	0.83	0.88	17.5	0.042	4.7	1.36	1.06	1.28	358.0	61.1	74.8 ± 3.1	0.2	0.2	-
	66136E-17N11	2,6E-01	1,8E+01			100 - 520	8	20.5	61.7	78.5 ± 2.2	2.6	0.7	0.79	0.85	23.7	0.029	3.8	1.31	1.14	1.14	8.4	65.5	82.7 ± 2.4	6.6	2.5	77.2 ± 2.3
	66136E-19N13	9,0E-01	9,0E+01			100 - 550	10	15.6	53.1	68.9 ± 2.2	2.2	1.5	0.84	0.88	23.0	0.032	3.2	1.28	1.13	1.13	12.3	58.7	73.1 ± 2.4	1.8	1.0	71.8 ± 2.4
	66136E-20N12	1,5E-01	4,8E+01			100 - 440	6	16.6	62.6	71.3 ± 1.5	2.2	2.6	0.69	0.80	26.2	0.021	26.2	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MOA*	**Moyenvic / les Crôleurs / FR1003**																									
	Already published in Hervé *et al.*, 2011																									
21711A	**Vix / Sondage Mont-Lassois Est 2009**																									
	21711A-2A13	7,9E-01	2,9E+02			100 - 530	10	12.2	73.6	65.7 ± 2.7	2.5	0.3	0.86	0.87	18.3	0.041	-	-	-	-	-	-	-	9.0	-0.9	67.2 ± 2.5
	21711A-3A22	1,5E+00	4,8E+02	36.1	17.1	100 - 520	8	350.7	70.6	73.5 ± 4.3	1.7	1.0	0.72	0.82	10.1	0.059	-	-	-	-	-	-	-	9.5	7.4	71.1 ± 3.9
	21711A-4A12	6,6E-01	2,8E+02			100 - 550	9	359.8	64.6	70.9 ± 2.8	2.4	1.3	0.85	0.86	18.5	0.044	-	-	-	-	-	-	-	6.0	7.9	70.9 ± 2.8
	21711A-5B12	1,0E+00	5,3E+02	34.5	27.2	100 - 480	7	1.9	56.9	71.2 ± 2.9	2.2	1.2	0.74	0.82	14.7	0.041	-	-	-	-	-	-	-	2.7	2.4	70.1 ± 2.8
	21711A-7A13	8,4E-01	3,6E+02			170 - 480	6	1.5	65.8	71.6 ± 4.1	2.7	2.8	0.56	0.78	7.7	0.057	-	-	-	-	-	-	-	2.8	2.5	72.4 ± 4.0
	21711A-8A11	9,3E-01	3,9E+02			100 - 480	7	1.0	59.0	69.3 ± 3.5	2.9	1.9	0.64	0.80	10.1	0.051	-	-	-	-	-	-	-	2.8	1.7	71.7 ± 3.4
	21711A-9A21	3,4E-01	1,5E+02			100 - 440	7	4.3	54.6	73.2 ± 2.6	2.5	2.7	0.73	0.82	16.8	0.035	-	-	-	-	-	-	-	7.6	-0.7	73.3 ± 2.4
	21711A-10A11	4,0E-01	2,1E+02			100 - 470	8	357.9	71.1	56.4 ± 2.0	3.6	1.0	0.74	0.84	17.8	0.035	-	-	-	-	-	-	-	9.0	-0.8	55.4 ±1.8
	21711A-11A21	4,9E-01	2,6E+02	13.2	21.4	100 - 470	8	359.7	66.3	62.0 ± 1.6	3.6	2.1	0.77	0.84	25.9	0.025	-	-	-	-	-	-	-	7.9	-0.6	63.3 ± 1.5
	21711A-14A13	4,6E-01	2,1E+02	12.3	22.2	100 - 440	6	357.0	67.5	65.1 ± 1.5	4.9	1.6	0.61	0.76	20.1	0.023	-	-	-	-	-	-	-	-0.1	1.3	-
	21711A-15A11	3,6E-01	2,0E+02			100 - 390	6	9.7	67.2	66.4 ± 1.5	2.5	2.3	0.49	0.78	16.8	0.024	-	-	-	-	-	-	-	6.7	-1.1	65.9 ± 1.4
	21711A-16A13	3,7E-01	2,0E+02			100 - 350	5	354.8	68.9	81.2 ± 4.1	4.2	4.5	0.47	0.72	6.8	0.052	-	-	-	-	-	-	-	6.6	-0.8	82.1 ± 3.8
69123L	**Lyon / Vaise, 4-6 rue du Mont d'Or / FY63**																									
	69123L-5B13	5,1E+00	8,4E+02			100 - 490	7	0.1	66.4	83.5 ± 5.6	3.0	2.2	0.65	0.82	8.0	0.067	7.6	1.076	1.027	1.048	358.9	65.8	81.7 ± 5.4	1.2	0.6	80.7 ± 5.3
	69123L-6A12	3,5E+00	5,3E+02	79.2	21.8	100 - 605	13	1.0	64.3	66.4 ± 3.5	1.6	0.8	1.02	0.90	17.4	0.053	-3.2	1.048	1.014	1.034	0.6	65.1	67.1 ± 3.5	4.6	-1.3	64.0 ± 3.4
	69123L-7A13	3,0E+00	5,3E+02	6.5	26.6	100 - 605	13	357.5	72.0	69.8 ± 3.1	1.5	1.0	0.99	0.90	20.3	0.044	-3.4	1.036	1.019	1.017	357.6	72.4	71.6 ± 3.1	2.4	2.0	69.9 ± 3.1
	69123L-8B11	5,7E+00	1,4E+03			100 - 490	7	0.6	67.7	86.5 ± 5.9	3.1	1.8	0.77	0.82	9.2	0.069	2.1	1.041	1.026	1.015	359.6	67.1	84.9 ± 5.8	2.8	-0.4	82.5 ± 5.6
	69123L-10A13	5,4E+00	1,8E+03			100 - 530	10	358.6	70.0	84.2 ± 4.0	3.4	2.2	0.71	0.88	13.2	0.047	4.8	1.081	1.039	1.041	355.7	70.7	81.1 ± 3.8	2.0	-1.6	79.5 ± 3.7
	69123L-11A12	6,7E+00	1,8E+03			100 - 490	7	358.3	66.6	86.1 ± 4.4	4.2	0.5	0.51	0.82	8.3	0.051	-1.9	1.058	1.047	1.011	355.3	66.5	88.2 ± 4.4	-0.6	0.5	88.7 ± 4.4
	69123L-12B12	6,9E+00	1,6E+03			100 - 490	7	357.3	63.7	77.8 ± 5.3	3.9	2.9	0.57	0.82	6.9	0.068	0.1	1.086	1.032	1.052	354.4	64.6	81.6 ± 5.5	0.0	-1.8	-
	69123L-13B13	6,8E+00	1,2E+03	132.9	23.2	100 - 605	13	351.1	64.0	58.2 ± 3.7	2.5	2.0	0.95	0.88	13.1	0.064	-6.0	1.080	1.006	1.073	350.3	65.3	58.7 ± 3.8	1.9	-0.8	57.6 ± 3.7
	69123L-14A12	7,4E+00	1,6E+03			100 - 490	7	351.4	64.0	86.0 ± 4.9	3.4	0.6	0.51	0.82	7.4	0.057	-0.9	1.050	1.017	1.033	352.0	63.4	84.8 ± 4.8	-0.7	-2.2	-
	69123L-16B13	3,1E+00	6,4E+02			100 - 605	13	354.8	63.1	60.9 ± 2.4	1.9	1.2	0.96	0.89	22.3	0.039	-5.3	1.058	1.033	1.024	353.9	63.3	63.9 ± 2.5	1.3	-4.5	-
	69123L-17A12	5,0E+00	1,6E+03			100 - 530	10	357.4	61.3	84.3 ± 3.7	2.9	1.7	0.72	0.88	14.4	0.044	5.2	1.032	1.004	1.028	356.5	61.9	86.1 ± 3.8	1.5	-2.5	-
	69123L-18B12	5,4E+00	1,9E+03			100 - 500	9	358.3	64.1	93.0 ± 2.2	4.4	2.7	0.55	0.86	19.9	0.024	6.0	1.035	1.027	1.008	356.6	64.0	92.0 ± 2.2	1.0	-1.3	-
	69123L-19A12	5,2E+00	1,0E+03			100 - 490	7	355.5	64.6	81.3 ± 6.7	2.9	3.3	0.64	0.82	6.5	0.082	-1.4	1.078	1.055	1.022	353.9	63.6	82.0 ± 6.7	3.7	0.4	79.0 ± 6.5
	69123L-20B12	7,8E+00	1,4E+03	131.7	19.5	100 - 605	13	0.6	66.4	73.0 ± 2.7	3.0	1.6	0.90	0.88	21.9	0.036	-6.8	1.021	1.009	1.012	0.9	66.5	72.7 ± 2.6	-	-	-

Appendix A: Archaeointensity results of kilns and hearths (continued)

																	Anisotropy							Cooling rate correction		
	Sample	NRM (A/m)	χ (10^{-5} SI)	Jrs (A/m)	Hcr (mT)	T1 - T2 (°C)	n	D (°)	I (°)	F ± std (µT)	Mad (°)	Dang (°)	f	g	q	ß	Derive (%)	K_1/K_3	K_1/K_2	K_2/K_3	D_a(°)	I_a (°)	F_a ± std (µT)	%corr	%evol	F_{a+c} ± std (µT)
34032A	**Béziers / ZAC de la Domitienne / FR1009**																									
	34032A-2A31	3,2E+00	3,6E+02			100 - 520	9	344.5	60.0	82.4 ± 1.9	3.2	2.1	0.81	0.83	28.5	0.023	-4.6	1.042	1.036	1.005	342.5	60.5	83.2 ± 1.9	15.5	-0.3	70.3 ± 1.6
	34032A-4A11	1,6E+00	1,6E+02	4.0	26.3	180 - 520	8	341.0	61.4	73.2 ± 3.4	2.6	0.6	0.96	0.83	17.1	0.046	-8.2	1.074	1.048	1.025	341.3	62.1	77.1 ± 3.6	11.9	2.2	67.9 ± 3.1
	34032A-6A21	1,8E+01	1,6E+02			180 - 520	8	354.1	65.9	77.1 ± 2.7	1.9	0.9	0.86	0.84	20.7	0.035	-3.7	1.086	1.041	1.044	355.4	65.2	77.9 ± 2.7	5.3	1.7	73.8 ± 2.6
	34032A-7A22	1,2E+01	9,1E+02	129.9	23.5	160 - 540	9	2.3	61.3	74.2 ± 1.0	2.3	0.5	0.96	0.85	64.7	0.013	-5.4	1.116	1.043	1.071	5.0	62.9	79.0 ± 1.0	16.0	1.6	66.4 ± 0.9
	34032A-8A22	1,1E+01	7,9E+02	99.8	21.1	100 - 520	9	2.4	64.3	79.1 ± 3.2	2.2	1.5	0.85	0.83	17.8	0.04	-3.3	1.086	1.026	1.058	4.6	64.9	84.7 ± 3.4	13.1	0.6	73.6 ± 2.9
	34032A-9A21	2,0E+01	1,3E+03			160 - 540	9	0.6	67.5	74.1 ± 3.2	1.4	0.2	0.99	0.77	18.1	0.043	-6.4	1.111	1.051	1.058	356.6	66.7	75.6 ± 3.2	8.5	0.6	69.2 ± 3.0
	34032A-10A11	4,6E+00	4,9E+02			100 - 565	11	341.3	66.6	78.7 ± 3.2	2.1	0.8	0.93	0.85	19.4	0.041	-6.8	1.065	1.039	1.026	342.8	66.0	82.5 ± 3.4	11.4	-0.9	73.1 ± 3.0
	34032A-11A31	1,1E+01	1,4E+03			160 - 540	9	354.4	66.9	70.9 ± 1.7	1.5	0.5	0.97	0.84	34.1	0.024	-5.0	1.087	1.049	1.035	356.5	67.1	75.6 ± 1.8	9.6	0.0	68.3 ± 1.6
	34032A-12A11	9,4E+00	1,4E+03			180 - 520	8	352.2	64.2	76.2 ± 2.8	2.0	0.6	0.88	0.82	20.4	0.036	-1.0	1.091	1.050	1.039	353.8	65.2	79.2 ± 2.9	14.7	1.3	67.6 ± 2.4
	34032A-13A23	8,0E+00	9,5E+02			100 - 540	10	3.4	65.4	71.8 ± 2.0	1.9	0.1	0.96	0.86	29.6	0.028	-5.2	1.126	1.082	1.040	356.7	66.5	75.6 ± 2.1	11.2	-0.8	67.1 ± 1.9
	34032A-14A21	1,5E+01	1,2E+03			180 - 565	10	353.7	61.2	78.9 ± 1.4	1.3	0.6	0.96	0.85	46.3	0.018	-5.8	1.103	1.016	1.086	355.8	63.7	82.6 ± 1.5	10.3	0.4	74.1 ± 1.3
	34032A-15A12	3,7E+00	3,4E+02			100 - 540	10	355.5	67.1	70.9 ± 1.8	2.8	2.4	0.73	0.81	24.0	0.025	-4.7	1.081	1.014	1.066	358.0	67.2	74.8 ± 1.9	8.4	0.5	68.5 ± 1.7
	34032A-16A12	1,9E+01	1,6E+03	197.9	22.1	160 - 560	9	354.5	64.5	71.6 ± 1.6	1.8	0.1	0.98	0.83	37.1	0.022	-9.8	1.126	1.044	1.079	356.3	65.4	79.4 ± 1.8	8.2	0.3	72.9 ± 1.6
	34032A-21A13	6,1E+00	4,9E+02			100 - 560	11	352.3	61.8	71.7 ± 1.9	2.4	1.0	0.89	0.84	29.7	0.026	-8.2	1.153	1.117	1.033	354.3	62.8	79.5 ± 2.1	10.4	0.0	71.2 ± 1.9
13055K	**Marseille / 9 rue Leca / FR1**																									
	13055K-1P21	1,1E+01	1,1E+03			250 - 560	10	8.7	68.8	43.6 ± 0.9	6.4	2.9	0.49	0.85	20.3	0.020	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	13055K-1P31	1,0E+01	1,4E+03			250 - 560	10	8.6	70.4	43.2 ± 1.0	6.6	3.5	0.58	0.86	21.7	0.023	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	13055K-2P12	2,4E+00	6,1E+02			200 - 530	9	19.0	69.1	42.1 ± 1.9	4.8	1.7	0.65	0.84	12.1	0.045	-0,2	1.097	1.029	1.066	16.1	71.2	43.6 ± 2.0	4.7	-5.6	-
	13055K-3P11	3,8E+00	4,6E+02			100 - 530	10	355.6	69.2	66.9 ± 2.2	3.8	0.2	0.83	0.81	20.1	0.033	0,3	1.057	1.021	1.034	352.9	69.8	66.9 ± 2.3	5.6	-1.7	63.2 ± 2.2
	13055K-3P21	3,1E+00	4,8E+02			100 - 570	12	3.6	67.5	60.8 ± 1.8	3.9	0.1	0.87	0.87	25.6	0.029	1,2	1.072	1.019	1.052	3.7	68.6	63.9 ± 1.9	1.6	-5.9	-
	13055K-4P11	1,5E+01	1,2E+03			100 - 500	10	6.9	70.0	81.1 ± 1.1	2.0	1.2	0.86	0.76	46.4	0.014	-1,7	1.044	1.026	1.018	4.2	70.0	81.5 ± 1.2	-0.9	-2.8	-
	13055K-4P12	1,5E+01	1,2E+03			100 - 500	10	6.0	67.8	84.0 ± 1.0	1.6	0.7	0.87	0.80	57.2	0.012	-2,6	1.045	1.005	1.039	4.6	69.3	85.6 ± 1.0	-0.7	-3.1	-
	13055K-5P21	5,4E+00	7,9E+02			100 - 520	10	1.4	66.3	64.2 ± 3.7	2.7	1.8	0.89	0.83	6.8	0.058	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	13055K-6P12	9,7E+00	1,0E+03	90.2	23.8	100 - 420	7	6.7	67.7	78.9 ± 8.5	2.6	1.7	0.79	0.79	5.8	0.108	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	13055K-6P22	8,7E+00	9,4E+02			100 - 420	7	4.6	68.0	85.4 ± 5.3	2.1	1.9	0.79	0.82	10.3	0.063	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	13055K-7P12	2,0E+01	1,0E+03			100 - 350	5	10.3	67.2	110.6 ± 3.4	3.5	5.8	0.54	0.42	7.3	0.031	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	13055K-7P22	1,6E+01	1,0E+03			100 - 420	7	7.0	66.9	84.9 ± 4.3	3.5	1.5	0.94	0.68	12.6	0.051	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	13055K-8P11	5,8E+00	8,8E+02			100 - 520	10	9.1	65.9	63.2 ± 1.8	2.3	0.2	0.89	0.83	25.9	0.029	1,5	1.056	1.026	1.029	8.5	67.7	63.4 ± 1.8	-0.5	1.7	-
	13055K-8P21	6,7E+00	1,0E+03			100 - 560	12	10.1	66.3	55.1 ± 2.2	3.2	1.0	0.89	0.89	19.4	0.041	-10,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	13055K-9P22	8,3E+00	9,3E+02			100 - 500	10	10.1	65.6	66.0 ± 0.9	2.9	1.2	0.86	0.84	52.4	0.014	-4,9	1.032	1.007	1.025	10.7	65.8	68.8 ± 0.9	2.2	-2	-
	13055K-10P11	1,8E+00	2,5E+02			100 - 530	10	5.6	71.0	63.5 ± 0.8	3.4	2.2	0.78	0.86	56.4	0.012	-8,1	1.093	1.047	1.043	10.7	72.0	67.3 ± 0.8	1.6	-8.1	-
	13055K-11P11	6,3E+00	6,0E+02			100 - 530	10	0.5	70.5	75.7 ± 2.7	2.3	0.6	0.84	0.86	19.9	0.036	-1	1.071	1.036	1.034	359.0	69.4	78.0 ± 2.9	2.0	-7	-
	13055K-11P12	6,7E+00	6,8E+02			100 - 520	10	358.4	69.8	79.5 ± 1.7	2.0	0.8	0.88	0.87	36.4	0.021	0,2	1.046	1.023	1.023	352.1	70.2	80.9 ± 1.7	0.6	-0.8	-
	13055K-12P12	1,1E+01	1,1E+03	45.6	17.7	100 - 560	12	358.0	68.4	75.3 ± 1.7	3.3	1.3	0.87	0.89	34.1	0.023	-6,7	1.043	1.002	1.041	357.5	69.9	77.3 ± 1.7	-0.4	-4.3	-
	13055K-12P22	1,1E+01	1,1E+03			100 - 560	12	359.2	70.6	77.0 ± 1.6	1.6	1.6	0.92	0.90	40.2	0.020	-4,6	1.093	1.04	1.052	3.9	72.3	78.2 ± 1.6	-1.8	-0.6	79.6 ± 1.6
	13055K-13P11	1,2E+01	1,1E+03			100 - 560	10	4.3	70.0	74.9 ± 2.5	3.5	2.2	0.87	0.89	23.5	0.033	-9,3	1.062	1.055	1.007	7.3	71.0	79.7 ± 2.6	0.9	-1.8	-
	13055K-13P12	1,4E+01	1,0E+03			100 - 480	9	2.5	67.1	81.9 ± 2.2	0.9	0.4	0.93	0.78	26.9	0.027	-4,4	1.083	1.038	1.044	3.7	68.7	86.7 ± 2.3	0.7	-0.6	-
	13055K-14P11	1,1E+01	1,1E+03			100 - 560	12	3.0	66.9	78.2 ± 1.8	2.2	1.7	0.81	0.88	31.7	0.023	-3,2	1.086	1.023	1.062	0.3	67.5	78.5 ± 1.8	-0.9	-1.7	-
	13055K-14P21	1,2E+01	1,2E+03			100 - 560	12	5.3	67.0	81.0 ± 1.8	3.2	1.6	0.79	0.87	30.2	0.023	-10,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	13055K-15P21	1,0E+01	1,4E+03	121.6	16.0	100 - 500	9	0.0	69.8	81.7 ± 2.3	1.6	0.6	0.89	0.79	25.0	0.028	-3,6	1.048	1.016	1.032	1.5	70.2	84.7 ± 2.3	-1.7	-2.3	-
	13055K-15P32	9,2E+00	1,3E+03			100 - 500	9	357.0	71.1	86.7 ± 2.1	1.5	1.3	0.84	0.80	27.8	0.024	-2,5	1.045	1.03	1.015	355.6	71.2	86.4 ± 2.1	-1.3	-1.6	-
62382D	**Gouy Saint André / le Rossignol / FR60**																									
	62382D-61A21	1,7E-01	3,6E+01			100 - 530	10	1.4	79.8	53.4 ± 2.8	4.9	0.6	0.84	0.86	14.0	0.052	3.6	1.046	1.006	1.040	3.0	80.9	52.9 ± 2.7	12.7	-0.5	46.2 ± 2.4
	62382D-63A31	1,4E+00	1,9E+02			100 - 530	10	1.0	77.5	79.9 ± 4.1	2.0	1.5	0.90	0.88	15.3	0.052	3.3	1.126	1.058	1.064	5.3	77.3	72.9 ± 3.8	9.7	0.1	65.8 ± 3.4
	62382D-70A11	2,1E+00	3,1E+02	5.5	31.1	Rejected	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	62382D-71A11	7,7E-01	1,5E+02			Rejected	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	62382D-72A31	1,8E+00	2,4E+02	4.1	46.6	100 - 390	6	357.1	56.4	67.3 ± 1.3	2.5	2.8	0.79	0.76	30.9	0.019	4.7	1.103	1.096	1.007	357.1	56.4	70.5 ± 1.4	8.7	1.7	64.4 ± 1.3
	62382D-75A12	2,8E+00	3,9E+02	4.5	33.8	100 - 530	10	351.5	49.8	72.4 ± 5.3	2.7	1.9	1.00	0.86	11.8	0.073	1.9	1.081	1.023	1.056	349.0	50.0	74.3 ± 5.5	9.5	0.7	67.2 ± 4.9
	62382D-78A21	3,8E+00	4,5E+02			Rejected	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Appendix A: Archaeointensity results of kilns and hearths (continued)

																	Anisotropy							Cooling rate correction		
	Sample	NRM (A/m)	χ (10^{-5} SI)	Jrs (A/m)	Hcr (mT)	T1 - T2 (°C)	n	D (°)	I (°)	F ± std (μT)	Mad (°)	Dang (°)	f	g	q	ß	Derive (%)	K_1/K_3	K_1/K_2	K_2/K_3	D_a(°)	I_a (°)	F_a ± std (μT)	%corr	%evol	F_{a+c} ± std (μT)
34145A	**Lunel / Mas de Fourques / FR2110**																									
	34145A-1A11	8,3E-01	1,9E-03			100 - 520	9	350.6	65.0	70.9 ± 1.7	3.0	1.3	0.78	0.86	28.3	0.024	0.7	1.047	1.013	1.034	347.8	64.7	71.7 ± 1.7	6.9	-0.5	66.8 ± 1.6
	34145A-3A22	8,1E+00	1,4E-02	84.6	19.0	180 - 520	8	359.1	65.8	78.5 ± 1.0	1.8	1.8	0.83	0.84	55.1	0.013	-1.8	1.038	1.024	1.014	0.7	65.0	78.9 ± 1.0	12.5	7.1	69.0 ± 0.9
	34145A-4A21	7,4E+00	1,1E-02			100 - 520	9	351.2	61.2	77.7 ± 1.8	2.1	1.3	0.76	0.87	28.7	0.023	-0.2	1.076	1.016	1.059	355.1	61.7	80.4 ± 1.9	8.8	0.7	73.3 ± 1.7
	34145A-6A12	6,4E+00	1,4E-02			100 - 520	9	0.2	65.2	71.8 ± 1.3	2.4	1.9	0.74	0.87	36.1	0.018	-1.4	1.041	1.014	1.027	2.4	65.6	71.1 ± 1.2	10.2	1.7	63.8 ± 1.1
	34145A-7A21	3,0E+00	6,7E-03	67.7	19.6	100 - 565	11	358.7	64.1	69.3 ± 1.0	2.4	1.5	0.86	0.88	54.5	0.014	-2.4	1.044	1.011	1.032	357.7	63.5	69.2 ± 1.0	11.9	2.0	61.0 ± 0.8
	34145A-8A21	2,1E+00	5,2E-03			100 - 520	9	350.8	67.0	72.5 ± 1.3	2.7	2.0	0.78	0.86	36.0	0.019	-3.9	1.056	1.019	1.037	351.1	67.8	71.8 ± 1.3	10.6	7.4	64.2 ± 1.2
	34145A-9A11	3,9E+00	1,7E-02			180 - 520	8	346.9	63.0	71.1 ± 2.3	2.7	1.7	0.69	0.85	18.5	0.032	-0.9	1.038	1.025	1.012	347.2	62.5	71.8 ± 2.3	9.6	2.7	64.9 ± 2.1
	34145A-12A21	1,1E+01	1,9E-02			100 - 520	9	357.1	67.9	77.7 ± 2.0	2.9	1.5	0.80	0.87	27.3	0.025	-0.9	1.050	1.015	1.034	358.7	68.4	77.1 ± 1.9	13.0	2.0	67.1 ± 1.7
	34145A-14A12	2,9E+00	6,4E-03			100 - 565	11	0.6	63.8	71.2 ± 1.3	2.7	1.9	0.86	0.87	40.2	0.019	-3.7	1.031	1.018	1.013	359.7	64.0	71.1 ± 1.3	7.2	0.5	66.0 ± 1.2
	34145A-15A12	1,0E+01	1,7E-02			100 - 520	9	2.4	65.4	79.3 ± 1.5	2.0	1.0	0.77	0.87	35.5	0.019	-1.3	1.060	1.038	1.021	0.3	66.6	79.5 ± 1.5	10.2	8.5	71.4 ± 1.4
	34145A-16A11	7,5E+00	1,1E-02			100 - 520	9	359.1	64.7	76.2 ± 0.8	1.9	1.3	0.84	0.86	69.8	0.010	-1.0	1.057	1.030	1.027	359.3	65.1	78.6 ± 0.8	15.0	5.9	66.8 ± 0.7
	34145A-17A21	5,7E+00	1,1E-02			100 - 565	11	4.7	64.0	71.3 ± 1.2	1.5	0.7	0.79	0.88	42.5	0.016	0.2	1.055	1.012	1.042	2.2	64.7	72.1 ± 1.2	8.2	4.8	66.2 ± 1.1
	34145A-19A21	6,5E+00	1,1E-02			180 - 520	8	359.2	65.1	76.5 ± 1.0	1.7	2.0	0.85	0.84	56.8	0.013	-1.7	1.060	1.014	1.046	356.1	65.2	76.5 ± 0.9	14.2	0.8	65.6 ± 0.8
	34145A-21A21	2,6E+00	8,1E-03			100 - 520	9	354.0	64.2	76.2 ± 0.9	2.2	0.9	0.82	0.87	61.8	0.012	-1.4	1.050	1.009	1.041	354.9	65.1	75.4 ± 0.9	5.5	-1.1	71.3 ± 0.9
	34145A-22A12	6,7E+00	1,4E-02			180 - 520	8	355.7	63.1	73.8 ± 1.1	3.7	2.2	0.74	0.85	40.9	0.015	-2.8	1.054	1.012	1.042	358.2	62.9	76.0 ± 1.2	12.2	1.4	66.7 ± 1.0
	34145A-23B12	1,2E+01	1,6E-02	225.4	33.9	100 - 565	11	353.9	63.1	52.9 ± 4.8	3.6	2.6	0.90	0.89	8.9	0.090	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
62382E	**Gouy Saint André / le Rossignol / FR22**																									
	62382E-81A31	1,1E+01	1,1E+03			170 - 520	9	322.9	72.0	54.0 ± 1.9	3.2	1.6	0.88	0.84	20.5	0.036	-6.8	1.083	1.041	1.040	319.9	71.4	57.9 ± 2.1	-3.4	-4.5	-
	62382E-85A11	7,3E+00	1,1E+03			100 - 380	6	346.8	75.7	48.8 ± 1.6	2.0	2.3	0.60	0.77	14.4	0.032	-2.7	1.069	1.054	1.014	345.0	76.3	52.0 ± 1.7	0.7	-2.4	-
	62382E-93A21	2,1E+00	3,3E+02			100 - 470	8	350.8	75.1	75.7 ± 2.3	2.6	1.2	0.85	0.83	23.0	0.031	8.2	1.059	1.011	1.048	350.1	74.7	74.0 ± 2.3	10.3	4.7	66.4 ± 2.1
	62382E-94A11	6,7E+00	8,5E+02			100 - 380	6	22.7	73.1	57.2 ± 1.2	2.5	2.2	0.60	0.77	22.3	0.021	-2.0	1.111	1.054	1.055	29.5	72.8	60.9 ± 1.3	2.3	-1.4	59.5 ± 1.2
	62382E-95A21	1,6E+00	2,5E+02			100 - 480	9	352.0	71.0	60.8 ± 0.8	1.2	1.2	0.90	0.75	53.4	0.013	-2.0	1.088	1.061	1.025	355.7	69.8	62.4 ± 0.8	0.6	0.2	62.0 ± 0.8
	62382E-97A11	4,0E+00	3,8E+02			100 - 500	9	343.0	71.0	66.3 ± 1.4	2.7	2.8	0.96	0.86	40.1	0.021	5.7	1.154	1.030	1.121	350.2	72.4	65.7 ± 1.3	7.4	3.5	60.8 ± 1.3
	62382E-98A21	1,8E+00	1,5E+02	19.6	27.5	100 - 530	10	339.1	68.3	73.7 ± 6.2	3.0	3.8	0.66	0.85	6.8	0.085	-3.4	1.194	1.068	1.118	337.4	70.9	86.2 ± 7.3	3.9	-1.8	82.8 ± 7.0
	62382E-99A11	2,9E+00	3,9E+02			100 - 380	6	326.9	66.1	67.4 ± 1.5	1.7	4.4	0.59	0.77	20.2	0.023	-7.6	1.223	1.053	1.161	328.5	69.0	67.5 ± 1.5	1.2	-2.1	-
	62382E-100A12	7,8E-01	8,8E+01			100 - 530	10	340.8	67.7	83.7 ± 5.7	3.8	3.2	0.75	0.87	9.5	0.068	-0.2	1.101	1.084	1.015	340.6	68.3	90.6 ± 6.2	6.1	-2.2	85.1 ± 5.8
	62382E-101A11	2,8E+00	3,4E+02			100 - 500	9	336.1	67.2	77.2 ± 1.3	2.6	3.2	0.94	0.86	47.6	0.017	6.7	1.102	1.023	1.077	340.1	68.2	79.9 ± 1.4	12.7	-4.0	69.8 ± 1.2
	62382E-102A11	6,7E+00	5,8E+02			100 - 420	7	6.4	79.7	60.7 ± 2.6	1.8	0.4	0.62	0.78	11.3	0.043	-3.7	1.151	1.033	1.114	27.0	79.2	58.2 ± 2.5	0.3	-2.6	-
13055L	**Marseille / place Villeneuve Bargemon**																									
	13055L-3A12	7,7E-01	2,4E+02	12.4	25.8	100 - 350	5	358.1	63.3	84.3 ± 3.1	3.9	6.1	0.43	0.74	8.7	0.037	-2.9	1.099	1.036	1.061	357.4	65.5	96.3 ± 3.6	-1.2	-0.7	97.4 ± 3.7
	13055L-4A31	6,1E-01	1,5E+02			Rejected	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	13055L-7A12	3,8E+00	8,3E+02			Rejected	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	13055L-9A13	1,8E+00	4,5E+02			170 - 520	7	3.8	54.8	56.0 ± 1.5	3.5	1.6	0.71	0.82	23.0	0.026	0.3	1.064	1.024	1.038	4.6	56.2	53.4 ± 1.4	0.0	1.3	-
	13055L-11A13	8,8E-01	3,1E+02			100 - 380	6	329.4	64.9	63.2 ± 3.1	4.6	7.7	0.46	0.79	7.5	0.049	-4.4	1.096	1.048	1.046	330.4	66.6	68.1 ± 3.4	-1.9	-0.2	69.4 ± 3.4
	13055L-12A13	2,6E+00	8,5E+02			100 - 480	9	342.3	53.9	48.1 ± 3.5	5.2	6.7	0.59	0.86	7.1	0.072	-6.2	1.188	1.072	1.109	343.7	56.9	48.9 ± 3.5	-1.6	0.1	49.7 ± 3.6
	13055L-13A14	3,0E+00	6,9E+02	52.7	24.6	170 - 520	7	340.3	62.4	60.7 ± 1.2	1.7	1.9	0.73	0.82	29.5	0.020	-3.7	1.067	1.022	1.044	341.1	62.7	64.0 ± 1.3	-	-	-
34129A	**Lattes / Saint Sauveur / FY4567**																									
	34129A-3B14	1,0E-01	3,6E+01			100 - 370	6	0.0	67.6	86.0 ± 6.0	3.8	1.7	0.61	0.79	7.0	0.069	-	-	-	-	-	-	-	15.0	3.2	73.1 ± 5.1
	34129A-5A11	3,9E-02	4,9E+01	3.8	26.2	Rejected	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	34129A-6A11	1,9E-01	6,1E+01			100 - 350	5	351.1	64.8	77.6 ± 5.1	3.7	2.4	0.42	0.74	4.8	0.065	-	-	-	-	-	-	-	9.1	4.6	70.5 ± 4.5
	34129A-7A14	9,4E-02	3,3E+01			100 - 350	5	354.1	65.5	72.6 ± 4.6	3.0	1.5	0.49	0.74	5.7	0.064	-	-	-	-	-	-	-	16.0	10.3	-
	34129A-11A11	2,0E-01	7,1E+01			100 - 370	6	0.2	64.9	82.9 ± 3.6	6.4	3.8	0.50	0.80	9.1	0.044	-	-	-	-	-	-	-	11.7	1.8	73.2 ± 3.2
	34129A-12A12	2,8E-01	8,4E+01			100 - 385	6	356.8	67.3	77.8 ± 5.0	3.5	4.3	0.54	0.80	6.6	0.065	-	-	-	-	-	-	-	8.2	4.6	71.4 ± 4.6
	34129A-13A15	7,0E-02	2,8E+01			100 - 320	4	355.8	66.1	76.8 ± 3.3	2.2	3.2	0.50	0.66	7.8	0.043	-	-	-	-	-	-	-	4.1	3.1	73.7 ± 3.1
	34129A-14A12	1,2E-01	3,9E+01			100 - 350	5	358.1	65.2	80.4 ± 4.0	3.1	0.7	0.48	0.74	7.2	0.049	-	-	-	-	-	-	-	13.3	7.9	69.7 ± 3.4
	34129A-15A11	1,3E-01	4,3E+01	2.1	22.5	100 - 370	6	351.9	67.0	88.0 ± 5.3	4.2	3.1	0.57	0.79	7.6	0.060	-	-	-	-	-	-	-	12.8	2.3	76.7 ± 4.6
	34129A-16A12	1,5E-01	5,0E+01	2.7	24.0	100 - 350	5	353.8	67.2	83.7 ± 2.9	2.5	2.8	0.52	0.75	11.4	0.034	-	-	-	-	-	-	-	10.5	5.5	74.9 ± 2.6
	34129A-17B11	5,0E-02	2,3E+01			Rejected	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	34129A-18A13	8,7E-02	3,3E+01	2.1	23.4	100 - 320	5	354.1	69.3	87.2 ± 11.4	3.5	2.7	0.48	0.74	2.7	0.131	-	-	-	-	-	-	-	13.3	2.7	75.6 ± 9.9
	34129A-19A11	5,5E-02	2,8E+01			100 - 320	4	359.5	64.0	63.9 ± 3.8	3.9	8.1	0.47	0.65	5.1	0.059	-	-	-	-	-	-	-	5.1	3.3	60.6 ± 3.6

Appendix A: Archaeointensity results of kilns and hearths (continued)

	Sample	NRM (A/m)	χ (10^{-5} SI)	Jrs (A/m)	Hcr (mT)	T1 - T2 (°C)	n	D (°)	I (°)	F ± std (μT)	Mad (°)	Dang (°)	f	g	q	ß	Derive (%)	Anisotropy K_1/K_3	K_1/K_2	K_2/K_3	D_a(°)	I_a (°)	F_a ± std (μT)	Cooling rate correction %corr	%evol	F_{a+c} ± std (μT)
62799B1	**Sorrus / la Bruyère, zone 3 / FR2B**																									
	62799B-11A12	1,8E+00	1,8E+02			100 - 600	12	341.4	70.5	46.2 ± 1.4	2.7	2.0	0.96	0.88	28.1	0.030	0.2	1.128	1.034	1.090	333.7	72.3	49.2 ± 1.6	6.4	1.0	46.0 ± 1.5
	62799B-12B21	2,7E+00	3,1E+02	18.1	19.3	100 - 565	11	336.0	64.8	48.3 ± 1.3	2.3	1.5	0.85	0.84	26.8	0.027	-2.3	1.248	1.061	1.176	336.7	70.9	54.5 ± 1.5	10.7	-0.6	53.6 ± 1.5
	62799B-13A12	3,1E+00	2,6E+02			Rejected	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
62799B2	**Sorrus / la Bruyère, zone 3 / FR2C**																									
	62799B-1A22	3,0E+00	3,4E+02			Rejected	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	62799B-2A21	3,4E+00	4,8E+02			Rejected	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	62799B-6A11	7,6E-02	1,3E+01			100 - 460	8	343.2	70.8	39.6 ± 2.9	13.5	7.3	0.17	0.84	2.0	0.073	4.1	1.072	1.035	1.036	341.8	68.9	37.9 ± 2.8	11.2	8.2	33.7 ± 2.5
62799C	**Sorrus / la Pâture à vaches / FR2**																									
Outlier	62799C-1A21	1,2E+00	2,1E+02	7.7	22.2	160 - 565	10	14.6	71.6	38.1 ± 0.6	3.0	0.9	0.91	0.84	51.3	0.015	-	-	-	-	-	-	-	6.4	-0.7	35.7 ± 0.5
	62799C-2A21	1,0E+00	1,3E+02			170 - 530	8	350.3	67.0	48.6 ± 0.6	2.8	1.0	0.80	0.81	52.0	0.013	-	-	-	-	-	-	-	3.6	0.6	46.9 ± 0.6
	62799C-3A13	4,9E-01	1,0E+02			100 - 440	6	6.8	64.4	58.9 ± 1.0	2.5	5.3	0.64	0.78	29.4	0.017	-	-	-	-	-	-	-	3.3	1.5	57.0 ± 1.0
	62799C-4A12	5,7E-01	9,5E+01			100 - 530	10	10.2	65.7	61.4 ± 1.2	2.0	3.6	0.81	0.87	37.6	0.019	-	-	-	-	-	-	-	7.5	1.9	56.8 ± 1.1
	62799C-5A22	1,4E+00	2,5E+02	25.6	29.1	100 - 530	9	4.7	66.0	50.3 ± 2.4	2.4	1.4	0.93	0.84	16.3	0.048	-	-	-	-	-	-	-	2.9	0.3	48.8 ± 2.3
	62799C-6A12	4,9E+00	6,5E+02			100 - 530	10	3.0	68.4	59.7 ± 1.4	1.5	1.0	0.98	0.87	35.8	0.024	-	-	-	-	-	-	-	3.1	0.7	57.8 ± 1.4
	62799C-7A22	1,7E+00	2,1E+02			170 - 480	6	350.8	67.7	63.0 ± 2.5	2.5	1.3	0.75	0.78	14.8	0.040	-	-	-	-	-	-	-	2.6	1.7	61.4 ± 2.4
	62799C-8A23	2,4E+00	4,1E+02			Rejected	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	62799C-9A13	3,2E+00	5,5E+02			170 - 520	7	345.6	66.8	64.0 ± 1.7	1.5	0.4	0.90	0.81	27.0	0.027	-	-	-	-	-	-	-	4.1	-	61.4 ± 1.7
	62799C-10A21	1,6E-01	8,8E+00	3.2	284.5	100 - 600	12	353.7	70.0	55.2 ± 1.5	4.4	2.0	0.55	0.78	15.4	0.028	-	-	-	-	-	-	-	-8.6	-3.9	60.0 ± 1.5
	62799C-11A21	1,6E-01	2,1E+01			Rejected	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	62799C-12A12	1,0E-01	3,3E+01			Rejected	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	62799C-13A21	4,2E-01	5,9E+01			160 - 600	11	356.8	69.1	60.1 ± 1.6	1.7	0.6	0.90	0.86	29.1	0.027	-	-	-	-	-	-	-	6.2	-3.1	56.4 ± 1.5
62382B	**Gouy Saint André / le Rossignol / FR78**																									
Outlier	62382B-21A22	3,9E+00	3,0E+02			100 - 480	9	345.9	73.3	86.2 ± 2.1	1.8	0.9	0.86	0.81	28.3	0.025	-0.8	1.079	1.028	1.050	345.4	75.4	90.9 ± 2.2	5.3	-0.4	86.1 ± 2.1
	62382B-23A32	4,4E+00	3,8E+02			100 - 530	10	344.1	74.8	64.8 ± 3.7	2.0	1.0	0.94	0.88	14.5	0.057	2.9	1.100	1.054	1.043	342.7	76.2	65.2 ± 3.7	6.7	0.7	60.8 ± 3.5
	62382B-25A11	1,5E+00	1,4E+02	15.8	29.9	100 - 530	10	319.8	61.7	81.7 ± 5.3	2.4	1.9	0.83	0.86	11.0	0.065	2.6	1.058	1.029	1.028	315.9	61.2	83.9 ± 5.4	6.5	-0.8	78.4 ± 5.1
	62382B-26A11	1,1E+01	1,0E+03			180 - 530	9	339.3	65.2	69.4 ± 1.6	3.8	4.5	0.60	0.83	21.5	0.023	1.3	1.069	1.037	1.032	337.7	69.0	69.6 ± 1.6	3.1	-10.0	-
	62382B-28A12	8,3E+00	7,0E+02			100 - 530	10	337.1	69.2	65.2 ± 1.7	2.0	0.8	0.97	0.87	32.3	0.026	2.4	1.101	1.069	1.030	335.3	70.3	66.5 ± 1.7	4.4	0.1	63.6 ± 1.6
	62382B-29A11	3,5E+00	2,8E+02			180 - 530	9	355.7	70.1	62.4 ± 1.3	3.8	2.6	0.77	0.85	32.9	0.020	-1.5	1.057	1.008	1.049	4.4	72.6	64.5 ± 1.3	4.2	-1.0	61.8 ± 1.2
	62382B-30A21	1,3E+01	8,9E+02	91.0	21.1	100 - 530	10	345.8	70.3	65.4 ± 1.3	2.1	1.2	0.98	0.85	43.8	0.019	1.0	1.163	1.119	1.039	342.6	70.2	61.0 ± 1.2	3.4	-1.0	58.9 ± 1.1
	62382B-32A21	7,5E+00	9,4E+02			100 - 480	9	359.6	67.8	56.9 ± 1.1	2.3	2.2	0.85	0.84	37.5	0.019	-2.7	1.053	1.038	1.014	356.5	67.7	58.7 ± 1.1	1.0	-1.8	-
62799A	**Sorrus / la Bruyère, zone 3 / FR1**																									
	62799A-1A11	5,7E+00	9,3E+02			220 - 530	8	352.9	68.8	52.3 ± 4.1	2.9	2.6	0.55	0.85	5.9	0.079	1.4	1.121	1.032	1.086	359.1	70.4	51.8 ± 4.1	3.0	1.7	50.2 ± 4.0
	62799A-4A31	1,1E+00	1,1E+02			220 - 530	8	354.6	61.9	67.8 ± 4.4	6.2	6.8	0.56	0.82	7.0	0.065	-5.4	1.086	1.052	1.033	358.1	62.7	65.8 ± 4.3	6.2	2.5	61.7 ± 4.1
	62799A-9A22	1,9E+00	3,3E+02			100 - 370	6	305.6	74.9	90.5 ± 5.8	5.0	4.6	0.57	0.77	7.7	0.064	2.8	1.124	1.006	1.117	313.7	72.5	88.4 ± 5.1	6.9	3.0	82.3 ± 4.8
	62799A-11A11	9,8E-01	1,2E+02			Rejected	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	62799A-12A21	9,4E-01	8,4E+01			100 - 480	7	358.0	68.3	79.9 ± 2.0	2.1	1.4	0.85	0.78	27.0	0.025	5.4	1.035	1.023	1.012	356.8	68.4	80.0 ± 1.9	7.4	4.5	74.1 ± 1.8
	62799A-13A32	1,1E+00	1,0E+02			160 - 530	9	349.5	69.1	65.6 ± 2.2	2.3	1.1	0.94	0.85	24.0	0.034	4.9	1.062	1.007	1.054	346.7	68.0	63.8 ± 2.1	7.2	1.7	59.2 ± 2.0
	62799A-14A21	4,1E-01	5,0E+01			100 - 530	9	353.8	70.0	64.8 ± 4.2	2.6	0.7	0.82	0.84	10.8	0.064	6.0	1.042	1.020	1.022	352.3	70.5	64.5 ± 4.1	5.8	3.5	60.8 ± 3.9
	62799A-15A12	1,9E-01	3,0E+01			Rejected	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	62799A-16A32	1,6E-01	1,4E+01	5.6	138.8	100 - 530	10	356.4	68.2	62.8 ± 4.5	6.0	4.8	0.37	0.86	4.6	0.071	1.1	1.062	1.037	1.024	357.3	69.1	60.0 ± 4.3	18.6	6.8	48.8 ± 3.5
	62799A-17A21	1,1E+00	1,4E+02			170 - 550	8	349.1	66.5	47.5 ± 1.1	3.3	1.7	0.73	0.81	17.2	0.022	-10.3	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Appendix A: Archaeointensity results of kilns and hearths (continued)

																	Anisotropy							Cooling rate correction		
	Sample	NRM (A/m)	χ (10^{-5} SI)	Jrs (A/m)	Hcr (mT)	T1 - T2 (°C)	n	D (°)	I (°)	F ± std (µT)	Mad (°)	Dang (°)	f	g	q	ß	Derive (%)	K_1/K_3	K_1/K_2	K_2/K_3	D_a(°)	I_a (°)	F_a ± std (µT)	%corr	%evol	F_{a+c} ± std (µT)
34003A	**Agde / Saint Michel / FR2**																									
	34003A-1P1	1,7E+00	3,3E+02			100 - 570	12	5.1	65.3	66.5 ± 0.7	1.7	0.3	0.85	0.87	68.0	0.011	3.7	1.066	1.007	1.058	3.9	64.6	70.0 ± 0.8	3.6	-3.9	-
	34003A-2P2	7,9E+00	8,2E+02			100 - 520	10	358.4	66.5	67.4 ± 1.4	1.9	0.7	0.89	0.86	37.9	0.020	1.4	1.046	1.014	1.030	359.9	67.2	66.8 ± 1.3	0.3	-1.1	-
	34003A-3P2	5,1E+00	4,5E+02			100 - 480	9	358.4	65.0	60.5 ± 0.9	1.3	0.4	0.90	0.82	48.8	0.015	0.5	1.085	1.049	1.049	0.0	66.8	60.3 ± 0.9	-1.8	-0.9	61.4 ± 1.0
	34003A-4P2	3,0E+00	3,7E+02			100 - 530	10	0.2	66.6	62.8 ± 0.7	1.2	0.4	0.81	0.87	62.6	0.011	2.0	1.036	1.016	1.019	359.4	67.0	64.4 ±0.7	-0.3	-3.4	-
	34003A-5P1	2,1E+00	2,2E+02			100 - 570	12	2.3	65.8	48.0 ± 0.8	1.9	0.4	0.88	0.89	45.9	0.017	2.0	1.052	1.019	1.032	1.4	66.8	49.2 ± 0.8	-5.0	3.4	51.7 ± 0.8
	34003A-8P2	1,1E+01	1,1E+03			100 - 530	11	4.7	66.3	63.3 ± 0.9	1.7	0.7	0.91	0.88	56.6	0.014	2.7	1.052	1.038	1.038	4.3	65.8	62.5 ± 0.9	0.9	-2.5	-
	34003A-10P1	7,0E+00	8,3E+02	32.6	20.5	100 - 530	11	13.4	63.4	60.7 ± 1.6	2.4	1.7	0.81	0.89	27.8	0.026	1.6	1.048	1.027	1.027	10.5	63.6	60.6 ± 1.6	1.9	-4.0	-
	34003A-11P1	5,7E+00	7,5E+02			100 - 530	10	7.5	62.1	63.4 ± 1.0	2.7	1.3	0.81	0.84	42.3	0.016	2.5	1.052	1.018	1.030	8.0	62.7	63.2 ± 1.0	4.1	-4.2	-
	34003A-12P	2,8E-01	7,3E+01			100 - 555	11	9.3	62.9	59.0 ± 0.9	2.8	0.4	0.84	0.87	48.8	0.015	0.6	1.064	1.034	1.028	8.8	64.3	60.2 ± 0.9	7.5	-4.5	55.7 ± 0.8
	34003A-13P2	8,7E+00	1,1E+03			100 - 530	10	9.9	65.9	61.8 ± 0.9	1.3	0.6	0.89	0.88	54.1	0.015	0.4	1.086	1.025	1.057	12.4	66.2	61.5 ± 0.9	0.1	-2.2	-
	34003A-14P2	3,5E+00	2,1E+02			100 - 570	12	5.6	66.0	67.6 ± 1.2	3.0	0.5	0.80	0.85	40.2	0.017	6.5	1.081	1.021	1.058	1.2	65.1	66.8 ± 1.1	-1.0	-5.1	-
	34003A-15P2	9,7E+00	1,1E+03			100 - 500	10	2.6	66.4	62.3 ± 1.1	1.9	1.1	0.82	0.87	38.8	0.018	1.1	1.048	1.018	1.039	2.6	65.6	64.6 ± 1.2	1.9	-1.1	63.4 ± 1.2
	34003A-16P2	6,4E+00	8,1E+02			100 - 530	10	6.9	65.5	62.0 ± 0.6	1.4	1.2	0.83	0.85	71.3	0.010	1.8	1.090	1.017	1.048	3.6	65.9	63.9 ± 0.6	2.0	-3.0	-
	34003A-17P2	1,1E+01	9,6E+02			100 - 530	11	4.7	65.9	60.5 ± 0.6	1.8	0.3	0.94	0.88	87.8	0.009	3.8	1.060	1.009	1.023	3.4	66.9	63.2 ± 0.6	-2.4	-5.3	-
	34003A-18P1	9,2E+00	8,7E+02			100 - 530	11	13.7	70.7	62.3 ± 0.6	1.5	0.4	0.89	0.89	87.7	0.009	1.2	1.070	1.010	1.047	17.8	71.2	63.2 ± 0.6	1.3	-1.2	-
	34003A-20P2	5,8E+00	6,8E+02	45.6	19.7	100 - 530	10	359.6	68.6	65.3 ± 1.4	3.0	1.4	0.83	0.85	32.1	0.022	0.9	1.061	1.023	1.012	358.4	69.8	66.6 ± 1.4	5.3	-3.2	63.5 ± 1.4
	34003A-21P1	3,1E-01	1,1E+02			100 - 470	8	4.5	71.1	61.6 ± 1.4	2.2	0.2	0.66	0.84	23.7	0.023	-2.1	1.033	1.016	1.010	2.7	71.3	60.8 ± 1.4	3.5	-4.0	-
	34003A-22P3	9,7E+00	9,1E+02	82.9	19.9	100 - 530	11	356.9	65.0	61.6 ± 0.8	1.6	0.6	0.87	0.88	62.2	0.012	1.3	1.042	1.011	1.022	357.1	65.8	62.7 ± 0.8	2.0	-3.7	-
47323A	**Villeneuve sur Lot / la Dardenne-Haut / FR3186**																									
	All specimens were rejected due to mineralogical evolution during heating																									
11045A	**Bouriège / devant la ville / FR1**																									
	11045A-1A11	1,5E+01	1,4E+03			Rejected	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	11045A-2A11	7,3E+00	1,5E+03	162.8	44.7	Rejected	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	11045A-7A22	8,4E+00	1,1E+03	397.8	40.2	Rejected	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	11045A-8A12	5,8E+00	7,4E+02			Rejected	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	11045A-9A12	7,8E+00	1,2E+03			Rejected	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	11045A-11A31	7,7E+00	1,4E+03			Rejected	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	11045A-12B12	1,7E+01	2,6E+03			Rejected	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	11045A-15A21	4,9E+00	8,9E+02	32.0	34.3	100 - 565	11	28.9	64.6	56.6 ± 1.5	2.1	1.3	0.95	0.87	31.5	0.026	1.2	1.082	1.043	1.038	27.1	65.1	57.2 ± 1.4	11.0	-0.4	50.9 ± 1.3
11045B	**Bouriège / devant la ville / FR6**																									
	All specimens were rejected due to mineralogical evolution during heating																									
11045C	**Bouriège / devant la ville / FR7**																									
	11045C-1A13	9,1E+00	1,6E+03			Rejected	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	11045C-2C11	8,2E+00	1,6E+03			Rejected	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	11045C-6B11	1,7E+01	2,8E+03			170 - 565	10	354.7	65.1	46.0 ± 1.6	2.4	0.5	0.94	0.87	23.5	0.035	2.2	1.078	1.025	1.053	354.3	64.6	44.0 ± 1.5	4.2	1.0	42.2 ± 1.4
	11045C-7A11	1,7E+01	2,6E+03	495.0	42.9	100 - 565	11	351.4	63.3	44.9 ± 1.7	3.3	1.4	0.89	0.86	20.5	0.038	8.6	1.094	1.037	1.054	351.0	62.7	41.6 ± 1.6	0.4	3.1	41.6 ± 1.6
	11045C-9A11	1,2E+01	2,1E+03			170 - 565	10	355.6	60.6	34.2 ± 1.0	3.6	2.2	0.91	0.84	25.7	0.030	3.4	1.068	1.026	1.040	357.4	61.2	35.0 ± 1.1	6.4	0.6	32.7 ± 1.0
	11045C-11A12	1,2E+01	1,2E+03	352.1	42.1	170 - 575	11	2.7	68.9	43.7 ± 0.6	2.9	0.6	0.93	0.82	53.9	0.014	5.2	1.066	1.050	1.015	2.7	69.8	44.2 ± 0.7	7.0	-0.6	41.1 ± 0.6
	11045C-12A22	1,6E+01	1,6E+03			100 - 565	11	16.5	73.5	57.6 ± 2.5	3.2	1.1	0.86	0.81	16.1	0.044	11.8	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	11045C-13A11	4,4E+00	9,6E+02	180.2	38.6	Rejected	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	11045C-14A21	1,1E+01	2,1E+03			Rejected	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Appendix A: Archaeointensity results of kilns and hearths (continued)

	Sample	NRM (A/m)	χ (10^{-5} SI)	Jrs (A/m)	Hcr (mT)	T1 - T2 (°C)	n	D (°)	I (°)	F ± std (µT)	Mad (°)	Dang (°)	f	g	q	ß	Anisotropy: Derive (%)	K_1/K_3	K_1/K_2	K_2/K_3	D_a(°)	I_a (°)	F_a ± std (µT)	Cooling rate correction: %corr	%evol	F_{a+c} ± std (µT)
67282A	**Marlenheim / Maison Apprederis / FR70**																									
	67282A-1A12	4,3E+00	5,8E+02			100 - 570	13	354.2	68.4	69.1 ± 1.7	2.5	1.0	0.88	0.88	31.0	0.025	1.0	1.051	1.043	1.007	355.4	67.2	69.4 ± 1.7	11.5	0.1	61.4 ± 1.5
	67282A-2A12	4,5E+00	8,8E+02			100 - 550	12	357.4	68.0	68.8 ± 1.4	2.1	0.4	0.87	0.89	37.5	0.020	1.1	1.056	1.030	1.025	358.8	67.1	70.5 ± 1.4	7.8	1.2	65.0 ± 1.3
	67282A-3A12	5,7E+00	9,1E+02	16.3	22.1	100 - 570	13	352.7	69.0	61.2 ± 1.2	2.4	1.0	0.82	0.90	36.2	0.020	0.4	1.053	1.026	1.026	353.4	68.6	63.5 ± 1.3	7.4	0.1	58.8 ± 1.2
	67282A-4A12	6,6E+00	1,2E+03			100 - 550	12	356.1	68.0	66.4 ± 1.6	2.1	0.2	0.81	0.89	29.8	0.024	-0.5	1.053	1.017	1.035	356.5	67.6	69.3 ± 1.7	4.4	-0.1	66.3 ± 1.6
	67282A-9A12	3,5E+00	6,0E+02			100 - 530	11	357.4	70.2	71.6 ± 3.1	3.0	1.2	0.74	0.88	14.8	0.044	4.6	1.042	1.032	1.009	0.6	70.5	71.0 ± 3.1	10.3	2.2	63.7 ± 2.8
	67282A-11A13	4,4E+00	1,0E+03			100 - 550	12	349.8	67.5	68.6 ± 1.9	2.5	0.4	0.82	0.90	26.2	0.028	0.3	1.061	1.026	1.035	349.8	66.8	71.4 ± 2.0	4.2	-0.1	68.4 ± 1.9
	67283A-15A12	3,5E+00	5,8E+02	18.9	23.7	Rejected	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	67282A-18A21	3,2E+00	8,6E+02	19.0	22.1	100 - 500	10	358.1	68.3	66.8 ± 2.5	2.3	1.1	0.72	0.87	17.0	0.037	2.4	1.093	1.077	1.016	358.4	68.1	70.9 ± 2.7	5.2	0.7	67.2 ± 2.5
	67282A-23A13	4,1E+00	8,1E+02			150 - 550	10	1.4	71.7	59.8 ± 1.3	2.4	0.6	0.82	0.87	32.2	0.022	1.6	1.064	1.022	1.041	2.1	70.7	61.9 ± 1.3	4.5	0.8	59.1 ± 1.2
26362A	**Valence / Angle rue d'Arménie-rue Bouffier / FR40**																									
	26362A-1P1	5,6E-01	2,3E+02			100 - 380	6	342.8	69.3	62.6 ± 2.7	5.3	5.2	0.53	0.79	9.8	0.043	-0.1	1.052	1.035	1.016	346.7	68.9	62.1 ± 2.8	4.5	-0.3	59.3 ± 2.7
	26362A-2P3	7,0E-01	2,1E+02	11.0	20.0	100 - 380	6	345.0	68.3	66.1 ± 3.9	3.0	3.2	0.47	0.79	6.3	0.059	-0.8	1.061	1.045	1.015	345.7	67.6	66.0 ± 3.9	4.5	-1.4	63.0 ± 3.8
	26362A-4P1	4,6E-01	2,0E+02			100 - 350	5	347.8	66.2	65.1 ± 1.3	4.1	3.9	0.68	0.74	26.0	0.019	0.1	1.063	1.040	1.021	346.0	66.9	63.2 ± 1.2	4.3	-1.1	60.5 ± 1.1
	26362A-7P1	3,9E-01	1,6E+02			100 - 380	6	344.1	66.2	54.5 ± 1.5	4.4	2.1	0.54	0.79	15.7	0.028	0.6	1.031	1.014	1.017	343.3	66.1	54.2 ± 1.5	5.3	-0.7	51.3 ± 1.4
	26362A-8P2	5,4E-01	2,3E+02	16.3	20.2	100 - 380	6	349.2	67.0	67.6 ± 1.9	3.6	3.5	0.58	0.79	16.1	0.029	1.1	1.059	1.033	1.025	353.0	66.4	66.9 ± 2.0	3.6	0.3	64.5 ± 1.9
	26362A-9P3	6,2E-01	2,1E+02			100 - 380	6	348.9	65.3	64.3 ± 2.0	3.7	2.2	0.50	0.79	12.6	0.032	-0.2	1.039	1.013	1.026	349.9	65.8	63.1 ± 2.0	3.7	-0.2	60.8 ± 1.9
	26362A-12P1	7,3E-01	2,1E+02			100 - 380	6	353.9	66.4	64.8 ± 3.0	3.2	4.7	0.45	0.79	7.8	0.046	-1.3	1.031	1.015	1.016	355.7	66.0	64.9 ± 2.9	4.2	-2.0	62.2 ± 2.8
	26362A-13P3	8,4E-01	2,3E+02			100 - 520	10	4.4	71.6	66.8 ± 1.4	2.3	1.2	0.84	0.87	34.0	0.022	-2.3	1.046	1.017	1.028	7.5	71.8	67.0 ± 1.5	4.0	-1.2	64.3 ± 1.4
	26362A-17P1	6,7E-01	2,4E+02	15.4	21.2	100 - 380	6	353.3	62.6	71.5 ± 0.9	2.6	1.5	0.56	0.79	35.3	0.013	-0.6	1.065	1.056	1.008	350.5	63.7	69.8 ± 1.0	4.3	-0.9	66.8 ± 0.9
	26362A-20P2	7,8E-01	2,6E+02			100 - 380	6	353.1	64.2	66.9 ± 2.5	3.7	3.5	0.47	0.79	9.9	0.037	-0.8	1.065	1.012	1.053	353.4	65.3	65.0 ± 2.4	4.5	-0.6	62.1 ± 2.3
18057A	**Chateaumeillant / le Paradis, zone B / FR172**																									
	18057A-5P31	3,4E-01	3,4E+02			Rejected	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	18057A-20P12	5,8E-01	2,8E+02			Rejected	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	18057A-23P13	7,8E+00	1,2E+03			Rejected	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	18057A-25P11	3,0E+00	9,3E+02			100 - 520	10	359.1	63.3	65.2 ± 2.0	3.2	1.8	0.90	0.87	25.5	0.031	-1.1	1.047	1.043	1.004	0.7	64.1	63.0 ± 1.9	6.3	-0.7	59.0 ± 1.8
	18057A-29P11	7,5E+00	1,1E+03			Rejected	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	18057A-30P22	8,9E-01	2,6E+02			Rejected	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Legend of Appendix A, Columns from left to right: Name of the specimen; Intensity of initial Natural Remanent Magnetization; Initial low-field susceptibility; Saturation remanent magnetization; Remanent coercivity field; Temperature interval used to determine intensity; number of data points within this temperature; Declination; Inclination; Archaeointensity with associated standard deviation; Maximum Angular Deviation; Deviation Angle; NRM fraction; gap factor; quality factor (Coe et al., 1978); Ratio of the standard error of the slope to the absolute value of the slope; Alteration factor during the anisotropy correction; Degree of TRM anisotropy; Degree of lineation; Degree of foliation; Declination and Inclination corrected for anisotropy; Archaeointensity corrected for anisotropy with associated standard deviation; Correction factor of cooling rate per sample; Alteration factor during the cooling rate correction; Archaeointensity corrected for anisotropy and cooling rate with associated standard deviation.

Accepted specimens are highlighted in grey.

Appendix B: Archaeointensity results of Mouliets-et-Villemartin 33296A and Villeneuve-sur-Lot 47323B hearths

Same columns as Appendix A, excepted I/II, indicating the number (one I or two II) of components of magnetization carried by the pottery sherds.

																	Anisotropy					Cooling rate correction		
	Sample	NRM (A/m)	χ (SI)	Jrs (A/m)	Hcr (mT)	T1 - T2 (°C)	I/II	n	F ± std (μT)	Mad (°)	Dang (°)	f	g	q	ß	Derive (%)	K_1/K_3	K_1/K_2	K_2/K_3	F_a ± std (μT)	%corr	%evol	F_{a+c} ± std (μT)
33296A	**Mouliets-et-Villemartin / Lacoste**																							
Baked clay	33296A-A1A1	5.2E+00	1.5E-02	104.0	22.9	200 - 615	I	13	46.1 ± 0.5	2.5	0.9	0.88	0.88	68.5	0.011	-2.5	1.090	1.032	1.057	48.9 ± 0.6	1.0	-0.8	48.4 ± 0.6
	33296A-A2A1	3.9E+00	1.1E-02	89.7	21.8	200 - 590	I	12	44.6 ± 0.6	2.6	2.3	0.78	0.88	48.5	0.014	5.2	1.063	1.046	1.016	45.6 ± 0.6	2.7	-0.5	44.4 ± 0.6
	33296A-A3A1	3.9E+00	6.2E-03			200 - 590	I	12	49.8 ± 0.7	3.3	1.9	0.84	0.89	51.8	0.014	3.3	1.107	1.066	1.038	52.5 ± 0.8	6.5	-0.6	49.1 ± 0.7
	33296A-A4A1	4.4E+00	7.3E-03			100 - 590	I	13	52.7 ± 1.1	3.3	1.7	0.85	0.89	36.1	0.021	3.5	1.156	1.070	1.080	56.5 ± 1.2	2.0	-1.3	55.4 ± 1.2
	33296A-A5A1	7.9E+00	1.7E-02	150.4	21.9	100 - 615	I	14	51.3 ± 0.7	4.8	1.3	0.94	0.86	59.1	0.014	-9.0	1.167	1.092	1.069	54.3 ±0.8	-2.0	0.6	55.4 ± 0.8
	33296A-A6A1	6.7E+00	1.8E-02			100 - 615	I	14	49.7 ± 1.3	3.5	0.9	0.92	0.86	30.9	0.026	-2.9	1.104	1.050	1.051	52.7 ± 1.4	-0.4	1.7	52.9 ± 1.4

	Sample	NRM ($A.m^2/kg$)	χ (m^3/kg)	Jrs (A/m)	Hcr (mT)	T1 - T2 (°C)	I/II	n	F ± std (μT)	Mad (°)	Dang (°)	f	g	q	ß	Derive (%)	K_1/K_3	K_1/K_2	K_2/K_3	F_a ± std (μT)	%corr	%evol	F_{a+c} ± std (μT)
Pottery	33296A-T9A	2.8E-04	7.5E-07	3.8	46.5	100 430	II	8	85.4 ± 1.8	3.0	-	0.53	0.84	20.7	0.021	1.1	1.388	1.116	1.243	81.1 ± 1.9	12.2	0.7	71.2 ± 1.7
	33296A-T10A	3.9E-04	1.1E-06			100 470	II	9	77.0 ± 1.4	1.9	-	0.69	0.85	31.7	0.019	0.8	1.333	1.045	1.275	73.7 ± 1.4	9.9	1.6	66.4 ± 1.3
	33296A-T11A	2.4E-04	4.1E-07			100 470	II	9	85.2 ± 1.2	2.2	-	0.62	0.83	36.0	0.014	0.3	1.217	1.053	1.156	80.6 ± 1.2	14.4	0.1	69.0 ± 1.0
	33296A-T12A	2.5E-04	8.4E-07			100 470	II	9	74.0 ± 1.7	2.3	-	0.70	0.86	26.8	0.022	0.6	1.305	1.041	1.253	66.2 ± 1.6	9.6	1.3	59.8 ± 1.4
	33296A-T13A	5.8E-04	1.6E-06			100 430	II	8	73.5 ± 1.0	2.1	-	0.67	0.84	42.2	0.013	-0.4	1.301	1.084	1.201	70.8 ± 0.9	10.0	1.0	63.7 ± 0.8
	33296A-T14A	2.5E-04	6.7E-07			100 470	II	9	73.1 ± 3.1	1.5	-	0.64	0.86	13.0	0.042	1.5	1.338	1.071	1.249	68.5 ± 2.9	8.3	0.7	62.8 ± 2.7
	33296A-T15A	3.9E-04	6.0E-07			100 500	II	10	80.8 ± 1.2	2.0	-	0.85	0.86	49.2	0.015	-0.8	1.345	1.083	1.242	74.9 ± 1.0	12.2	1.1	65.8 ± 0.9
	33296A-T16A	1.5E-04	8.1E-07			100 390	II	7	70.8 ± 1.1	2.3	-	0.58	0.81	30.0	0.016	1.1	1.539	1.297	1.187	69.7 ± 1.1	12.0	1.0	61.3 ± 1.0
	33296A-T17A	5.9E-04	2.6E-07			100 570	I	13	98.8 ± 1.4	1.7	0.9	0.86	0.90	54.8	0.014	2.1	1.379	1.037	1.330	82.7 ± 1.2	12.0	-0.1	72.8 ± 1.1
47323B	**Villeneuve sur Lot / la Dardenne-Haut / FR3186**																							
Baked clay	Sample	NRM (A/m)	χ (SI)	Jrs (A/m)	Hcr (mT)	T1 - T2 (°C)	I/II	n	F ± std (μT)	Mad (°)	Dang (°)	f	g	q	ß	Derive (%)	K_1/K_3	K_1/K_2	K_2/K_3	F_a ± std (μT)	%corr	%evol	F_{a+c} ± std (μT)
	47323B-A1A1	4.0E+00	6.6E-03	24.6	19.4	100 - 530	I	10	52.7 ± 2.0	5.1	4.3	0.65	0.82	14.1	0.038	-2.0	1.204	1.049	1.147	56.6 ± 2.1	-1.7	-1.0	57.6 ± 2.1
	47323B-A2A1	1.5E+00	3.9E-03			100 - 555	I	11	64.8 ± 0.5	2.4	0.6	0.86	0.87	95.9	0.008	0.5	1.072	1.037	1.034	67.1 ± 0.5	6.2	-0.2	62.9 ± 0.5
	47323B-A3A1	2.8E-01	1.8E-03			100 - 420	II	7	47.5 ± 1.2	2.7	-	0.65	0.83	20.7	0.026	1.5	1.232	1.079	1.142	48.7 ± 1.3	11.4	1.9	43.2 ± 1.2
	47323B-A4A1	1.3E+00	4.3E-03			100 - 500	II	9	61.7 ± 1.7	3.4	-	0.73	0.84	23.3	0.027	4.9	1.331	1.286	1.035	62.2 ± 1.6	11.4	2.8	55.1 ± 1.4
	47323B-A5A2	3.8E-01	1.4E-03			100 - 520	I	8	46.6 ± 1.5	3.3	0.9	0.76	0.83	19.3	0.033	-0.1	1.082	1.049	1.032	49.3 ± 1.6	5.4	1.7	46.6 ± 1.5
	47323B-A6A2	4.0E+00	9.3E-03	49.0	19.0	100 - 575	I	12	56.2 ± 1.0	1.7	0.6	0.87	0.89	46.0	0.017	-1.7	1.040	1.035	1.005	55.4 ± 0.9	5.7	0.5	52.2 ± 0.8
	47323B-A7B1	1.5E+00	4.1E-03			100 - 520	I	8	67.7 ± 0.9	2.1	0.4	0.75	0.83	45.4	0.014	-0.3	1.059	1.003	1.056	71.1 ± 1.0	5.5	1.1	67.2 ± 0.9
	47323B-A8B1	9.7E-01	3.3E-03			170 - 480	II	6	59.0 ± 0.5	2.7	-	0.67	0.78	66.6	0.008	0.4	1.341	1.073	1.249	66.3 ± 0.5	9.2	2.8	60.2 ± 0.5
	47323B-A9A1	1.5E+00	4.7E-03			170 - 480	II	6	53.2 ± 0.4	2.2	-	0.64	0.78	68.6	0.007	-0.5	1.397	1.207	1.158	72.7 ± 0.5	9.9	3.2	65.5 ± 0.5
	47323B-A11A1	1.8E+00	4.4E-03			100 - 530	I	10	66.0 ± 0.6	3.2	1.6	0.80	0.84	72.7	0.009	3.4	1.077	1.027	1.048	64.5 ± 0.7	8.3	-0.4	59.1 ± 0.6
	47323B-A12A1	2.2E+00	6.5E-03			100 - 550	I	9	64.1 ± 1.7	1.9	1.5	0.91	0.85	30.4	0.026	-1.9	1.134	1.083	1.047	68.7 ± 2.0	6.9	3.4	64.0 ± 1.9

	Sample	NRM ($A.m^2/kg$)	χ (m^3/kg)	Jrs (A/m)	Hcr (mT)	T1 - T2 (°C)	I/II	n	F ± std (μT)	Mad (°)	Dang (°)	f	g	q	ß	Derive (%)	K_1/K_3	K_1/K_2	K_2/K_3	F_a ± std (μT)	%corr	%evol	F_{a+c} ± std (μT)
Pottery	47323B-T1B	3.3E-04	1.2E-06			100 - 460	II	8	71.2 ± 3.5	4.0	-	0.67	0.83	11.2	0.049	4.7	1.640	1.152	1.424	54.1 ± 2.4	11.6	1.2	47.8 ± 2.1
	47323B-T2B	4.6E-04	1.2E-06			100 - 460	II	8	91.2 ± 3.5	3.0	-	0.71	0.83	15.5	0.038	4.3	1.621	1.162	1.395	90.4 ± 3.4	12.4	2.3	79.2 ± 3.0
	47323B-T14B	1.1E-03	4.3E-06			100 - 420	II	7	73.9 ± 1.7	2.8	-	0.48	0.82	17.0	0.023	5.7	1.408	1.062	1.326	72.0 ± 1.7	14.9	2.7	61.2 ± 1.4
	47323B-T15B	8.9E-04	2.1E-06			100 - 460	II	8	77.8 ± 4.0	3.9	-	0.41	0.83	6.7	0.051	0.5	1.484	1.099	1.351	74.5 ± 4.1	8.1	2.7	68.5 ± 3.8
	47323B-T16B	8.4E-04	1.7E-06			100 - 460	II	8	75.6 ± 5.0	1.5	-	0.83	0.83	10.6	0.066	1.7	1.472	1.040	1.415	64.1 ± 4.4	10.7	2.2	57.2 ±3.9
	47323B-T17B	2.8E-03	8.9E-06			100 - 370	II	6	58.6 ± 7.9	4.9	-	0.24	0.79	1.4	0.135	-12.8	-	-	-	-	-	-	-
	47323B-T18B	8.3E-04	2.8E-06			100 - 420	II	7	67.5 ± 2.6	4.7	-	0.45	0.79	9.1	0.039	2.2	1.544	1.013	1.524	56.6 ± 2.6	8.1	1.9	52.0 ± 2.4
	47323B-T19B	6.7E-05	4.8E-07			100 - 420	II	7	80.3 ± 1.4	1.8	-	0.77	0.82	34.5	0.018	0.4	1.432	1.140	1.256	76.9 ± 1.5	13.9	1.7	66.2 ± 1.3
	47323B-T20B	2.7E-04	1.2E-06			100 - 460	II	8	68.4 ± 1.6	0.9	-	0.74	0.83	25.9	0.024	5.3	1.674	1.151	1.454	62.7 ± 1.5	11.5	2.0	55.5 ± 1.3
	47323B-T21B	2.1E-04	7.2E-07	3.7	24.1	100 - 420	II	7	87.4 ± 1.3	1.7	-	0.63	0.82	34.1	0.015	4.5	1.730	1.039	1.666	70.6 ± 1.3	17.8	1.7	58.0 ± 1.1
	47323B-T22B	2.6E-04	1.1E-06			100 - 530	I	10	74.6 ± 2.6	2.2	1.0	0.90	0.88	22.5	0.035	2.1	1.425	1.096	1.301	66.3 ± 2.5	12.7	1.4	57.9 ± 2.2
	47323B-T23B	1.4E-03	2.4E-06			100 - 500	II	9	80.7 ± 2.3	1.2	-	0.86	0.83	25.3	0.028	0.4	1.315	1.050	1.252	81.0 ± 2.3	8.8	0.6	73.9 ± 2.1
	47323B-T24B	5.2E-04	1.3E-06	11.8	18.8	100 - 420	II	7	73.9 ± 2.1	3.3	-	0.47	0.80	13.4	0.028	0.6	1.675	1.079	1.552	63.5 ± 1.1	6.3	0.5	59.5 ± 1.0

Appendix C: Archaeointensity results of Lattes pottery sherds (34129B-C-D-E-F-G)

Same columns as Appendix A.

* heated in vacuum

	Sample	NRM ($A.m^2/kg$)	χ (m^3/kg)	Jrs (A/m)	Hcr (mT)	T1 - T2 (°C)	n	F ± std (μT)	Mad (°)	Dang (°)	f	g	q	ß	Anisotropy: Derive (%)	K_1/K_3	K_1/K_2	K_2/K_3	F_a ± std (μT)	Cooling rate correction: %corr	%evol	F_{a+c} ± std (μT)
34129B	**Lattes / Saint Sauveur / u.s. 27576**																					
	1D	2.3E-04	1.2E-06			Rejected	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2D	1.3E-04	2.3E-07			100 - 340	4	52.5 ± 4.1	3.6	23.1	0.22	0.66	1.8	0.079	5.9	1.189	1.031	1.154	48.5 ± 3.7	-	-	-
	6D	2.0E-03	2.7E-06			270 - 610	11	69.7 ± 1.0	2.9	1.1	0.82	0.87	49.7	0.014	-6.0	1.255	1.079	1.163	57.2 ± 0.8	-	-	-
	8D	9.4E-04	3.2E-06			100 - 580	12	71.0 ± 5.7	3.2	5.7	0.93	0.89	10.4	0.080	-3.5	1.194	1.073	1.114	65.6 ± 5.3	-	-	-
	11C	1.9E-04	8.8E-07			100 - 495	8	39.6 ± 3.6	6.8	5.5	0.80	0.85	7.4	0.091	0.2	1.120	1.043	1.074	37.3 ± 3.3	-	-	-
34129C	**Lattes / Saint Sauveur / u.s. 27345**																					
	1C	2.5E-03	4.0E-06			100 - 380	5	87.4 ± 3.1	4.9	9.7	0.44	0.74	9.1	0.035	2.9	1.245	1.049	1.187	76.5 ± 2.7	-	-	-
	6C	5.7E-04	1.5E-06			180 - 380	4	95.0 ± 7.7	3.1	5.2	0.39	0.63	3.0	0.082	6.4	1.215	1.038	1.170	82.8 ± 6.4	-	-	-
	10C	9.1E-04	2.8E-06			180 - 380	4	55.8 ± 2.4	3.8	15.1	0.39	0.63	5.7	0.043	3.7	1.220	1.068	1.142	47.9 ± 2.1	-	-	-
	12B	3.3E-03	4.4E-06			100 - 430	6	86.1 ± 10.7	4.3	3.9	0.59	0.79	3.7	0.124	3.7	1.230	1.042	1.181	74.1 ± 9.2	-	-	-
34129D	**Lattes / Saint Sauveur / u.s. 27346**																					
	2A	6.2E-05	2.4E-07			180 - 430	5	64.0 ± 2.7	2.5	6.8	0.50	0.74	8.6	0.043	2.9	1.090	1.020	1.069	60.9 ± 2.7	-	-	-
	4A	2.0E-04	1.2E-06			Rejected	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	5A	9.2E-05	3.1E-07			Rejected	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	6A	2.6E-03	3.9E-06			100 - 430	6	75.1 ± 7.7	7.7	6.3	0.34	0.75	2.5	0.103	-8.2	1.243	1.083	1.147	65.2 ± 6.6	-	-	-
	8A	6.6E-04	3.3E-06			Rejected	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	9A	1.2E-03	2.3E-06			270 - 495	6	58.5 ± 2.4	2.1	2.6	0.65	0.72	11.5	0.040	-7.6	1.235	1.049	1.178	51.4 ± 2.1	-	-	-
	11A	3.7E-04	1.8E-06			100 - 495	8	58.2 ± 1.2	2.6	1.9	0.73	0.85	30.5	0.020	0.0	1.252	1.052	1.190	52.1 ± 0.9	-	-	-
	12A	8.2E-04	2.8E-06			180 - 520	8	48.8 ± 1.4	3.8	0.4	0.68	0.85	20.6	0.028	-1.6	1.180	1.035	1.141	44.3 ± 1.3	-	-	-
34129E	**Lattes / Saint Sauveur / u.s. 4796**																					
	1A*	4.2E-04	8.5E-08			100 - 400	6	76.4 ± 1.9	2.3	6.9	0.43	0.80	13.8	0.025	-20.0	-	-	-	-	-	-	-
	1D	8.2E-04	1.5E-06			100 - 530	10	44.7 ± 5.1	3.0	4.1	0.92	0.88	7.0	0.115	-1.8	1.043	1.026	1.017	44.9 ± 5.2	-	-	-
	7A*	2.6E-03	3.7E-07			160 - 400	5	97.5 ± 2.0	0.7	4.7	0.53	0.73	18.6	0.021	-21.9	-	-	-	-	-	-	-
	7C	1.6E-03	3.3E-06			100 - 350	5	104.7 ± 8.6	3.7	15.2	0.52	0.74	4.7	0.082	3.7	1.194	1.091	1.095	105.0 ± 8.6	-	-	-
	9A	2.1E-04	2.9E-08			220 - 540	8	54.4 ± 1.7	2.7	5.0	0.85	0.83	21.8	0.032	-11.8	-	-	-	-	-	-	-
	10A*	6.7E-04	9.5E-08			100 - 510	9	123.4 ± 6.9	3.1	0.6	0.84	0.85	12.9	0.056	-18.0	-	-	-	-	-	-	-
	10C	5.1E-04	7.0E-07			240 - 530	8	61.0 ± 0.6	3.2	4.5	0.75	0.80	58.3	0.010	-6.3	1.082	1.013	1.068	58.5 ± 0.6	-	-	-
34129F	**Lattes / Saint Sauveur / u.s. 2956**																					
	1B	8.4E-04	1.8E-06			Rejected	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2B	1.7E-03	3.9E-06			100 - 340	4	71.8 ± 4.8	5.4	4.5	0.45	0.66	4.4	0.067	4.0	1.311	1.071	1.224	59.9 ± 4.5	-	-	-
	5B	2.9E-03	5.1E-06			Rejected	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	7B	5.1E-03	7.4E-06			Rejected	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	8B	3.1E-03	5.5E-06			Rejected	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	9B	4.1E-03	9.5E-06			180 - 380	4	67.5 ± 5.2	3.4	11.1	0.33	0.65	2.8	0.078	-5.5	1.242	1.031	1.205	58.7 ± 4.6	-	-	-
	10B	2.4E-03	4.4E-06			100 - 340	4	87.9 ± 4.1	1.8	14.9	0.35	0.66	4.9	0.047	-2.3	1.233	1.070	1.153	81.7 ± 3.6	-	-	-
	11B	2.5E-03	6.1E-06			Rejected	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
34129G	**Lattes / Saint Sauveur / u.s. 30118**																					
	1A*	2.1E-03	4.5E-07			Rejected	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	1C	2.1E-03	5.5E-06			100 - 350	5	76.1 ± 4.3	8.4	19.6	0.32	0.75	4.3	0.056	1.8	1.242	1.094	1.135	64.1 ± 3.2	-	-	-
	2A*	7.1E-04	6.0E-08			Rejected	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2C	9.5E-04	4.4E-07			100 - 580	13	60.4 ± 1.3	2.7	1.4	0.91	0.85	36.0	0.021	-10.8	-	-	-	-	-	-	-
	3A*	3.6E-03	8.5E-07			Rejected	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	3B	2.8E-03	8.8E-06			Rejected	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	5A	8.1E-04	1.4E-07			100 - 340	5	67.0 ± 1.6	5.2	7.4	0.38	0.72	11.9	0.023	-3.5	1.389	1.034	1.343	65.1 ± 1.7	-	-	-
	6A	1.1E-03	1.8E-07			100 - 340	5	103.1 ± 12.3	3.6	8.9	0.50	0.75	3.1	0.119	-2.7	1.236	1.076	1.149	96.6 ± 11.8	-	-	-
	7A*	7.5E-04	1.6E-07			100 - 340	5	52.5 ± 3.6	5.4	5.0	0.30	0.70	3.1	0.068	-7.4	1.241	1.054	1.178	53.3 ± 3.4	-	-	-
	8A*	1.5E-03	3.9E-07			100 - 480	8	69.6 ± 3.3	9.1	11.4	0.53	0.82	9.0	0.0481	-15.4	-	-	-	-	-	-	-
	8B	1.5E-03	3.6E-06			100 - 555	11	21.3 ± 1.0	7.9	1.0	0.80	0.86	15.2	0.046	-	-	-	-	-	-	-	-
	12A*	3.5E-04	1.3E-07			100 - 340	5	70.2 ± 4.4	7.8	4.7	0.31	0.73	3.5	0.063	-4.6	1.286	1.105	1.165	58.4 ± 2.9	-	-	-

Appendix D: Archaeointensity curve in Western Europe at Paris

t (years AD)	F (μT)	σF (μT)
-800	88.0	5.4
-750	86.5	6.4
-700	85.6	3.9
-650	83.9	3.9
-600	83.1	3.4
-550	78.2	3.3
-500	75.9	2.7
-450	75.2	2.2
-400	73.6	2.6
-350	71.3	2.6
-300	67.0	3.6
-250	64.3	3.1
-200	63.2	2.9
-150	63.1	2.4
-100	65.0	2.2
-50	65.7	1.7
0	66.7	1.2
50	67.1	0.7
100	67.1	0.7
150	67.8	0.9

Mean age of the 160-years window; Mean intensity; Standard deviation

Chapitre 10

La datation archéomagnétique au premier millénaire av. J.-C. en Europe occidentale : avancées et perspectives

L'acquisition de 39 nouvelles archéodirections et 18 nouvelles archéointensités en France permet d'améliorer substantiellement les courbes de variation séculaire en Europe Occidentale au premier millénaire av. J.-C.. En utilisant l'ensemble des données disponibles dans un rayon maximal de 1000km autour de Paris, la courbe de la direction en France a été affinée à l'âge du Fer et étendue à l'âge du Bronze Final, jusqu'en 1500 av. J.-C. (Cf. chapitre 8). Sur 1500 ans, l'inclinaison varie assez peu et de manière non monotone entre 65 et 75°. Les variations de la déclinaison sont très fortes avec un maximum d'environ 30° vers 800 av. J.-C. et un minimum de -10 à -5° vers 250 av. J.-C.. Pour l'intensité, une extension de la courbe de Gomez-Paccard *et al.* (2008) sur l'ensemble du premier millénaire av. J.-C. est proposée (Cf. chapitre 9). L'archéointensité présente également une forte variation de 90 µT vers 800 av. J.-C. à 60µT vers 250 av. J.-C.. Nos résultats mettent ainsi en évidence une simultanéité des changements majeurs de la direction et de l'intensité. Ces changements en 800 et 250 av. J.-C. semblent correspondre à une localisation du Pôle Géomagnétique Virtuel à des latitudes plus faibles et à un champ non-dipolaire plus fort qu'aux autres périodes. Ces caractéristiques particulières pourraient s'expliquer par un dipôle excentré, comme l'ont suggéré Gallet *et al.* (2009b). Mais cette hypothèse ne peut être encore validée en raison du manque de données de qualité satisfaisante dans les autres aires géographiques. Nos nouvelles données ouest-européennes permettront d'améliorer les

futurs modèles géomagnétiques globaux, qui répondront peut-être mieux à ces interrogations.

Ce dernier chapitre de la thèse s'attache aux applications archéologiques de nos nouvelles courbes de référence et, par quelques tests, montre les avancées pour la datation archéomagnétique. Les courbes utilisées à cet effet sont les courbes bayésiennes univariées de l'inclinaison, de la déclinaison et de l'intensité (Cf. pages 169-170).

1. Présentation des courbes bayésiennes

1.1 Courbes univariées de l'inclinaison et de la déclinaison

Les courbes bayésiennes univariées de l'inclinaison et de la déclinaison ont été calculées à partir des données d'Europe occidentale (Cf. Chapitre 8). Les courbes prennent en compte les densités de probabilité *a priori* des datations de chaque structure, qui sont uniformes pour les structures datées par le mobilier et par dendrochronologie ou correspondent à la densité de date après calibration pour les structures datées par radiocarbone. Il a été également tenu compte des relations stratigraphiques éventuelles entre structures (en l'occurrence entre les fourneaux de Gouy-Saint-André 6282A-B-C-D-E, entre les deux états du fourneau 2 de Sorrus-la-Bruyère 62799B1-B2 et entre les deux foyers superposés de la Côme-Chaudron au Mont-Beuvray 58128E-F).

Ces courbes bayésiennes univariées sont cohérentes avec les courbes marginales de l'inclinaison et de la déclinaison déduites de la courbe bivariée par moyenne mobile (Le Goff, 1990 ; Le Goff *et al.*, 1992) (Figure 3.1). Cette très bonne cohérence entre les deux courbes moyennes (Figure 3.1) laisse penser que les marginales de l'inclinaison et de la déclinaison de la courbe bayésienne bivariée ne diffèreront pas significativement des deux courbes univariées. La principale différence entre les courbes moyennes est le minimum de la déclinaison vers 300-250 av. J.-C., qui est plus prononcé pour les courbes bayésiennes. Plusieurs raisons expliquent que l'enveloppe d'erreur à 95% de confiance des courbes bayésiennes est significativement plus large que celle des courbes par moyenne mobile. Premièrement, l'erreur des courbes bayésiennes est calculée avec le

nombre de structures, alors que l'erreur sur les courbes par moyenne mobile est calculée en divisant la déviation standard par le nombre total d'échantillons étudiés sur l'ensemble des structures sélectionnées dans la fenêtre. Deuxièmement, les courbes bayésiennes tiennent compte d'une erreur possible sur la datation des structures (par le « fait », Cf. Chapitre 7), ce qui ajoute un degré de liberté supplémentaire.

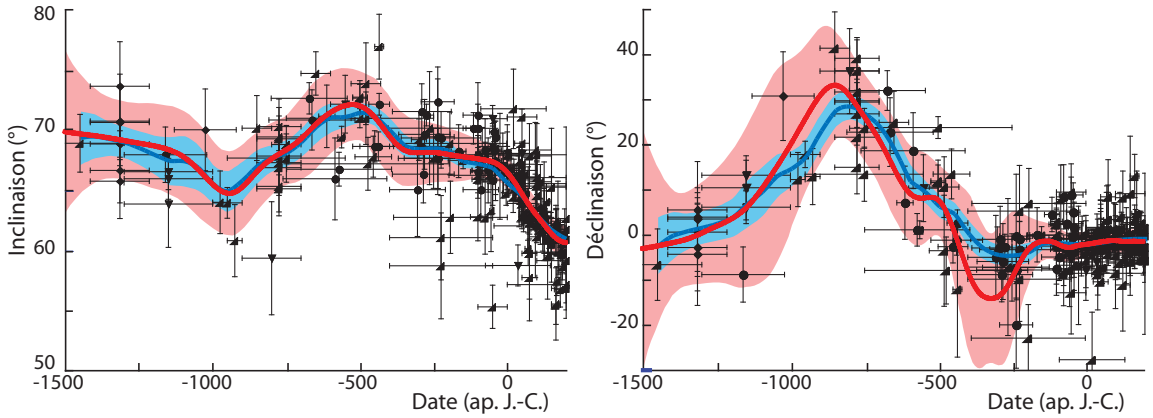


Figure 3.1 : Nouvelles courbes de référence de l'inclinaison et de la déclinaison en Europe occidentale, comparaison des courbes bayésiennes univariées de l'inclinaison et de la déclinaison (en rouge) et des courbes marginales de la courbe bivariée par moyenne mobile (en bleu). Les courbes moyennes sont indiquées avec leur enveloppe d'erreur à 95% de confiance. La courbe bivariée par moyenne mobile est construite avec une largeur de fenêtre de 160 ans et un pas de 50 ans. Les courbes sont construites à partir du jeu de données d'Europe occidentale sélectionnées dans le chapitre 8.

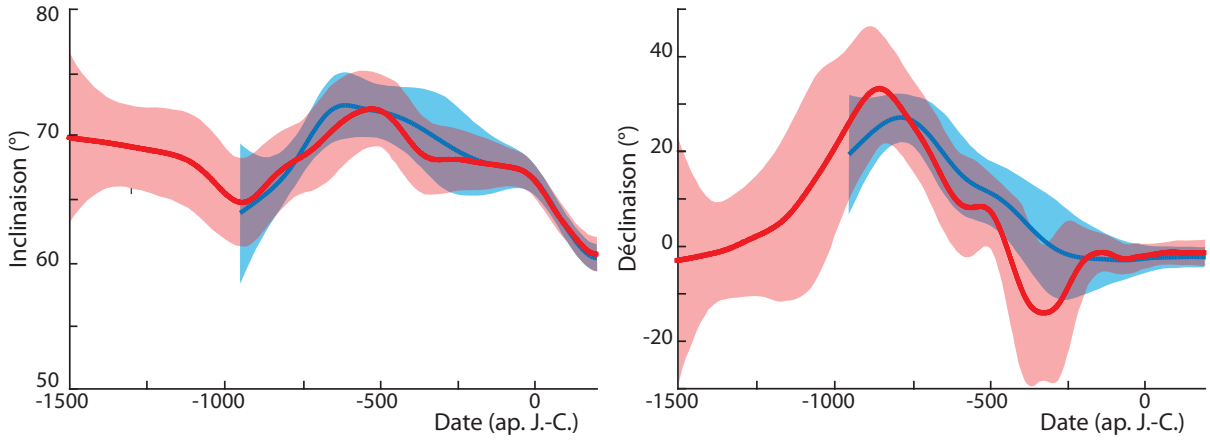


Figure 3.2 : Comparaison des anciennes (en bleu, Lanos, 2004 avec les données de Gallet et al., 2002) et nouvelles courbes bayésiennes (en rouge). Les enveloppes d'erreur autour des courbes moyennes sont définies à 95% de confiance.

Par rapport aux précédentes courbes bayésiennes françaises (Lanos, 2004 avec les données de Gallet *et al.*, 2002), les nouvelles courbes apportent des modifications importantes (Figure 3.2). La différence entre les deux générations de courbes est surtout marquée entre 500 et 200 av. J.-C., où l'ancienne courbe surlisse la variation séculaire, particulièrement de la déclinaison, par manque de points de référence.

1.2 Courbe univariée de l'intensité

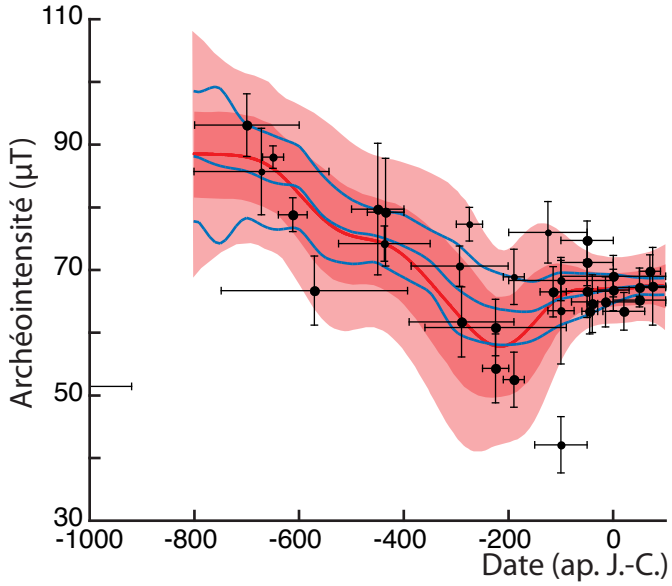


Figure 3.3 : Courbes bayésienne (en rouge) et par moyenne mobile (en bleu) de l'intensité. La courbe bayésienne est indiquée avec ses enveloppes d'erreur à 68 et 95%. La courbe par moyenne mobile (en bleu), représentée avec les limites de l'enveloppe d'erreur à 95%, est construite avec une largeur de fenêtre de 160 ans et un pas de 50 ans.

La courbe bayésienne univariée de l'intensité est calculée à partir des données dont le facteur de pondération est supérieur à 11 (Cf. Chapitre 9). Comme pour les courbes directionnelles, elle prend en compte les relations stratigraphiques entre structures et les densités de probabilité *a priori* de la datation de chaque structure. La courbe présentée en Figure 3.3 est obtenue avec 500 000 itérations. La courbe bayésienne moyenne, qui est très cohérente avec la courbe par moyenne mobile, accentue le minimum d'archéointensité vers 250 av. J.-C.. Pour les mêmes raisons que pour la direction, l'enveloppe d'erreur à 95% de la courbe bayésienne est plus large que celle de la courbe par moyenne mobile. Du fait de la dispersion entre les points de

référence au premier millénaire av. J.-C. et de leur relativement faible nombre, l'enveloppe d'erreur à 95% a une largeur moyenne proche de ±15µT.

2. Avancées de la datation archéomagnétique en France

2.1 Datation avec la direction

Le principe de la datation archéomagnétique est explicité dans le premier chapitre (Figure 1.5, page 29). Le potentiel de datation des nouvelles courbes de référence est illustré par deux valeurs-tests :

- Inclinaison = 70.0°, Déclinaison = 15.0°, α_{95} =2.0° (Figure 3.4). Cette direction, fictive, est caractéristique du premier âge du Fer.
- Inclinaison = 67.8°, Déclinaison = -4.6°, α_{95} =2.0° (Figure 3.5). Cette direction, caractéristique du second âge du Fer, a été acquise sur un sol cuit de la Couronne (Bouches-du-Rhône), étudié par Emile Thellier (1981). La datation du foyer est estimée vers 550 av. J.-C..

Le premier âge du Fer s'avère une période propice à la datation, qui est surtout contrôlée par la déclinaison du fait de sa forte variation (Figure 3.4). L'intervalle de date à 95% de confiance de la combinaison (Inclinaison, Déclinaison) avec les nouvelles courbes de référence a une largeur similaire (environ 300 ans) à celle de l'intervalle obtenu avec les anciennes courbes bayésiennes (Lanos, 2004 ; Figure 3.4a). Mais, les nouvelles courbes ont une meilleure résolution, dont témoigne la forme plus complexe des densités de probabilité de date. On observe aussi un vieillissement significatif (d'environ 60 ans dans l'exemple de la Figure 3.4) des bornes des intervalles de date à 95% de confiance avec les nouvelles courbes. L'obtention d'intervalles de date plus récents avec les anciennes courbes était due au surlissage de la variation séculaire dans la seconde moitié du premier millénaire av. J.-C. (Figure 3.2). L'acquisition de nombreuses nouvelles données de référence à cette période permet aux nouvelles courbes de résoudre ce problème et d'améliorer la résolution. Comme le nombre de nouveaux points de référence datés du premier âge du Fer est faible (5 nouveaux sites), la précision des courbes et donc des résultats de datation n'est pas significativement améliorée pour cette période.

Au second âge du Fer, les intervalles de date à 95% sont larges en raison de la faible variation de la déclinaison et de l'inclinaison. Cette période est peu propice à la datation archéomagnétique (Figure 3.5). Aussi, la comparaison avec la datation par d'autres approches (section 1.3) est seulement envisagée pour l'exemple du premier âge du Fer.

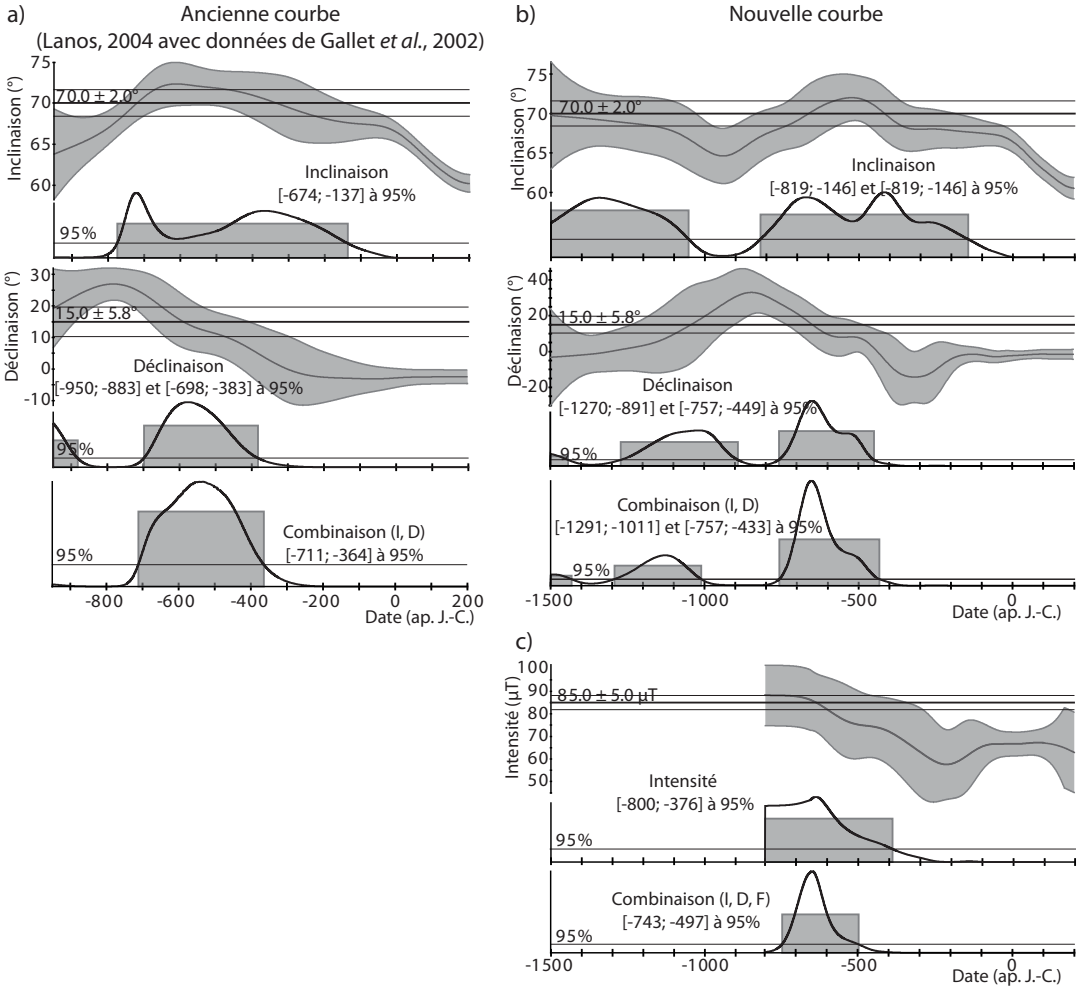


Figure 3.4 : Datation archéomagnétique au premier âge du Fer. a) Datation avec les anciennes courbes bayésiennes. b) Datation avec les nouvelles courbes bayésiennes de l'inclinaison et de la déclinaison. c) Apport de l'intensité à la datation archéomagnétique. L'intervalle final retenu pour la datation de la structure est l'intervalle à 95% de confiance de la combinaison (Inclinaison, Déclinaison, Intensité).

Ces deux exemples de datation illustrent les possibilités de datation archéomagnétique à l'âge du Bronze final, qui sont permises par l'extension des courbes jusqu'en 1500 av. J.-C.. Les intervalles de date obtenus ont une largeur à 95% de

confiance d'environ 300 ans. L'âge du Bronze final s'avère une période assez propice à la datation du fait des fortes variations de la déclinaison et de l'inclinaison.

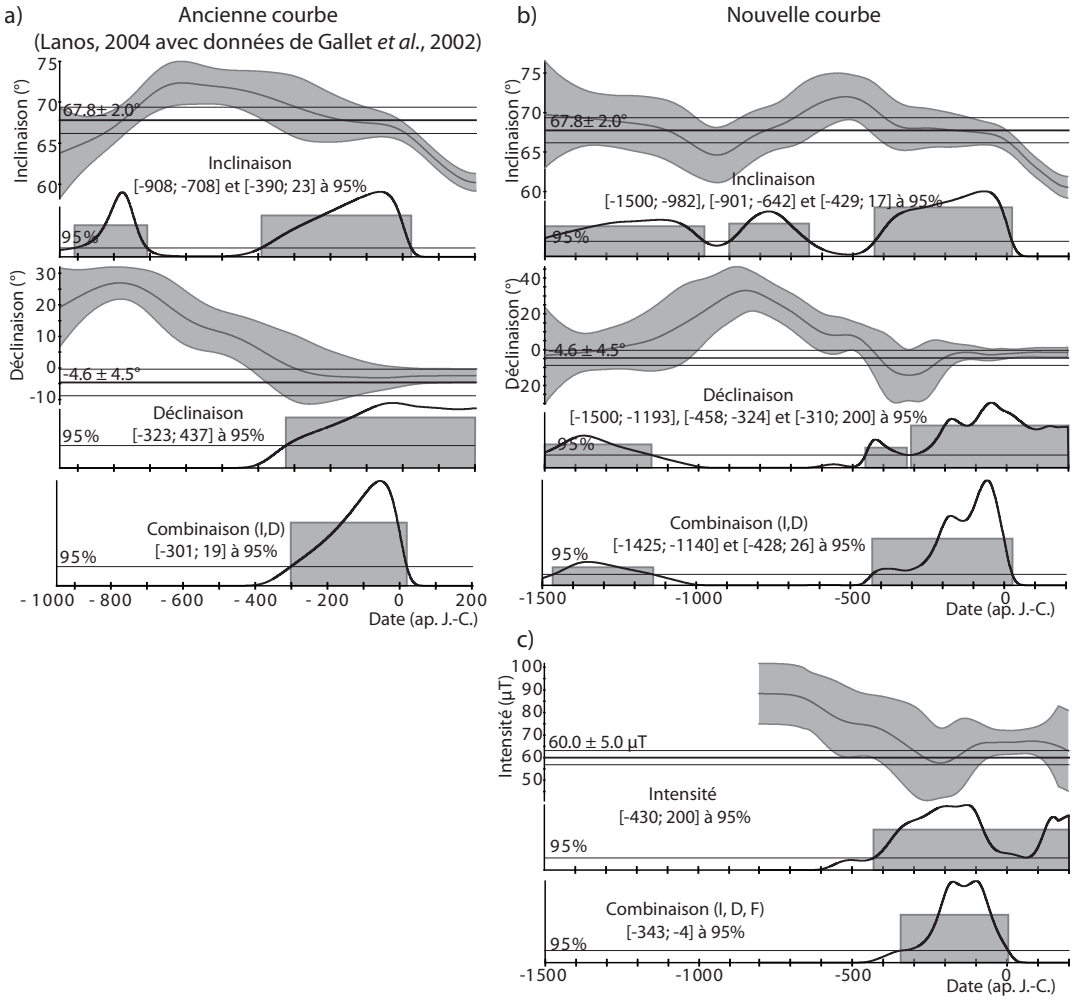


Figure 3.5 : Datation archéomagnétique au second âge du Fer. a) Datation avec les anciennes courbes bayésiennes. b) Datation avec les nouvelles courbes bayésiennes de l'inclinaison et de la déclinaison. c) Apport de l'intensité à la datation archéomagnétique. L'intervalle final retenu pour la datation de la structure est l'intervalle à 95% de confiance de la combinaison (Inclinaison, Déclinaison, Intensité).

1.2 Apport de l'intensité

L'apport de l'intensité à la datation archéomagnétique est présenté sur les Figures 3.4c et 3.5c avec deux valeurs fictives 80.0 ± 5.0 µT et 60.0 ± 5.0 µT, respectivement représentatives du premier et du second âge du Fer. L'intervalle de date obtenu avec l'intensité est large de plusieurs centaines d'années. Mais sa combinaison

avec l'inclinaison et la déclinaison donne un intervalle de date à 95% de confiance réduit de 25% environ par rapport à l'intervalle de date de la combinaison de la déclinaison et de l'inclinaison seules. Ces deux exemples illustrent donc l'impact important de l'intensité sur la datation archéomagnétique au premier millénaire av. J.-C.. Ce potentiel pourrait être amélioré en acquérant de nouveaux points de référence fiables en Europe occidentale.

2.3 Confrontation à la datation avec les modèles géomagnétiques

De nouvelles approches de datation archéomagnétique sont apparues avec le développement récent des modèles géomagnétiques globaux (Lodge et Holme, 2008 ; Korte *et al.*, 2009) ou régionaux (Pavon-Carrasco *et al.*, 2009). L'avantage de ces approches est de générer un modèle aux coordonnées géographiques de la structure à dater et il n'y a donc pas d'erreur de relocalisation en un point de référence, contrairement à la datation avec une courbe locale de variation séculaire.

La détermination de l'enveloppe d'incertitude du modèle ARCH3k.1 (Korte *et al.*, 2009) permet d'envisager l'utilisation de ce modèle global pour la datation archéomagnétique. La Figure 3.6a montre les résultats de datation pour le test du premier âge du Fer (valeurs de la Figure 3.5). Les intervalles de date à 95% de confiance sont plus imprécis que ceux obtenus avec les nouvelles courbes de variation séculaire. Pour optimiser l'application des modèles globaux à la datation, Lodge et Holme (2009) ont développé une nouvelle approche en construisant un nouveau modèle, qui minimise la différence entre le modèle global et les courbes de variation séculaire européenne. Un premier modèle qui couvre les deux derniers millénaires, GMADE2k.1, a été développé à partir du modèle CALS7k.2 (Korte et Constable, 2005a) et cinq courbes directionnelles européennes (France : Gallet *et al*, 2002 ; Grande-Bretagne : Zananiri *et al.*, 2007 ; Espagne : Gomez-Paccard *et al.*, 2006a ; Allemagne, Schnepp et Lanos, 2005 ; Hongrie : Marton et Ferencz, 2006). Cette approche est en cours de développement pour le premier millénaire av. J.-C. (Lodge et Holme, 2009).

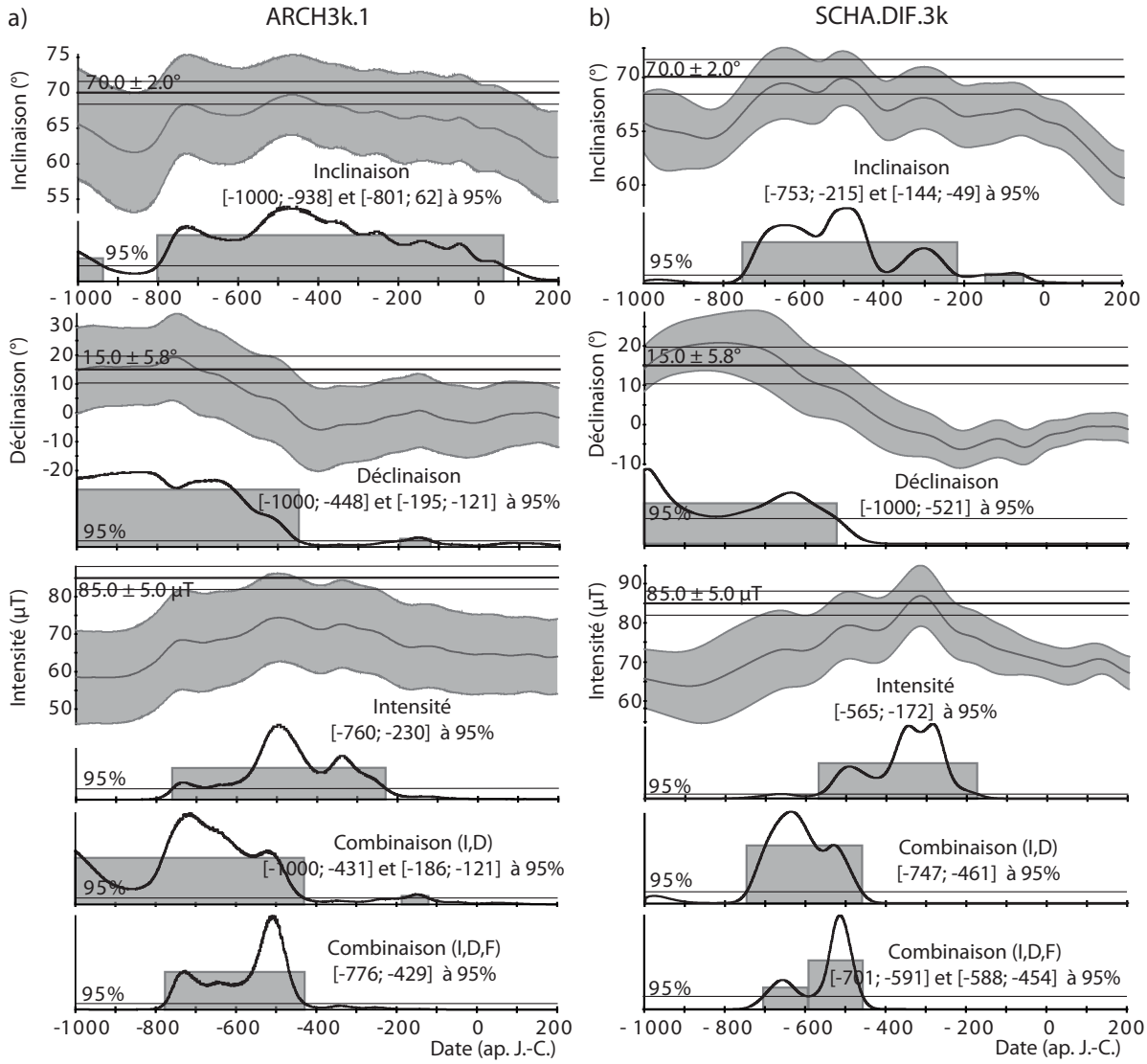


Figure 3.6 : Datation archéomagnétique au premier âge du Fer avec a) le modèle global ARCH3k.1 (Korte et al., 2009) et b) le modèle régional SCHA.DIF.3k (Pavon-Carrasco et al., 2009). Les modèles ont été calculés à Paris. Les résultats de datation sont à comparer avec ceux de la Figure 3.5. L'intervalle final retenu pour la datation de la structure est l'intervalle à 95% de confiance de la combinaison (Inclinaison, Déclinaison, Intensité).

Une des applications principales du modèle régional SCHA.DIF.3k (Pavon-Carrasco *et al.*, 2009) est la datation archéomagnétique (Figure 3.6b). Les intervalles de date à 95% de confiance de l'inclinaison, de la déclinaison et donc de leur combinaison sont très cohérents aux intervalles obtenus à partir des courbes de variation séculaire d'Europe occidentale. En revanche, l'intervalle de date de l'intensité est significativement plus jeune (de plus de 200 ans), ce qui pourrait s'expliquer par l'utilisation dans le modèle SCHA.DIF.3k de données de référence d'Europe de l'Est de

qualité plus discutable (Cf. section 6.2 du chapitre 9). Le modèle régional constitue une alternative fiable aux courbes directionnelles locales de variation séculaire (du moins au premier millénaire av. J.-C.). Mais le modèle dans son état actuel semble peu adapté à la datation (des matériaux déplacés par exemple) par l'intensité.

2.4 Synthèse : un meilleur outil de datation chronométrique en France au premier millénaire av. J.-C.

Nos nouvelles courbes de variation séculaire permettent des améliorations importantes de la datation archéomagnétique au premier millénaire av. J.-C.. L'acquisition de nombreuses nouvelles données de référence au second âge du Fer, qui était une période peu couverte par le jeu de données de Gallet *et al.* (2002), permet d'obtenir des courbes de référence directionnelles de meilleure résolution et plus justes Les résultats de datation à l'âge du Fer sont donc plus fiables, mais la largeur des intervalles de date n'a pu être significativement réduite en deçà de 300 ans. Notre travail a aussi permis d'établir une courbe de référence de l'intensité, dont l'apport sur la datation s'avère notoire. La largeur des intervalles de date ne permet pas de pallier aux limites du radiocarbone au premier millénaire av. J.-C.. Mais, ce travail démontre qu'il est un outil chronométrique utile pour dater les fours ou les foyers des sites du premier âge du Fer pauvres en mobilier datant.

3. La datation archéomagnétique en Italie au premier millénaire av. J.-C.

Ces observations sur la datation archéomagnétique concernent les courbes de variation séculaire françaises valables dans un rayon de 1000km autour de Paris. La situation est différente en Italie, comme le montrent les études de datation, réalisées au cours du doctorat, de trois fours de Megara Hyblaea (Sicile) et d'un four de Pompéi.

3.1 Etat de la documentation archéomagnétique en Italie

Les premières analyses archéomagnétiques (Folgerhaiter, 1899) ont été réalisées en Italie sur des briques et des céramiques du premier millénaire av. J.-C.. Pourtant, le

nombre de données de référence pour la direction du champ magnétique y reste assez faible comparé aux autres pays européens malgré un fort potentiel archéomagnétique (Tema, 2011) (Figure 3.7). Les premières études dans les années 80 et 90 (Evans et Mareschal, 1989 ; Marton *et al.*, 1992 ; Nardi *et al.*, 1995 par exemple) concernent un nombre limité de structures. Récemment, deux jeux de données plus abondants ont été publiés, le premier par Evans et Hoye (2005) qui concerne des fours du sud de l'Italie et de Sicile et le second par Tema *et al* (2006), dont les sites de référence sont majoritairement situés dans le nord (Figure 3.7).

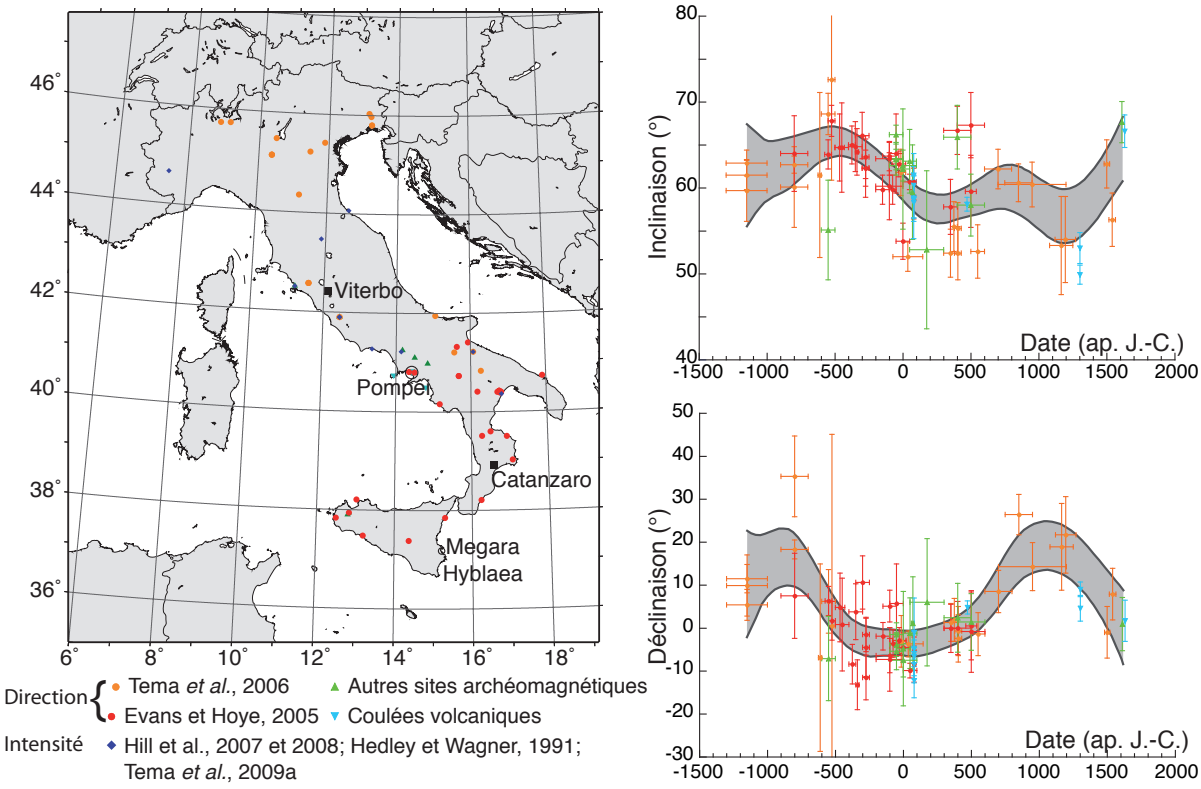


Figure 3.7 : Etat de la documentation archéomagnétique en Italie. A gauche, localisation des points de référence. A droite, courbes bayésiennes de l'inclinaison et de la déclinaison de Tema et al. (2006) construites à partir des données représentées. Autres sites archéomagnétiques correspondent aux études de Chiari et Lanza (1999), Chiosi et al. (1998), La Torre et al. (1998), Marton et al. (1992), Nardi et al. (1995 et Zanella et al. (2000). Les études sur les coulées volcaniques sont Carracedo et al. (1993), Cioni et al. (2004), Incoronato et al. (2002), Kent et al. (1981), Principe et al. (2004), Tanguy et al. (2003) et Zanella et al. (2000).

Cette base de données est complétée par les directions acquises sur les coulées volcaniques de Campanie, de Sicile et des îles Eoliennes. Les travaux sur ce type de matériel sont nombreux (Zanella *et al.*, 2000 ; Lanza *et al.*, 2005 ; Tanguy *et al.*, 2003 ; Principe *et al.*, 2004 ; Arrighi *et al.,* 2006). A l'exception des coulées associées à l'éruption du Vésuve en 79 ap. J.-C., la plupart d'entre elles sont relativement mal datées ou datées par archéomagnétisme avec la courbe de variation séculaire française. Aussi, ces données sont peu adaptées pour devenir de nouveaux points de référence (Tema *et al.*, 2006). Certaines données italiennes (Zanella *et al.*, 2000 ; Chiari et Lanza, 1999) ont également la spécificité d'être acquises sur des peintures murales. Lors de leur application, les pigments rouges constitués d'hématite s'alignent dans la direction du champ magnétique ambiant et acquièrent une aimantation rémanente picturale (PiRM, Chiari et Lanza, 1997). Ce processus nécessite cependant d'être mieux connu, notamment pour espérer obtenir une direction d'aimantation moyenne plus précise (les α_{95} atteignant parfois 15°, Zanella *et al.*, 2000).

Tema *et al.* (2006) propose une courbe de variation séculaire de la direction du champ magnétique (Figure 3.7). Grâce notamment à Evans et Hoye (2005), la seconde moitié du premier millénaire av. J.-C. est la période la plus riche en données de référence. En revanche, les fortes variations de la déclinaison au premier millénaire av. J.-C. sont mal contraintes. Pour l'intensité, les données restent rares (Hill *et al.*, 2007 et 2008 ; Gallet *et al.*, 2009 ; Hedley et Wagner, 1991 pour le premier millénaire av. J.-C. et Tema *et al.*, 2009a pour le haut Moyen-Âge) et sont incluses dans les courbes de référence de l'Europe occidentale (Cf. Chapitre 9). L'objectif de cette section est de tester le potentiel et les limites de la datation archéomagnétique en Italie au premier millénaire av. J.-C. et à l'époque romaine avec l'exemple des analyses d'un four de Pompéi et de trois fours de Megara Hyblaea (Sicile).

3.2 Présentation des structures étudiées à Pompéi et Megara Hyblaea

Le four de potier de Pompéi (Lat : 40.75°N, Long : 14.49°E), prélevé à l'été 2010, provient de l'espace 13 dans l'*insula* 5 de la région I, qui a été fouillé par Jean-Pierre Brun et Martine Leguilloux (Centre Jean-Bérard). Le fonctionnement du four est daté par le mobilier céramique de la première moitié du premier siècle ap. J.-C. (Cavassa, 2009).

Megara Hyblaea (Lat : 37.20°N, Long : 15.18°E) est une ancienne colonie grecque, située en Sicile au fond du golfe d'Augusta. D'après les textes historiques, la colonie est fondée vers 730/725 av. J.-C. (Vallet *et al.*, 1983). Après la destruction de la ville archaïque par Syracuse en 483 av. J.-C., le site n'aurait plus été occupé jusque vers 340 av. J.-C.. Cette ville hellénistique aurait été détruite par les armées de Marcellus en 214 av. J.-C., mais les vestiges archéologiques montrent que l'occupation du site a perduré sous l'époque romaine jusqu'à la fin du premier siècle ap. J.-C. (Vallet *et al.*, 1983). Les structures étudiées ont été dégagées lors des fouilles de Georges Vallet et François Villard, mais la documentation sur leur contexte et leur datation est lacunaire (Vallet *et al.*, 1983). Dans le contexte de la reprise des études depuis 2006 par Henri Tréziny (Centre Camille Jullian), trois fours, supposés datés de la période d'occupation hellénistique, ont été prélevés durant l'été 2010. Il s'agit du four des thermes hellénistiques **32**,21j et des fours **50**,71 et **50**,92, dont la fonction reste indéterminée (four de potier, four à chaux ?).

Le contexte de ces fours et les analyses sont détaillés dans l'Annexe 4. Quatre archéodirections et trois archéointensités moyennes ont pu être déterminées (Tableau 3.1). L'analyse du four de Pompéi a mis en évidence des mouvements post-cuisson de la structure (Cf. justification dans l'annexe 4) : l'archéodirection moyenne ne peut servir à une datation archéomagnétique significative mais cette structure permet de tester le potentiel de datation des courbes de référence italiennes autour du changement d'ère.

	D_{site} (°)	I_{site} (°)	N_{DIR}	α_{95}	k	F ± σ (µT)	N_{INT}
Pompéi, *insula* 5, four de l'espace 13	354.2	63.1	11	2.7	281	65.2 ± 2.0	12
Megara Hyblaea, four des thermes **32**,21j	353.5	59.9	15	2.0	369	-	-
Megara Hyblaea, four **50**,71	353.4	60.0	25	2.3	161	79.1 ± 7.1	13
Megara Hyblaea, four **50**,92	358.3	61.7	19 (21)	1.4	567	76.6 ± 4.1	11

Tableau 3.1 : Résultats de direction et d'intensité des fours de Pompéi et Megara Hyblaea

Structure ; Déclinaison moyenne ; Inclinaison moyenne ; Nombre d'échantillons utilisés pour l'archéodirection moyenne ; Paramètre de précision de Fisher ; Alpha 95, incertitude à 95% de confiance autour de la direction moyenne ; Archéointensité et déviation standard en microTesla ; Nombre d'échantillons utilisés pour l'archéointensité moyenne

Trois ensembles différents de courbe de variation séculaire ont été utilisés pour la datation archéomagnétique :

- *Datation avec les courbes de Tema et al.* (2006). Les données de Pompéi et Megara Hyblaea sont relocalisées à Viterbo (Lat : 42.27°N, Long : 12.02°E).
- Un rapide aperçu d'une carte de l'Europe montre que le sud de l'Italie est géographiquement plus proche de la Grèce et de la péninsule balkanique que du Nord de l'Italie. Aussi, pour la datation archéomagnétique de Pompéi et Megara Hyblaea, il semble intéressant d'utiliser des courbes de référence construites avec une base de données de référence plus large que celle des courbes de Tema *et al.* (2006). Cette approche permet aussi d'utiliser l'archéointensité pour la datation archéomagnétique. A peu près à mi-distance entre les deux sites, Catanzaro (chef-lieu de la Calabre, Lat : 38,91°N et Long : 16,59°E) a été choisi comme point de référence de ces courbes, appelées *courbes de la Méditerranée centrale*.
- *Datation avec les nouvelles courbes françaises*. Les données sont relocalisées à Paris (Lat : 48.85°N, Long : 2.30°E).

3.3 Présentation des courbes bayésiennes de la Méditerranée Centrale

Toutes les données publiées dans un rayon de 1000km autour de Catanzaro ont été sélectionnées. Cette distance couvre l'ensemble de l'Italie, de la Grèce et des pays de l'Ex-Yougoslavie et la majeure partie de la Bulgarie et de la Hongrie, ce qui permet donc d'inclure leurs riches bases de données de référence pour la direction du champ géomagnétique (Cf. Figure 1.8 page 40 : Evans, 2006 ; Kovacheva *et al.*, 2009a ; Donadini *et al.*, 2010 ; Marton, 2009 et 2010). Pour l'archéointensité, seules les données déterminées par les protocoles de Thellier avec bouclages ont été sélectionnées, en l'occurrence des données italiennes (Hill *et al.*, 2007 et 2008 ; Tema *et al.*, 2009 ; Hedley et Wagner, 1991 ; Gallet *et al.*, 2009a), grecques (De Marco *et al.*, 2008 ; Kovacheva *et al.*, 2000) et bulgares (Kovacheva *et al.*, 2009a). Les courbes ont été calculées entre 1000 av. J.-C. et 600 ap. J.-C. avec 10000 itérations pour la déclinaison et l'inclinaison et entre 800 av. J.-C. et 600 ap. J.-C. avec 500000 itérations pour l'intensité (Figure 3.8).

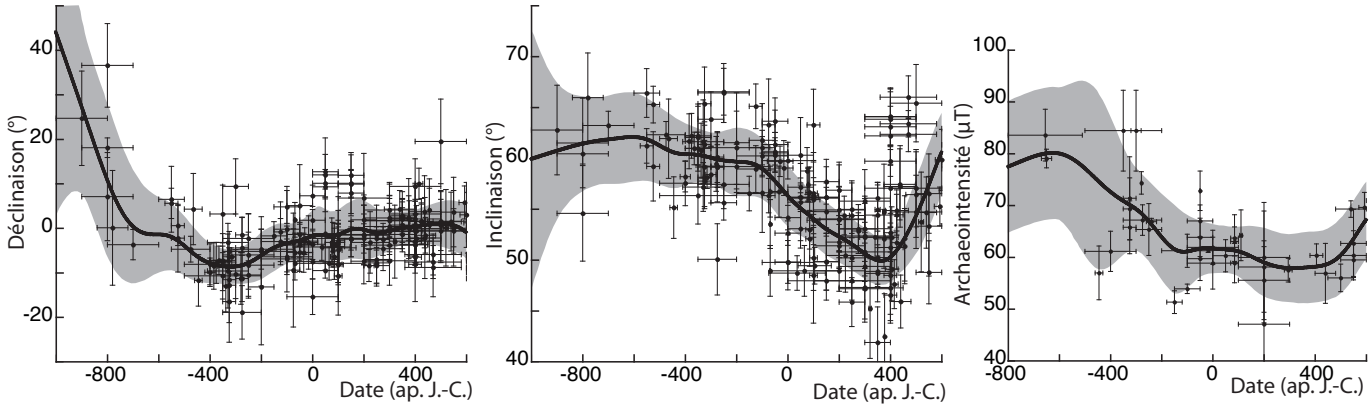


Figure 3.8 : Courbes bayésiennes univariées de la variation séculaire en Méditerranée centrale. Les courbes sont construites à partir des données de référence situées dans un rayon maximal de 1000km autour de Catanzaro (Lat. : 38.91°N, Long. : 16.59°E).

Ces courbes de référence présentent les mêmes tendances que les courbes bayésiennes d'Europe occidentale à Paris durant le premier millénaire av. J.-C. et l'époque romaine. Entre 1000 et 400 av. J.-C., le nombre de points de référence est plus faible en Méditerranée centrale qu'en Europe de l'Ouest, ce qui explique la plus forte imprécision des courbes. Par rapport aux courbes de Méditerranée centrale, les courbes italiennes de Tema *et al.* (2006) surlissent fortement la variation séculaire (Figure 3.7) et particulièrement celle de la déclinaison autour de 500 av. J.-C.. Ce surlissage est provoqué par le plus faible nombre de données de référence prises en compte dans le calcul.

3.4 Résultats des datations archéomagnétiques des fours de Pompéi et Megara Hyblaea

Les résultats de datation en utilisant les trois ensembles de courbes de référence sont présentés dans les Figures 3.9 à 3.12. Sur l'ensemble des fours, les densités de probabilité de date avec les courbes de Tema *et al.* (2006) ont une forme moins complexe que les densités obtenues avec les autres courbes (particulièrement pour le four **50**,92 de Megara Hyblaea), ce qui est due à la faible résolution des courbes de référence. Aussi, même si les intervalles de date sont en apparence plus utiles à l'archéologue car plus précis, les datations restent moins fiables que celles à partir des courbes construites avec un nombre de données plus élevé.

Les densités de probabilité obtenues avec les courbes de Méditerranée centrale et les courbes d'Europe occidentale sont généralement très semblables. Les courbes de Méditerranée centrale donnent des intervalles de date plus larges pour la direction et pour l'intensité, car le nombre de données de référence est plus faible et la dispersion entre les données est plus forte dans cette région qu'en Europe de l'Ouest. L'intensité permet de réduire significativement les intervalles de date obtenus avec la direction. Les courbes d'Europe occidentale s'avèrent les plus utiles à la datation. Même si les intervalles de date sont larges, les résultats apportent quelques informations sur la datation du fonctionnement des fours de Megara Hyblaea. En raison de mouvements post-cuisson du four de Pompéi, les résultats de datation avec la direction ne sont pas significatifs archéologiquement et l'archéointensité seule donne des intervalles de date très larges (Figure 3.9).

Pour le four **50**,71 de Megara Hyblaea, on observe une incompatibilité des densités de probabilité de la direction et de l'intensité avec les courbes d'Europe occidentale (Figure 3.10). La direction permet de dater la fin du fonctionnement du four dans la seconde moitié du premier millénaire av. J.-C.. Les fortes intensités privilégient la période d'occupation hellénistique du site plutôt que la période romaine.

Les résultats sont plus facilement exploitables pour le four **50**,92, car les résultats de l'intensité sont compatibles avec ceux de la direction (Figure 3.11). Les courbes de Méditerranée centrale et d'Europe occidentale donnent des résultats cohérents, ce qui démontre la robustesse de la datation. L'intervalle retenu, [-643 ; -389], placent la fin du fonctionnement du four **50**,92 à la fin de l'époque archaïque ou pendant la période de transition qui a suivi la destruction de la ville par Syracuse. En tous cas, le four a cessé de fonctionner avant l'époque hellénistique, contrairement à ce que laissait penser la rare documentation archéologique disponible.

Pompéi, *insula* 5, four de l'espace 13

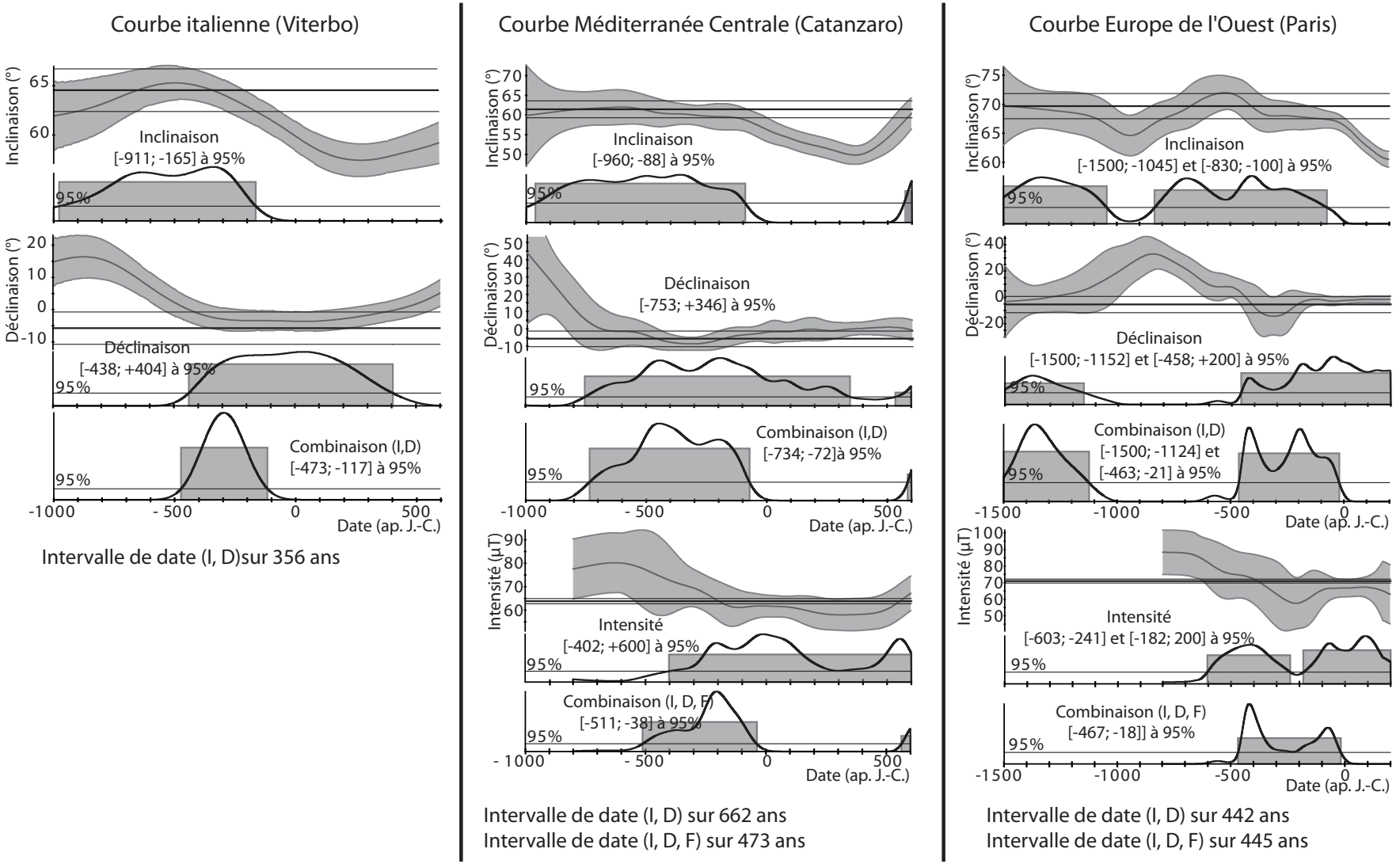


Figure 3.9 : Datation archéomagnétique du four de Pompéi par les courbes italiennes de Tema et al. (2006), les courbes de Méditerranée centrale et les courbes d'Europe occidentale.

Megara Hyblaea, four **50**,71

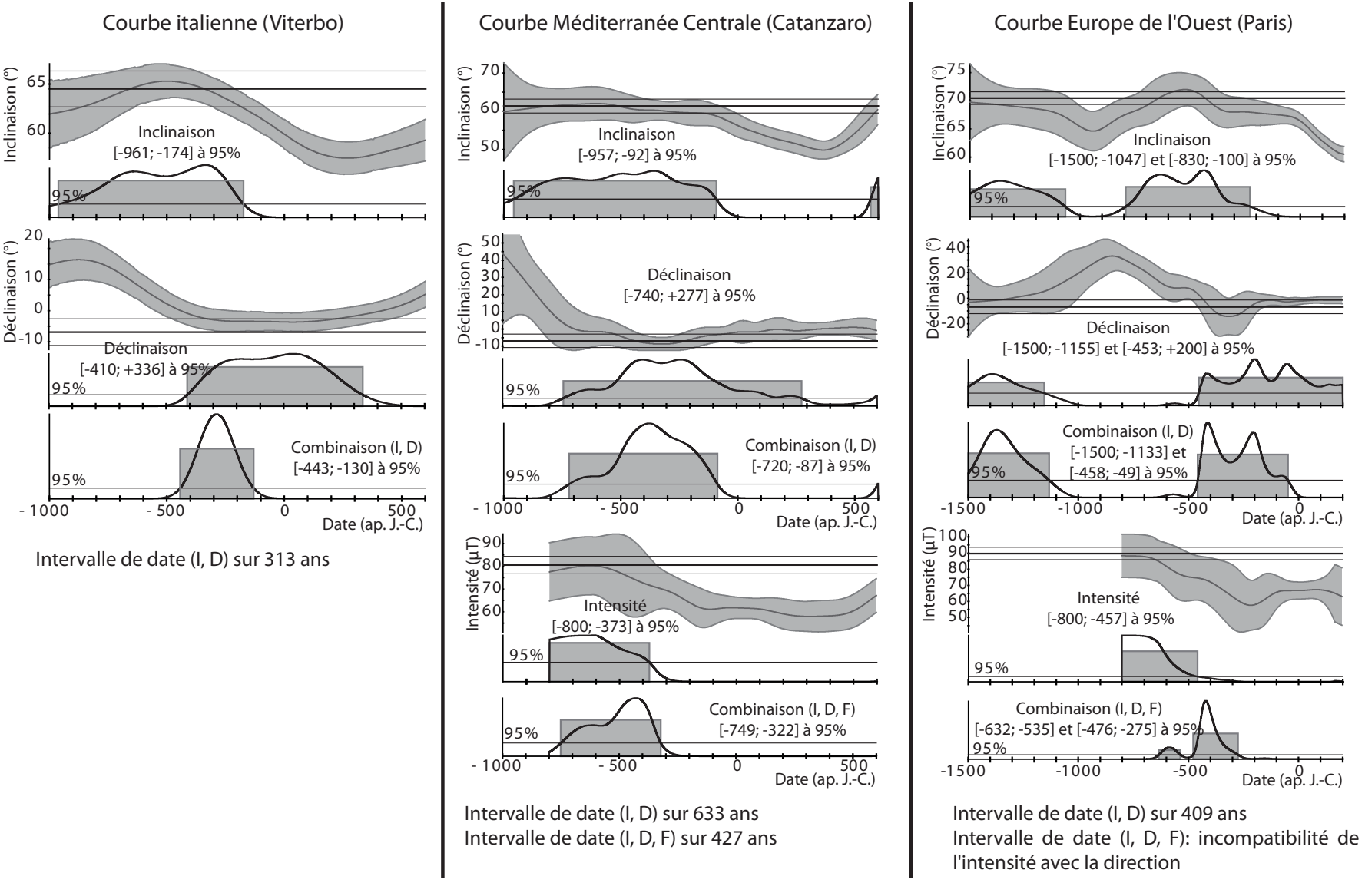


*Figure 3.10 : Datation archéomagnétique du four **50**,71 de Megara Hyblaea.*

Megara Hyblaea, four **50**,92

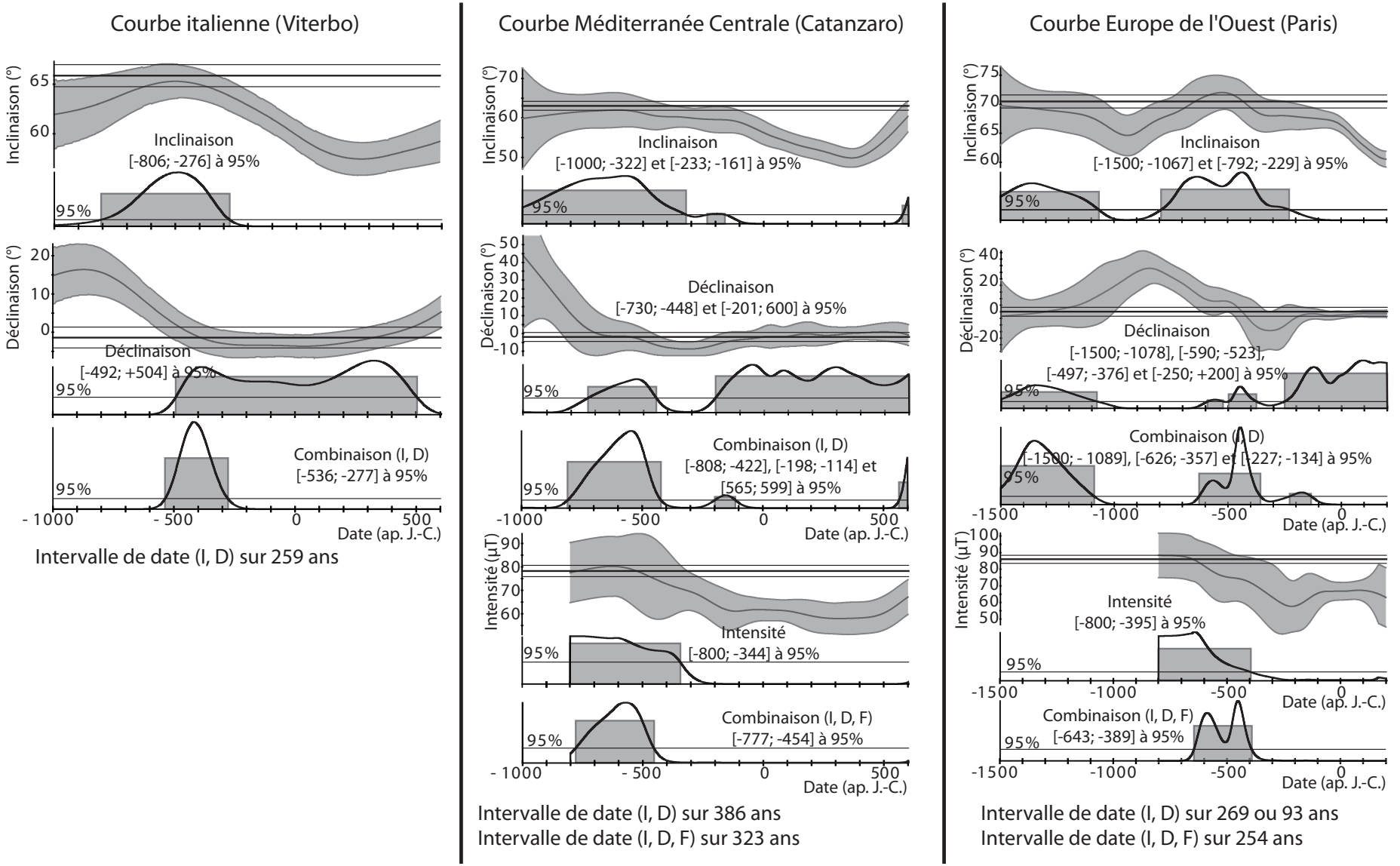


*Figure 3.11 : Datation archéomagnétique du four **50**,92 de Megara Hyblaea.*

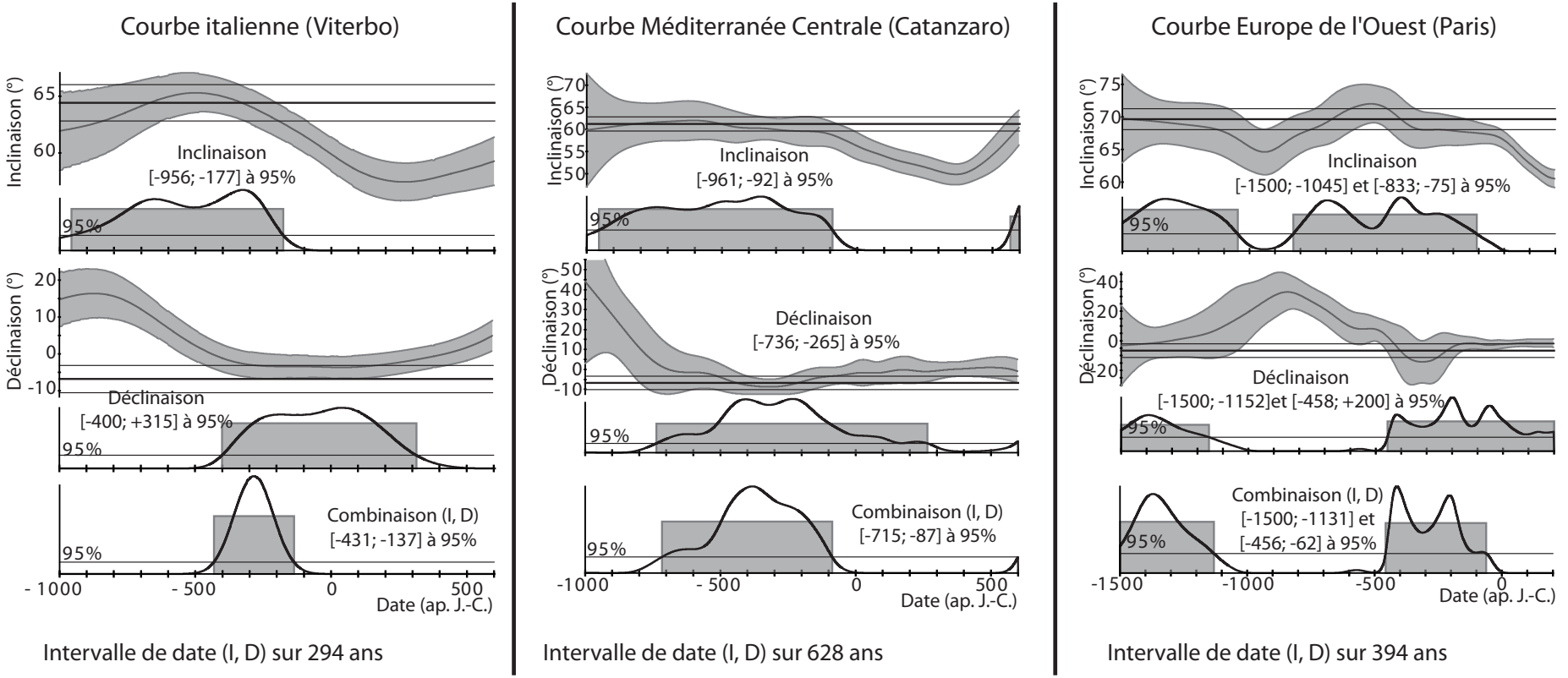


*Figure 3.12 : Datation archéomagnétique du four **32**,21j de Megara Hyblaea.*

La datation du four des thermes **32**,21j repose uniquement sur la direction (Figure 3.12). La fin du fonctionnement du four date de la seconde moitié du premier millénaire av. J.-C. dans l'intervalle [-456 ;-62] à 95% de confiance. Cet intervalle est large en raison de la faible variation de la déclinaison et de l'inclinaison au cours de cette période. De ce fait, l'acquisition de nouveaux points de référence ne permettra sans doute pas de réduire significativement un tel intervalle de date. Aussi, pour la datation archéomagnétique, il semble préférable d'étudier des structures sur lesquelles il est possible d'étudier le vecteur total comme le four **50**,92, afin d'obtenir des résultats plus précis.

Conclusion

Les valeurs-tests et les analyses des fours de Pompéi et de Megara Hyblaea illustrent le potentiel de datation archéomagnétique en Europe occidentale au premier millénaire av. J.-C.. Les nouvelles données de référence ont permis d'obtenir des courbes plus fiables et de meilleure résolution pour la datation archéomagnétique. La seconde moitié du premier millénaire av. J.-C. (c'est-à-dire le second âge du Fer en France et dans l'Europe celtique) est une période peu propice, car les variations de la direction restent limitées. En revanche, le potentiel de datation est important entre 1500 et 500 av. J.-C. (c'est-à-dire l'âge du Bronze final et le premier âge du Fer en France), car les variations sont très fortes. Les intervalles de date restent larges mais peuvent apporter des informations nouvelles à la connaissance des sites archéologiques comme à Megara Hyblaea. Le potentiel de datation pourrait être augmenté en acquérant de nouvelles données de référence ciblées sur les périodes de forte variation. Ce constat vaut également pour l'intensité, car ce paramètre permet de réduire d'environ 25% les intervalles de date. L'Italie et le monde méditerranéen en général constituent une zone privilégiée pour de futures recherches, car les structures semblent plus adaptées aux protocoles d'archéointensité que celles de l'Europe celtique, comme l'attestent le succès des analyses des fours de Pompéi et Megara Hyblaea.

Conclusion générale

Quarante-sept structures archéomagnétiques (29 fours, 10 foyers et 8 lots de tessons) ont été étudiées au cours de ce doctorat pour améliorer les courbes de variation séculaire de la direction et de l'intensité en Europe occidentale au premier millénaire av. J.-C.. La datation du moment d'acquisition de l'aimantation thermo-rémanente (ATR) a été contrôlée à partir de l'ensemble des informations stratigraphiques, chronotypologiques et chronométriques disponibles. Les structures ont généralement été prélevées par la méthode du chapeau de plâtre. Une nouvelle méthode, moins destructrice et adaptée aux sédiments meubles, a été testée avec succès sur un foyer de la grotte des Fraux (Saint-Martin-de-Fressengeas, Dordogne). Les analyses de minéralogie magnétique réalisées (courbes thermomagnétiques, acquisition d'aimantation rémanente isotherme) montrent que le principal porteur de l'aimantation des terres cuites protohistoriques est une titanomagnétite pauvre en titane. Les archéodirections ont été déterminées par désaimantation thermique et/ou par champ alternatif, puis corrigées si nécessaire de l'anisotropie d'ATR. Ces premières analyses ont mis en évidence les structures les plus propices (meilleure stabilité de l'ATR) aux analyses d'archéointensité par le protocole de Thellier-Thellier. L'analyse du site de Moyenvic-les-Crôleurs démontre l'intérêt d'appliquer le champ du laboratoire dans une direction éloignée de celle de l'aimantation rémanente naturelle. Cette amélioration permet de mieux détecter les évolutions minéralogiques au cours des chauffes successives en laboratoire, qui affectent plus de 40% des échantillons que nous avons analysés. Les archéointensités ont été corrigées des effets de l'anisotropie d'ATR et de la vitesse de refroidissement.

L'étude expérimentale menée sur des briquettes de Sallèles-d'Aude apporte de nouveaux éléments sur le lien entre la vitesse de refroidissement et la minéralogie magnétique. Les résultats de cette analyse démontrent aussi la fiabilité du protocole suivi à Rennes et soulèvent la question de l'importance de la correction de vitesse de refroidissement sur l'estimation de l'archéointensité. Or, pour les structures archéologiques, la durée du refroidissement lent à appliquer est difficile à évaluer. Aussi,

nous suggérons de pondérer les archéointensités en fonction de l'importance du facteur de correction, ceci afin de limiter l'impact des incertitudes sur la correction de vitesse de refroidissement lors de la construction des courbes de variation séculaire.

Au final, 39 nouvelles archéodirections moyennes et 18 nouvelles archéodirections ont été acquises. Les courbes de référence ont été construites par la méthode à fenêtre mobile (Le Goff, 1990) et par la méthode hiérarchique bayésienne à partir de l'ensemble des données disponibles dans un rayon de 1000km autour du point de référence fixé à Paris. La courbe de variation séculaire de la direction a été étendue jusqu'en 1500 av. J.-C. et celle de l'intensité jusqu'en 800 av. J.-C.. L'analyse très fructueuse du four Néolithique de Chartres (daté de la première moitié du quatrième millénaire av. J.-C.) montre qu'à moyen terme il est envisageable d'étendre les courbes de variation séculaire (au moins directionnelles) et donc la datation archéomagnétique à l'ensemble de l'âge du Bronze et au Néolithique. De nombreuses nouvelles données de référence restent cependant à acquérir.

Désormais, l'Europe Occidentale apparaît comme l'aire géographique où la variation séculaire au premier millénaire av. J.-C. du vecteur champ magnétique est la mieux définie. Durant cette période, l'inclinaison varie de manière non monotone entre 65 et 75°. En revanche, les courbes de la déclinaison et de l'archéointensité montrent de très fortes variations dans la première moitié du premier millénaire av. J.-C. avec vers 800 av. J.-C. un maximum de 30° pour la déclinaison et de 90µT pour l'archéointensité. Les deux courbes présentent également un minimum vers 250 av. J.-C..

Ces nouvelles courbes de référence apportent des améliorations importantes à la datation archéomagnétique. L'augmentation du nombre de points de référence permet d'obtenir des courbes plus fiables, particulièrement dans la seconde moitié du premier millénaire av. J.-C., période à laquelle appartiennent la plupart des structures étudiées lors de ce travail. Cette période semble peu propice à la datation archéomagnétique, en raison de la faible variation de l'inclinaison et de la déclinaison. Mais l'utilisation de l'archéointensité pourrait pallier, en partie, à cet inconvénient. Grâce à la forte variation séculaire, la première moitié du millénaire est plus propice à la datation. Nos nouvelles courbes améliorent la justesse de la datation, mais la précision des intervalles de date à 95% de confiance n'a pu être significativement réduite. L'apport de l'utilisation de l'intensité est illustré par les exemples des fours de Pompéi et Mégara Hyblaea (Sicile).

L'intensité permet de réduire d'environ 25% la largeur des intervalles de date au premier millénaire av. J.-C.. Comme pour la direction, le potentiel de datation pourrait être encore amélioré en acquérant de nouvelles données de référence, qui permettraient sans doute d'atteindre des intervalles de date restreints à 150 ans environ. L'aire méditerranéenne semble la zone la plus propice pour remplir cet objectif, car les structures permettant une détermination fiable de l'archéointensité sont plus courantes qu'en Europe celtique.

L'apport de notre nouvel ensemble de données sera sans doute aussi important pour les modèles globaux du champ géomagnétique, comme ARCH3k_cst.1. Celui-ci semble prometteur au vu de sa relativement bonne adéquation avec les nouvelles courbes de référence au premier millénaire av. J.-C.. En ce qui concerne les implications géomagnétiques, les nouvelles courbes mettent en évidence deux changements majeurs dans la variation séculaire en 800 et 250 av. J.-C.. Ces évènements semblent correspondre à un positionnement du Pôle Géomagnétique Virtuel à de plus faibles latitudes et à un champ non-dipolaire plus intense, qui pourraient être lié à un dipôle excentré. Les jeux de données hors Europe sont rares et souvent trop incomplets pour valider avec certitude cette hypothèse. Pour mieux décrire la variation séculaire observée en Europe Occidentale en terme de mouvements de fluides dans le noyau externe ou à l'interface noyau-manteau, la documentation archéomagnétique et volcanique de référence doit être complétée particulièrement dans l'hémisphère Sud, mais aussi en Asie et en Amérique du Nord.

Bibliographie

Abrahamsen, N., Jacobsen, B.H., Koppelt, U., De Lasson, P., Smekalova, T. & Voss, O., 2003. Archaeomagnetic investigations of Iron Age slags in Denmark, *Archeol. Prospect.*, 10, 91-100

Aidona, E., Scholger, R., Mauritsch, H.J., Schnepp, E. & Klemm, S., 2006. Spatial distribution of archaeomagnetic vectors within archaeological samples from Eisenerz (Austria), *Geophys. J. Int.*, 166, 46-58

Aitken, M.J. & Weaver, G.H., 1962. Magnetic dating : some archaeomagnetic measurements in Britain, *Archaeometry*, 5, 4-22

Aitken, M.J. & Hawley, H.N., 1966. Archaeomagnetic dating in Britain – IV, *Archaeometry*, 3, 129-135

Aitken, M.J. & Hawley, H.N., 1967. Archaeomagnetic measurments in Britain IV, *Archaeometry*, 10, 129-135

Aitken, M.J. & Weaver, G.H., 1962. Magnetic dating: further archaeomagnetic measurements in Britain, *Archaeometry*, 6, 76-80

Aitken, M.J., 1985. *Thermoluminescence dating*, Academic Press, Londres, 359 p.

Aitken, M.J., Allsop, A.L., Bussell, G.D. & Winter, M.B., 1988. Determination of the intensity of the Earth's magnetic field during archaeological times : reliability of the Thellier technique, *Rev. Geophys.*, **26**, 3-12

Alexandrescu, M., Courtillot, V & Le Mouël, J.L., 1996. Geomagnetic field direction in Paris since the mid-sixteenth century, *Phys. Earth planet. Inter.*, 98, 321-360

Alva-Valdivia, L.M., Morales, J., Goguitchaivili, A., Popenoe de Hatch, M. & Hernandez-Bernal, F., 2010. Absolute geomagnetic intensity data from preclassic Guatemalan pottery, *Phys. Earth planet. Inter.*, 180, 1-2, 41-51

Arcelin, P., 1992. Sociétés indigènes et propositions culturelles massaliotes en basse Provence occidentale, in *Marseille grecque* et la Gaule, Collection Etudes Massaliètes, 3, 305-336

Arcelin, P. & Tuffreau-Libre, M. (dir.), 1998. *La quantification des céramiques : conditions et protocole*, Bibracte, 2, Glux-en-Glenne, 157 p.

Arrighi, S., Tanguy, J.-C. & Rosi, M., 2006. Eruptions of the last 2200 years at Vulcano and Vulcanello (Aeolian Islands, Italy) dated by high-accuracy archeomagnetism, *Phys. Earth planet. Inter.*, 159, 225-233

Augier, L., 2004. Introduction du tour lent dans les ateliers de potiers du dernier quart du VI^{e} et du V^{e} siècle av. J.-C. à Bourges (Cher), *Bulletin de l'association française pour l'étude de l'Âge du Fer*, 22, 39-40

Augier, L., Buchsenschutz, O. & Ralston, I. (dir.), 2007. *Un complexe princier de l'âge du Fer : l'habitat du promontoire de Bourges (Cher), VI^{e}-IV^{e} s. av. J.-C.* Bourges : Édition de Bourges Plus, Service d'archéologie préventive ; Tours : FERACF, 200 p.

Barbetti, M., 1979. Determination of ancient geomagnetic strengths from specimens with multi-component magnetizations, *J. Arch. Sci.*, 6, 195-199

Bard, E., 1998. Geochemical and geophysical implications of the radiocarbon calibration, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 62, 12, 2025-2038

Barral, P. & Piningre, J.-F., 2009. Le temps des cultures aux âges du Bronze et du Fer, in Richard, A., Barral, P., Daubigney, A., Kaenel, G., Mordant, C. & Piningre, J.F. (éds), *L'isthme européen Rhin-Saône-Rhône dans la Protohistoire, Approches nouvelles en hommage à Jacques-Pierre Millotte, Besançon 16-18 octobre 2006*, Besançon, Presses universitaires de Franche-Comté, 376 p. (Annales Littéraires, 860, Série »Environnement, sociétés et archéologie », 13)

Batt, C.M., 1997. The British archaeomagnetic calibration curve : an objective treatment, *Archaeometry*, 39, 153-168

Bayliss, A., 2009. Rolling out revolution : using radiocarbon dating in archaeology, *Radiocarbon*, 51(1), 123-147

Bellanger, L. & Husi, P., 2011. Statistical tool for dating and interpreting archeological contexts using pottery, *J. Arch. Sci.*, doi:10.1016/j.jas.2011.06.031, sous presse

Bellon, C., 2003. Lyon au Premier âge du fer (500-400 av. J.-C.), in Poux, M., Savay-Guerraz, H., *Lyon avant Lugdunum*, catalogue d'exposition, Musée de la civilisation gallo-romaine de Lyon, Infolio editions, 70-75

Benoit, F., 1965. *Recherches sur l'hellénisation du Midi de la Gaule*, Ophrys, Aix-en-Provence, 335 p.

Ben-Yosef, E., Ron, H., Tauxe, L., Agnon, A., Genevey, A., Levy, T.E., Avner, U. & Najjarr, M., 2008. Application of copper slag in geomagnetic archaeointensity research, *J. Geophys. Res.*, 113, B08101, doi:10.1029/2007JB005235

Ben-Yosef, E., Tauxe, L., Levy, T.E., Shaar, R., Ron, H. & Najjar, M., 2009. Geomagnetic intensity spike recorded in high resolution slag deposit in southern Jordan, *Earth planet. Sci. Lett.*, 287, 529-539

Bernard, V., 1993. *Approche dendrochronologique des ponts celtiques de Houdancourt « les Esquillons » (Oise)*, Mémoire de diplôme de l'EHESS, Toulouse, 137p.

Bertaux, J.P., 1987. La fabrication du sel à l'époque protohistorique par la technique du briquetage, in *L'âge du Fer en Lorraine*, Musée de Sarreguemines, Sarreguemines, 85-100

Biggin, A.J., 2006. First-order symmetry of weak-field partial thermoremanence in multi-domain (MD) ferromagnetic grains: 2. Implications for Thellier-type paleointensity determination, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 245, 454-470, doi:10.1016/j.epsl.2006.02.034

Biggin, A.J., 2010. Are systematic differences between thermal and microwave Thellier-types palaeointensity estimates a consequence of multidomain bias in the thermal results ?, *Phys. Earth planet. Inter.*, 280, 16-40, doi:10.1016/j.epsl.2009.09.001

Biggin, A.J., Perrin, M. & Dekkers, M.J., 2007. A reliable absolute palaeointensity determination obtained from a non-ideal recorder, *Earth planet. Sci. Lett.*, **257**, 545-563

Biggin, A.J. & Thomas, D.N., 2003. The application of acceptance criteria to results of Thellier palaeointensity experiments performed on samples with pseudo-single-domain-like characteristics, *Phys. Earth planet. Inter.*, 138, 279-287

Billamboz, A., 2004. Dendrochronology in Lake-Dwelling research, in Menotti, F. (éd.), *Living on the lake in prehistoric Europe, 150 years of Lake-Dwelling research*, London, New-York, Routledge, 117-131

Billamboz, A., 2008. Dendrochronologie et palafittes. De la mesure chronométrique à l'approche écologique : le potentiel de l'application dendroarchéologique, in *Construire le temps, Histoire et méthodes des chronologies et calendriers des derniers millénaires avant notre ère en Europe occidentale*, Lehoërff, A. (dir.), Actes du XXX° colloque international HALMA-IPEL 7-9 décembre 2006 à Lille, Bibracte, 16, Glux-en-Glenne, 197-208

Billaud, Y, Marguet, A. & Simonin, O., 1992. Chindrieux, Châtillon (lac du Bourget, Savoie) : ultime occupation des lacs alpins français à l'âge du Bronze ?, *Archéologie et environnement des milieux aquatiques : lacs, fleuves et tourbières du domaine alpin et de sa périphérie, Congrès national des Sociétés savantes, commission de Préhistoire et Protohistoire Chambéry, 1991,* éd. du CTHS, Paris, 277-310

Biquand, D., 1994. Effet de la vitesse de refroidissement sur l'intensité de l'aimantation thermorémanente: etude expérimentale, consequences théoriques, *Can. J. Earth Sci.*, 31, 1342-1352

Blackwell, P.G., Buck, C.E. & Reimer, P.J., 2006. Important features of the new radiocarbon calibration curves, *Quaternary Science Reviews*, 25, 408-413

Blain, S., 2009. *Les terres cuites architecturales des églises du haut Moyen Age dans le nord-ouest de la France et le sud-est de l'Angleterre. Application de la datation par luminescence à l'archéologie du bâti*, Thèse de doctorat de l'université de Bordeaux 3, 412 p.

Boissinot, P. & Lescure, B., 1998. Nouvelles recherches sur le « sanctuaire » de Roquepertuse à Vélaux (III^{ème} siècle av. J.-C.), *Documents d'Archéologie Méridionale*, 21, 84-89

Borello, M.-A., 1993. *Hauterive-Champréveyres, 7. La céramique du Bronze final : zones A et B*, Archéologie neuchâteloise, 14, éd. Du Ruau, Saint-Blaise

Bouetiez, E. & Prost, D., 1989. *Rapport de fouille : ZAC des Antes – Rungis (Val-de-Marne)*, Laboratoire départemental d'archéologie du Val-de-Marne

Bronk Ramsey, C., 2001. Development of the radiocarbon calibration program OxCal, *Radiocarbon*, 43, 355-363, Proceedings of 17th international 14C conference

Bronk Ramsey, C., 2005. Improving the resolution of radiocarbon dating by statistical analysis, in *The Bible and Radiocarbon dating : archaeology, text and science,* eds Levy, T.E. and Higham, T.F.G., 57-64, Equinox, London

Bronk Ramsey, C., 2006. New approaches to constructing age models : OxCal4, PAGES News, 14, 3, 14-15

Brun, P., 2008. Chronologie relative et rythmes du changement : une question de fréquences d'associations, in *Construire le temps, Histoire et méthodes des chronologies et calendriers des derniers millénaires avant notre ère en Europe occidentale*, Lehoërff, A. (dir.), Actes du XXX° colloque international HALMA-IPEL 7-9 décembre 2006 à Lille, Bibracte, 16, Glux-en-Glenne, 222-230

Brun, P. & Chaume, B., 1997. *Vix et les éphémères principautés celtiques, les VI^{ème} et V^{ème} siècles avant J.-C. en Europe centre-occidentale*, Errance, Paris, 408 p.

Brun, P. & Ruby, P., 2008. *L'âge du Fer en France, premières villes, premiers Etats celtiques*, Editions de la découverte, collection Archéologie de la France, 177 p.

Brun, P., Chaume, B. Dhennequin, L. & Quilliec, B., 2009. Le passage de l'âge du Bronze à l'âge du Fer au fil de l'épée, in *De l'âge du Bronze à l'âge du Fer en France et en Europe occidentale (Xe-VIIe s. av. J.-C.), Actes du colloque de l'AFEAF, Saint-Romain-en-Gal 26-28 mai 2006*, 477-485 (Revue archéologique de l'Est, 27e supplément)

Brunaux, J.L., 1986. *Les gaulois, sanctuaires et rites*, Errance, Paris, 154 p.

Buchsenschutz, O., Colin, A., Firmin, G., Fischer, B., Guillaumet, J.P., Krausz, S., Lévéry, M., Marinval, P., Orellana, L. & Pierret, A., 2000. *Le village des Arènes à Levroux : synthèses*, FERAC, Tours, 333 p.

Buchsenschutz, O., 2007. *Les Celtes*, Armand Colin, Paris, 278 p.

Bucur, I., 1994. The direction of the terrestrial magnetic field in France, during the last 21 centuries. Recent progress, *Phys Earth planet Int.*, 87, 95-109

Burakov, K.S., Nachasova, I.E. & Mata, C., 2006. Geomagnetic field intensity in the first millenium BC from data on ceramics of the Los Villares archaeological monument (Spain), *Fizika Zemli*, 11, 84-92 [Izvestiya Physics of the Solid Earth, 42(11), 942-950]

Carozza, L. & Marcigny, C., 2007. *L'âge du Bronze en France*, Editions de la découverte, collection Archéologie de la France, 156 p.

Carracedo, J.-C., Principe, C., Rosi, M. & Soler, V., 1993. Time correlation by palaeomagnetism of the 1631 eruption of Mount Vesuvius. Volcanological and volcanic hazard implications, *J. Volc. Geotherm. Res.*, 58, 203-209

Carvallo, C., Roberts, A.P., Leonhardt, R., Laj, C., Kissel, C. & Camps, P., 2006. Increasing the efficiency of palaeointensity analyses by selection of samples using first-order reversal curve diagrams, *J. Geophys. Res.,* 111: B12103, 1-15, doi:10.1029/2005JB004126.

Casas, Ll, & Incoronato, A., 2007. Distribution analysis of errors due to relocation of geomagnetic data using the « Conversion Via Pole » (CVP method) : implications on archaeomagnetic data, *Geophys. J. Int.*, 169, 448-454

Cassen, S., Lanos, P., Dufresne, P., Oberlin, C., Delqué-Kolic, E. & Le Goffic, M., 2009. Datations sur site (Table des Marchand, alignement du Grand Menhir, Er Grah) et modélisation chronologique du néolithique morbihannais, in Cassen, S. (dir.), *Autour de la Table, explorations archéologiques et discours savants sur une architecture restaurée à Locmariaquer, Morbihan (Table des Marchand et Grand Menhir)*, Colloque international de Vannes 2007, éd. LARA, CNRS et Université de Nantes, 737-768

Catanzariti, G., McIntosh, G., Monge Soares, A.M., Diaz-Martinez, E., Kresten, P. & Osete, M.L., 2008. Archaeomagnetic dating of a vitrified wall at the Late Bronze Age settlement of Misericordia (Serpa, Portugal), *Journal of Archaeological Science*, 35, 1399-1407

Catanzariti, G., Gomez-Paccard, M., McIntosh, G., Pavon-Carrasco, F.J., Chauvin, A. & Osete, M.L., 2012. New archaeomagnetic data recovered from the study of Roman and Visigothic remains from central Spain (3rd-7th centuries), *geophys. J. Int.*, doi:10.1111/j.1365-246X.2011.05315.x

Cavassa, L., 2009. La production de céramique commune à Pompéi, un four de potier dans l'*insula* 5 de la région I, in Pasqualini, M. (éd.) *Les céramiques communes d'Italie et de Narbonnaise, structures de production et contextes inédits (IIe siècle av. J.-C. – IIIe siècle ap. J.-C.,* Centre Jean Bérard, 30, 95-104

Chambers, F.M., Mauquoy, D., Brain, S.A., Blaauw, M. & Daniell, J.R.G., 2007. Globally synchronous climate change 2800 years ago: Proxy data from peat in South America, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 253, 439-444

Chaume, B. & Reinhardt, W., 2009. La céramique du sanctuaire hallstattien de Vix « les Herbues », in Chaume, B. (dir.), *La céramique hallstattienne, approches typologique et chrono-culturelle*, Editions universitaires de Dijon, Collection *Art, Archéologie et Histoire*, 27-50

Chaume, B. & Mordant, C., (dir.) 2011. Le complexe aristocratique de Vix – Nouvelles recherches sur l'habitat, le système de fortification et l'environnement du mont Lassois, 2 vol., 867 p.

Chausserie-Laprée, J. & Nin, N., 1987. Le village protohistorique du quartier de l'Ile à Martigues. Urbanisme et architecture de la phase primitive (Ve-IIIe siècle av. J.-C.), II. Données nouvelles sur l'urbanisme et architecture domestique, *Documents d'Archéologie Méridionale*, 10, 31-89

Chauvin, A., Garcia, Y., Lanos, P. & Laubenheimer, F., 2000. Paleointensity of the geomagnetic field recovered on archaeomagnetic data from France, *Phys Earth planet Int.*, 150, 265-286

Chauvin, A., Roperch, P. & Levi, S., 2005. Reliability of geomagnetic palaeointensity data : the effects of the NRM fraction and concave-up behaviour on palaeointensity determinations by the Thellier method, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 150, 265-286

Chiari, G. & Lanza, R., 1997. Pictorial remanent magnetization as an indicator of secular variation of the Earth's magnetic field, *Phys. Earth planet. Inter.*, 101, 79-83

Chiari, G. & Lanza, R., 1999. Remanent magnetization of mural paintings from the Bibliotheca Apostolica (Vatican, Rome), *Appl. Geophys.*, 41, 137-143

Chiosi, E., La Torre, M., Nardi, G. & Pierratini, D., 1998. Archaeomagnetic data from a kiln at Cassano (South Italy), *Science and Technology for Cultural Heritage*, 7(2), 13-17

Christensen, U.R., 2011. Geodynamo models : tools for understanding properties of Earth's magnetic field, *Phys. Earth planet. Inter.*, 187(3-4), 157-169, doi:10.1016/j.pepi.2011.03.012

Cioni, R., Gurioli, L., Lanza, R. & Zanella, E., 2004. Temperatures of the A.D. 79 pyroclastic density current deposits (Vesuvius, Italy), *J. geophys. Res.*, 109, B02207, doi:10.1029/2002JB002251

Clark, A.J., 1983. Archaeomagnetic dating at Bigberry, in Thompson, F.H. (Ed.) Excavations at Bigberry, 1978-1980, *Antiquaries Journal*, 63, 237-278

Clark, A.J., Tarling, D.H. & Noël, M., 1988. Developments in archaeomagnetic dating in Britain, *Journal of Archaeological Science*, 15, 645-667

Coe, R.S., 1967. The determination of paleointensities of the Earth's magnetic field with emphasis on mechanisms which could cause non-ideal behaviour in Thellier's method, *J. Geomag. Geoelectr.,* 19, 157-179

Coe, R.S., Gromme, S. & Mankinen, E.A., 1978. Geomagnetic palaeointensities from radiocarbon-dated lava flows on Hawaii and the question of the Pacific non-dipole low, *J. Geophys. Res.*, 83, 1740-1756

Coe, R.S., Riisager, J., Plenier, G., Leonhardt, R. & Krasa, D., 2004. Multidomain behaviour during palaeointensity experiments: results from the 1915 Mt Lassen flow, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 147, 141-153

Colbert de Beaulieu, J.B., 1973. *Traité de numismatique celtique, I :Méthodologie des ensembles*, Annales littéraires de l'université de Besançon, 135, 454 p.

Colin, A., 1998. *Chronologie des oppida de la Gaule non méditerranéenne*, Documents d'Archéologie Française, Ed. MSH, Paris, 195 p.

Collis, J., 2008. Constructing chronologies : lessons from the Iron Age, in *Construire le temps, Histoire et méthodes des chronologies et calendriers des derniers millénaires avant notre ère en Europe occidentale*, Lehoërff, A. (dir.), Actes du XXX° colloque international HALMA-IPEL 7-9 décembre 2006 à Lille, Bibracte, 16, Glux-en-Glenne, 85-104

Constable, 2011. Modelling the geomagnetic field from syntheses of paleomagnetic data, *Phys. Earth planet. Inter.*, doi:10.1016/j.pepi.2011.05.004, sous presse

Cook, R.M. & Belshé, J.C., 1958. Archaeomagnetism : a preliminary report on Britain, *Antiquity*, **32**, 167-178

Coulon, L., Dupont, F., Hervé, G., Lanos, P. & Salavert, A., 2011. Le four Néolithique à fosse d'accès des « Petits Clos » à Chartres (28) : une attribution chrono-culturelle complexe, Colloque Internéo 7 et 8 octobre 2011, Tours, communication par poster

Daire, M.Y., 2003. *Le sel des Gaulois*, Errance, Paris, 152 p.

Daly, L. & Le Goff, M., 1996. An updated and homogeneous world secular variation data base. 1. Smoothing of the archaeomagnetic results, *Phys. Earth planet. Int.*, 93, 159-190

D'Ajello Caracciolo, F., Pignatelli, A., Speranza, F. & Meloni, A., 2011. A re-evaluation of the Italian historical geomagnetic catalogue : implications for paleomagnetic dating at active Italian volcanoes, *Solid Earth*, 2, 65-74

D'Anna, A., Desbat, A., Garcia, D., Schmitt, A. & Verharghe, F., 2003. *La céramique, la poterie du Néolithique aux temps modernes*, Errance, collection « Archéologiques », Paris, 286 p.

David-Elbiali, M & Dunning, C., 2005. Le cadre chronologique relatif et absolu au nord-ouest des Alpes entre 1060 et 600 av. J.-C., in Bartoloni, G. & Delpino, F., *Oriente e Occidente: metodi e discipline a confronto. Riflessoni sulla cronologia dell'età del ferro Italiana, Atti dell'Incontro di studi, Roma, ottobre 2003.* Pisa, Roma, Istituti editoriali e poligrafici internazionali, 145-195 (Mediterranea, Quaderni annuali dell'instituto di studi sulle civiltà italiche e del mediterraneo antico,1)

David-Elbiali, M. & Moinat, P., 2005. Le Bronze final de la Suisse occidentale : révision du cadre chronotypologique, grâce aux découvertes de la nécropole de Lausanne-Vidy (canton de Vaud, Suisse), *Bulletin de la Société préhsitorique française*, 102(3), 613-623

Day, R., Fuller, M. & Schmidt,V.A., 1977. Hysteresis properties of titanomagnetites, grain size and compositional dependence, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 13, 4, 260-267

Déchelette, J., 1914. *Manuel d'archéologie préhistorique et celtique, IV : 2nd âge du Fer ou époque de la Tène*, Picard, Paris, 776 p. (reéd : 1927)

De Marco, E., Spatharas, V., Gomez-Paccard, M., Chauvin A. & Kondopoulou, D., 2008. New archaeointensity results from archaeological sites and variation of the geomagnetic field intensity for the last 7 millennia in Greece, *Phys. Chem. Earth*, 33, 578-595

Dergachev, V.A., Raspopov, O.M., van Geel, B. & Zaitseva, G.I., 2004. The Sterno-etrussia geomagnetic excursion around 2700BP and changes of solar activity, cosmic ray intensity and climate, *Radiocarbon*, 46(2), 661-681

Desachy, B., 2008. *De la formalisation du traitement des données stratigraphiques en archéologie de terrain*, Thèse de doctorat de l'université de Paris I

Dhennequin, L., Guillaumet, J.P. & Szabo, M., 2008. L'oppidum de Bibracte, Mont-Beuvray, France, bilan de 10 années de recherche (1996-2005), *Acta archaeologica academiae scientiarum hungaricae*, 59/1, 152 p.

Di Vito, M.A., Zanella, E., Gurioli, L., Lanza, R., Sulpizio, R., Bishop, J., Tema, E., Boenzi, G., Laforgia, E., 2009. The Afragola settlement near Vesuvius, Italy: the destruction and abandonment of a Bronze Age village revealed by archaeology, volcanology and rock-magnetism, *Earth planet. Sci. Lett.*, 277, 408-421

Dodson, M.H. & McClelland-Brown, E., 1980. Magnetic blocking temperatures of single-domain grains during slow-cooling, *J. Geophys. Res.*, 85, 2625-2637

Donadini, F., Korte, M. & Constable, C.G., 2009. Geomagnetic field for 0-3 ka : 1. New data sets for global modeling, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 10(6), Q06007, doi:10.1029/2008GC002295

Donadini, F., Kovacheva, M. & Kostadinova-Avramova, M., 2010. Archaeomagntic study of Roman lime kilns (1st C. AD) and one pottery kiln (1st C. BC – 1st C. AD) at Krivina, Bulgaria, as a contribution to archaeomagnetic dating, *Archaeologia Bulgarica*, XIV, 2, 23-38

Draeger, U., Prévôt, M., Poidras, T. & Riisager, J., 2006. Single-domain chemical, thermochemical and thermal remanences in a basaltic rock, *Geophys. J. Int.*, 166, 12-32

Duhamel, P., 1979. Morphologie et évolution des fours céramiques en Europe occidentale – protohistoire, monde celtique et Gaule romaine, *Acta Praehistorica et Archaeologica*, 9/10, 49-76

Dumberry, M. & Finlay, C.C., 2007. Esatward and westward drift of the Earth's magnetic field for the last three mellennia, *Earth planet. Sci. Lett.*, 254, 146-157

Dunlop, D., 2002. Theory and application of the Day plot (Mrs/Ms versus Hcr/Hc), 2, Application to data for rocks, sediments and soils, *J. Geophys. Res,* 107(B3), EPM 5 - 1-15.

Dunlop, D.J., 2011. Physical basis of the Thellier-Thellier and Related Paleointensity Methods, *Phys. Earth planet. Inter.*, 187(3-4), 118-138

Dunlop, D.J., Zhang, B. & Özdemir, Ö., 2005. Linear and nonlinear Thellier palaeointensity behaviour of natural minerals, *J. Geophys. Res.,* 110(B01103): doi:10.1029/2004JB003095.

Durost, S. & Lambert, G.N., 2007. Révision dendrochronologique du Nord de la France à l'âge du Fer et au début de l'époque romaine, in Barral, P., Daubigney, A., Dunning, C., Kaenel, G., Rouilière-Lambert, M.J. (dir.), *L'âge du Fer dans l'arc jurassien et ses marges. Dépôts sacrés et territorialité à l'âge du Fer,* Actes du XXIX° colloque international de l'AFEAF, Bienne 5-8 mai 2005, Presses universitaires de Franche-Comté, Besançon, vol. 1, 19-36

Duval, A., Morel, J.P. & Roman, Y. (dir.), 1990. *Gaule interne et Gaule méditerranéenne aux II^e^ et I^er^ siècles avant J.-C. : confrontations chronologiques*, Actes de la table-ronde de Valbonne (11-13 novembre 1986), Revue Archéologique de Narbonnaise, suppl. 21, 349 p.

Evans, M.E., 1986. Palaeointensity estimates from Italian kilns, *J. Geomagn. Geoelectr.,* 38, 1259-1267

Evans, M.E., 2006. Archaeomagnetic investigations in Greece and their bearing on geomagnetic secular variation, *Phys. Earth planet. Int.*, 159, 90-95

Evans, M.E. & Mareschal, M., 1989. Secular variation and magnetic dating of fired structures in southern Italy, in Maniatis, Y. (éd.) Proceedings of the 25th International Symposium on Archaeometry, Elsevier, Elsevier, 59-68

Evans, M.E. & Hoye, G.S., 2005. Archaeomagnetic results from southern Italy and their bearing on geomagnetic secular variation, *Phys. Earth planet. Int.*, 151, 155-162

Evin, J., 2008. L'impact des premières datations ^{14}C sur l'archéologie française avant la calibration, in *Construire le temps, Histoire et méthodes des chronologies et calendriers des derniers millénaires avant notre ère en Europe occidentale*, Lehoërff, A. (dir.), Actes du XXX° colloque international HALMA-IPEL 7-9 décembre 2006 à Lille, Bibracte, 16, Glux-en-Glenne, 105-112

Fabian, K., 2001. A theoretical treatment of palaeointensity determination experiments on rocks containing pseudo-single or multi domain magnetic particles, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 168, 45-58

Fabian, K., 2009. Thermochemical remanence acquisition in single-domain particle ensembles: a case for possible overestimation of the geomagnetic palaeointensity, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 10, Q06Z03, doi:10.1029/2009GC002420

Ferk, A., v. Aulock, F.W., Leonhardt, R., Hess, K.-U. & Dingwell, D.B., 2010. A cooling rate bias in paleointensity determination from volcanic glass: an experimental demonstration, *J. Geophys. Res.*, **115**, B08102, doi:10.1029/2009JB006964

Fichtl, S., 2005. *La ville celtique : les oppida de 150 av. J.-C. à 15 ap. J.-C.*, 2° édition, Errance, Paris, 238 p.

Fichtl, S., 2006. L'émergence des *civitates* en Gaule et dans le monde celtique, in Haselgrove, C. (dir.), *Celtes et Gaulois, l'Archéologie face à l'Histoire, les mutations de la fin de l'âge du Fer*, Actes de la table ronde de Cambridge 7-8 juillet 2005, Bibracte, Glux-en-Glenne, 12/4, 41-54

Fillières, D., 1978. *Contribution à l'étude de la production et de l'exportation des amphores dites marseillaises et des céramiques grecques d'occident du Midi de la France au moyen d'analyses par activation neutronique avec traitement taxinomique des résultats*, Thèse de doctorat de l'université de Paris I

Finlay, C.C., 2008. Historical variation of the geomagnetic axial dipole, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 170, 1-14, doi:10.1016/j.pepi.2008.06.029

Finlay, C.C., Maus, S., Beggan, C.D., Hamoudi, M., Lowes, F.J., Olsen, N. & Thébault, E., 2010. Evaluation of candidate geomagnetic field models for IGRF-11, *Earth Planets Space*, 62(10), 787-804

Fisher, R.A., 1953. Dispersion on a sphere, *Proc. R. Soc. Lond.*, A-127, 295-305

Folgerhaiter, G., 1899. Sur les variations séculaires de l'inclinaison magnétique dans l'antiquité, *J. Phys.*, 8, 660-667

Fox, J.M.W. & Aitken, M.J., 1980. Cooling rate dependance of the thermoremanent magnetization, *Nature*, 283, 462-463

Friedrich, M. & Hennig, H., 1996. A dendrodate for the Wehringen Iron Age wagon grave (785±5BC) in relation to other recently obtained absolute dates for the Hallstatt period in southern Germany, *Journal of European Archaeology*, 4, 281-303

Friedrich, M., Remmele, S., Kromer, B., Hofmann, J., Spurk, M., Kaiser, K.F., Orcel, C. & Küppers, M., 2004. The 12,460-year Hohenheim oak and pine tree-ring chronology from Central Europe – a unique annual record for radiocarbon calibration and paleoenvironment reconstructions, *Radiocarbon*, 46, 3, 1111-1122

Furger-Gunti, A., 1979. Die Ausgrabungen im Basler Münster I. Die spätkeltische und augusteichezeit (1. Jahrhundert vor Chr.), *Basler Beitrage zur Ur- und Frühgeschichte*, 6, 313 p.

Gailledrat, E., 2008. Faciès commerciaux et usages de la céramique à Lattes durant la Protohistoire, *Gallia*, 65, 151-168

Gallet, Y. & Le Goff, M., 2006. High-temperature archeointensity measurements from Mesopotamia, *Earth planet. Sci. Lett.*, 241, 159-173

Gallet, Y., Genevey, A. & Le Goff, M., 2002. Three millenia of directional variation of the Earth's magnetic field in western Europe as revealed by archeological artefacts, *Phys Earth planet Int.*, 131, 81-89

Gallet, Y., Genevey, A., Courtillot, V., 2003. On the possible occurrence of « archaeomagnetic jerks » in the geomagnetic field over the past three millennia, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 214, 237-242

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

Gallet, Y., Genevey, A., Le Goff, M., Warmé, N. & Gran-Aymerich, J., Lefèvre, A., 2009a. On the use of archaeology in geomagnetism and vice-versa : recent developments in archeomagnetism, *C.R. Physique*, 10, 630-648

Gallet, Y., Hulot, G., Chulliat, A. & Genevey, A., 2009b. Geomagnetic field hemispheric asymmetry and archeomagnetic jerks, *Earth planet. Sci. Lett.*, 284, 279-286

Garcia, D., 2004. *La Celtique méditerranéenne, Habitats et sociétés en Languedoc et en Provence VIII-II° siècles av. J.-C.*, Errance, Paris, 206 p.

Garcia, Y., 1996. *Variation de l'intensité du champ magnétique en France durant les deux derniers millénaires*, Thèse de doctorat, Mémoires de Géosciences Rennes, 74, 354 p.

Gardette, G., Moutmir, A. & Surmely, F., 1996. Contribution de l'archéomagnétisme à l'étude du gismeent du Bronze final 3b de Lignat (Saint-Georges-ès-Allier, Puy-de-Dôme), *RACF*, 35, 97-111

Garrow, D., Gosden, C., Hill, J.D. & Bronk Ramsey, C., 2009. Dating celtic art : a major radiocarbon dating programme of Iron Age and Early Roman metalwork in Britain, *Archaeological Journal*, 166, 79-123

Gee, J.S., Yu, Y. & Bowles, J., 2010. Palaeointensity estimates from ignimbrites : an evaluation of the Bishop Tuff, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 11, Q03010, doi:10.1029/2009GC002834

Genevey, A. & Gallet, Y., 2002. Intensity of the geomagnetic field in western Europe over the past 2000 years : new data from ancient French pottery, *Phys. Earth. planet. Int.*, 131, 81-89

Genevey, A., Gallet, Y. & Boudon, G., 2002. Secular variation study from non-welded pyroclastic deposits from Montagne Pelée volcano, Martinique (West Indies), *Earth planet. Sci. Lett.*, 201, 369-382

Genevey, A., Gallet, Y. & Margueron, J.-C., 2003. Eight thousand years of geomagnetic field intensity variations in the eastern Mediterranean, *J. Geophys. Res.*, 108(B5), 2228, doi:10.1029/2001JB001612

Genevey, A., Gallet, Y., Constable, C.G., Korte, M. & Hulot, G., 2008. Archeoint : An upgraded compilation of geomagnetic field intensity data for the past ten millennia and its application to the recovery of the past dipole moment,*Geochem. Geophys. Geosyst.*, 9, Q04038, doi:10.1029/2007GC001881

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

Gentles, D., 1989. Archaeomagnetic directional studies of large fired structures in Britain, Ph.D. thesis, Plymouth Polytechnic

Goguitchaichvili, A., Greco, C. & Morales, J., 2011. Geomagnetic field intensity behavior in South America between 400AD and 1800AD: first archeointensity results from Argentina, *Phys. Earth planet. Inter.*, **186**, 3-4, 191-197

Gomez-Paccard, M., Chauvin, A., Lanos, P., McIntosh, G., Osete, M.L., Catanzariti, G., Ruiz-Martinez, V.C. & Nunez, J.I., 2006a. First archaeomagnetic secular variation curve for the Iberian Peninsula : Comparison with other data from western Europe and with global geomagnetic field models, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 7(12), Q12001, doi:10.1029/2006GC001476

Gomez-Paccard, M., Catanzariti, G., Ruiz-Martinez, V.C., McIntosh, G., Nunez, J.I., Osete, M.L., Chauvin, A., Lanos, P., Tarling, D.H., Bernal-Casasola, D., Thiriot, J. & « Archaeological working group », 2006b. A catalogue of Spanish archaeomagnetic data, *Geophys. J. Int*, 166, 1125-1143

Gomez-Paccard, M., Chauvin, A., Lanos, P., Thiriot, J. & Jimenez-Castillo, P., 2006c. Archeomagnetic study of seven contemporaneous kilns from Murcia (Spain), *Phys. Earth planet. Int.*, 157, 16-32

Gomez-Paccard, M., Chauvin, A., Lanos, P. & Thiriot, J., 2008. New archaeointensity data from Spain and the geomagnetic dipole moment in western Europe over the past 2000 years, *J. Geophys. Res.*, 113, B09103, doi:10.1029/2008JB005582

Gomez-Paccard, M., McIntosh, G., Chauvin, A., Beamud, E., Pavon-Carrasco, & F.J., Thiriot, J., 2012a. Archaeomagnetic and rock magnetic study of six kilns from NorthAfrica (Tunisia and Morocco), *Geophys. J. Int.*, doi :10.1111/j.1365-246X.2011.05335.x

Gomez-Paccard, M., Chauvin, A., Lanos, P., Dufresne, P., Kovacheva, M., Hill, M.J., Beamud, E., Blain, S., Bouvier, A., Guibert, P. and Archaeological Working Team, 2011b. Improving our knowledge of the rapid geomagnetic intensity variation observed in Europe around 800 AD: new archaeointensity data from Western Europe, submitted to *Earth Planet. Sci. Lett.*

Goudineau, C., 1990. *César et la Gaule*, Errance, Paris, 389 p.

Goudineau, C., 1998a. Marseille et la Gaule, in *Regard sur la Gaule*, Errance, Paris, 83-96

Goudineau, C., 1998b. Les Gaulois ont-ils représenté leurs dieux ? De Glauberg à Roquepertuse., in *A la rencontre des dieux gaulois, un défi à César*, Musée archéologique Henri Prades/Musée des Antiquités Nationales, Lattes/Saint-Germain-en-Laye, 20-24

Gram-Jensen, M., Abrahamsen, N. & Chauvin, A., 2000. Archaeomagnetic intensity in Denmark, *Phys. Chem. Earth*, 25(5), 525-531, doi:10.1016/S1464-1895(00)00081-8

Green, P.J. & Silvermann, B.W., 1994. *Nonparametric regression and generalized linear models, a roughness penalty approach*, Chapman & Hall, London, 182 p.

Gruel, K. & Haselgrove, C., 2006. Le développement de l'usage monétaire à l'âge du Fer en Gaule et dans les régions voisines, in Haselgrove, C. (dir.), *Celtes et Gaulois, l'archéologie face à l'Histoire : Les mutations de la fin de l'âge du Fer*, Actes de la table ronde de Cambridge 7-8 juillet 2005, Bibracte, 12/4, 117-138

Gruel, K. & Popovitch, L., 2007. *Les monnaies gauloises et romaines de l'oppidum de Bibracte*, Bibracte, 13, Glux-en-Glenne, 384 p.

Gubbins, D. & Bloxham, J., 1987. Morphology of the geomagnetic field and implications for the geodynamo, *Nature*, 325, 509-511

Gubbins, D., Jones, A.L. & Finlay, C.C., 2006. Fall in Earth's Magnetic Field is erratic, *Science*, 312, 900-902

Gubbins, D., Willis, A.P. & Streenivasan, B., 2007. Correlation of Earth's magnetic field with lower mantle thermal and seismic structure, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **162**, 256-260

Guibal, F., 1998. Dendrochronologie des épaves de navires antiques de Méditerranée, *Archaeonautica*, 14, 303-308

Guibal, F. & Pomey, P., 2004. Dendrochronologie et construction navale antique, *Revue d'archéométrie*, 28, 35-42

Guichard, V., Pion, P., Malacher, F. & Collis, J., 1993. A propos de la circulation monétaire en Gaule chevelue aux II^{ème} et I^{er} siècles avant J.-C., *Revue Archéologique du Centre de la France*, 32, 25-51

Guillaumet, J.-P. & Dhennequin, L., 2008. Les ateliers du métal et leur production, in Dhennequin, L., Guillaumet, J.P., Szabo, M. (dir.), L'oppidum de Bibracte (Mont-Beuvray, France). Bilan de 10 années de recherche (1996-2005), *Acta archaeologica Academiae Scientiarum Hungaricae*, 59, 68-77

Haegel, B., 1986. Marlenheim Im Gewinkel, *Gallia Préhistoire*, 29, 2, 218-219

Haffner, A., 1974. Zum Ende der Latènezeit in Mittelrheingebiet unter besonderer Berücksichtigung der Trierer Landes, *Archäologisches Korrespondenzblatt*, 4, 59-72

Haffner, A., 1979. Zur absoluten Chronologie der Mittellatènezeit, *Archäologisches Korrespondenzblatt*, 9, 405-409

Hagstrum, J.T. & Blinman, E., 2010. Archaeomagnetic dating in western North America: an updated reference curve based on paleo- and archaeomagnetic data sets, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 11, Q06009, doi:10.1029/2009GC002979

Hajdas, I., 2008. Radiocarbon dating and its applications in Quaternary studies / Die Radiokohlenstoffmethode und ihre Anwendung in der Quartärforschung, *Quaternary Science Journal (Eiszeitalter und Gegenwart)*, 57(1-2), 2-24.

Halgedahl, S.L., Day, R. & Fuller, M., 1980. The effect of cooling-rate on the intensity of weak-field TRM in single-domain magnetite, *J. Geophys. Res.*, 85, 3690-3698

Hammo-Yassi, N., 1983. Archaeomagnetic work in Britain and Iraq, Ph.D. thesis, Newcastle upon Tyne

Harris, E.C., 1989. *Principles of archaeological stratigraphy*, Academic Press, London, 170 p.

Hartmann, G.A., Genevey, A., Gallet, Y., Trindade, R.I.F., Le Goff, M., Najjar, R., Etchevarne, C. & Afonso, M.C., 2011. New historical archeointensity data from Brazil : evidence for a large regional non-dipole field contribution over the past few centuries, *Earth planet. Sci. Lett.,* doi :10.1016/j.epsl.2011.03.030

Hatt, J.J., 1961. Chronique de Protohistoire V. Une nouvelle chronologie de l'âge du Bronze final. Exposé critique du système chronologique de H. Müller-Karpe, *Bulletin de la Société Préhistorique Française*, 58, 3-4, 184-195

Hatt, J.J. & Roualet, P., 1977. La chronologie de la Tène en Champagne, *Revue Archéologique de l'Est*, XXVIII, 1-2, 7-36

Hedley, I. & Wagner, G.C., 1991. A magnetic investigation of roman and pre-roman pottery, in *Archaeometry'90*, pp. 275-284, eds Pernicka, E. & Wagner, G.C., Birkhauser Verlag, Basel

Hennig, H., 1995. Zur Frage des Datierung des Grabhügels 8 « Hexenbergle » von Wehringen, Landkreis Augsburg, Bayerisch-Schwaben, in Schmid-Sikimic, B. & Della Casa, P. (eds.), *Trans Europam : Beiträge zur Bronze- und Eisenzeit zwischen Atlantik und Altai, Festschrift für Margarita Primas*, Antiquitas, 3, Abhandlungen zur Vor- und Frühgeschichte : zur klassischen und provinzial-römischen Archäologie und zur Geschichte des Altertums, 34, Rudolf Habelt, Bonn, 129-145

Hervé, G., Schnepp, L., Chauvin, A., Lanos, P. & Nowaczyk, N., 2011. Archaeomagnetic results on three Early Iron Age salt-Kilns from Moyenvic (France), *Geophys. J. Int.*, 185, 144-156

Hildebrand, H., 1872. Studier i jämförande fornfoskning. Bidrag till spännets historia, *Antiqvarisk Tidskrift for Sverige*, 4, 1-263

Hill, M.J., Lanos, P., Chauvin, A., Vitali, D. & Laubenheimer, F., 2007. An archaeomagnetic investigation of a Roman amphorae workshop in Albinia (Italy), *Geophys. J. Int.*, 169, 471-482

Hill, M.J., Lanos, P., Denti, M. & Dufresne, P., 2008. Archaeomagnetic investigation of bricks from the VIII century BC Greek-indigenous site of Incoronata (Metaponto, Italy), *Phys. Chem. Earth,* 33, 6-7, 523-533

Hodson, F.R., 1968. The La Tène cemetery at Münsingen-Rain. Catalog and relative chronology, *Acta Bernensia*, 5, 72 p.

Hollstein, E., 1980. *Mitteleuropäische Eichenchronologie. Trierer dendrochronologische Forschungen zur Archäologie und Kunstgeschichte*, Phillipp von Zabern, Mainz

Hongre, L., Hulot, G. & Khokhlov, A., 1998. An analysis of the geomagentic field over the past 2000 years, *Phys. Earth planet. Inter.*, 106, 311-335

Hulot, G. & Le Mouël, J.-L., 1994. A statistical approach to Earth's main magnetic field, *Phys. Earth planet. Inter.*, 82, 167-183

Hulot, G., Sabaka, T.J. & Olsen, N., 2009. The Present Field, in Kono, M., *Geomagnetism, Treatise on Geophysics, vol. 5*, Elsevier, Amsterdam, 33-76

Incoronato, A., Angelino, A., Romano, R., Ferrante, A., Sauna, R., Vanacore, G. & Vecchione, C., 2002. Retrieving geomagnetic secular variations from lava flows: evidence from Mount Arso, Etna and Vesuvius (southern Italy), *Geophys. J. Int.*, 149, 724-730

Jackson, A., Jonkers, A. & Walker, M., 2000. Four centuries of geomagnetic secular variation from historical recods, *Philos. Trans. R. Soc. Lond. Ser. A*, 358, 957-990

Jackson, A. & Finlay, C.C., 2007. Geomagnetic secular variation and its applications to the core, *Treatise on Geophysics*, vol. 5, Geomagnetism, edited by M. Kono, chap. 5, Elsevier, New York

Jane-Clelland, S.J. & Batt, C., 2010. Using the British archaeomagnetic database to determine palaeosecular variation 2-3ka ago, *Geophys. Res. Abstr.*, 12, EGU2010-559

Jonkers, A.R.T., Jackson, A. & Murray, A., 2003. Four centuries of geomagnetic data from historical records, *Rev. Geophys.*, 41, 2, 1006, doi:10.1029/2002RG000115

Jupp, P.E. & Kent, J.T., 1987. Fitting smooth paths to spherical data, *Applied Statist.*, 36(1), 34-46

Kaenel, G., 1990. La dendrochronologie appliquée aux IIème et Ier siècles av. J.-C., in Duval, A., Morel, J.P., Roman, Y. (dir.), 1990. *Gaule interne et Gaule méditerranéenne aux IIe et Ier siècles avant J.-C. : confrontations chronologiques*, Actes de la table-ronde de Valbonne (11-13 novembre 1986), Revue Archéologique de Narbonnaise, suppl. 21, 321-326

Kaenel, G., 2006. Agglomérations et *oppida* de la fin de l'âge du Fer, une vision synthétique, in Haselgrove, C. (dir.), *Celtes et Gaulois, l'Archéologie face à l'Histoire, les mutations de la fin de l'âge du Fer*, Actes de la table ronde de Cambridge 7-8 juillet 2005, Bibracte, Glux-en-Glenne, 12/4, 17-39

Kaenel, G., 2008. Entre histoire et typologies : les chronologies de la période de La Tène, in *Construire le temps, Histoire et méthodes des chronologies et calendriers des derniers millénaires avant notre ère en Europe occidentale*, Lehoërff, A. (dir.), Actes du XXX° colloque international HALMA-IPEL 7-9 décembre 2006 à Lille, Bibracte, 16, Glux-en-Glenne, 325-342

Kent, D.V., Ninkovich, D., Pescatore, T & Sparks, S.R.J., 1981. Palaeomagnetic determination of emplacement temperature of Vesuvius AD 79 pyroclastic deposits, *Nature*, 290, 393-396

Kimmig, W., 1951-1954. Où en est l'étude de la civilisation des Champs-d'Urnes en France, principalment dans l'Est ?, *Revue Archéologique de l'Est et du Centre-Est,* 2, 2, 1951, 65-81 ; 3, 1, 1952, 7-19 ; 3, 3, 1952, 137-172 ; 5, 1, 1954, 7-28 ; 5, 1, 1954, 209-232

Kimmig, W., 1983. Die Heuneburg an der oberen Donau, Fuhrer zu archaologischen Denkmalern in Baden-Wurttemberg1., Konrad Theiss Verlag, Stuttgart

Kirschvink, J.L., 1980. The least-squares line and plane and the analysis of palaeomagnetic data, *Geophys. J. R. astr. Soc.*, 62, 699-718.

Kono, M. & Roberts, P.H., 2002. Recent geodynamo simulations and observations of the geomagnetic field, *Reviews of Geophysics*, 40, doi:10.1029/2000RG00102

Korte, M. & Constable, C.J., 2005a. Continuous geomagnetic field models for the past 7 millennia : 2. CALS7K, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 6, Q02H16, doi:10.1029/2004GC000801

Korte, M. & Constable, C.G., 2005b. The geomagnetic dipole moment over the last 7000 years. New results from a global model, *Earth. Planet. Sci. Lett.*, 236, 348-358

Korte, M. & Constable, C.G., 2011. Improving geomagnetic field reconstructions for 0-3ka, *Phys. Earth planet. Inter.*, doi: 10.1016/j.pepi.2011.06.017, 188(3-4), 247-259

Korte, M. & Holme, R., 2010. On the persistence of geomagnetic flux lobes in global Holocene field models, *Phys. Earth planet. Inter.*, 182, 179-186

Korte, M., Donadini, F. & Constable, C.G., 2009a. Geomagnetic field for 0-3 ka :2. A new series of time-varying global models, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 10(6), Q06008, doi:10.1029/2008GC002297

Korte, M., Mandea, M. & Matzka, J., 2009b. A historical declination curve for Munich from different data sources, *Phys. Earth planet. Inter.*, 177(3-4), 161-172

Kostadinova, M., Jordanova, N., Jordanova, D. & Kovacheva, M., 2004. Preliminary study on the effect of water glass impregnation on the rock-magnetic properties of baked clay, *Stud. Geophys. Geod.*, 48, 637-646

Kostadinova, M. & Kovacheva, M., 2008. Case study of the Bulgarian Neolithic archaeological site of Piperkov Chiflik and its archaeomagnetic dating, *Phys. Chem. Earth*, 33, 511-522

Kovacheva, M. & Toshkov, A., 1994. Geomagnetic field variations as determined from Bulgarian archaeomagnetic data. Part I: the last 2000 years AD, *Surv. Geophys.*, 15, 673-701

Kovacheva, M., Spatharas, V, & Liritzis, I., 2000. New archaeointensity results from Greek materials, *Archaeometry*, 42, 415-429

Kovacheva, M., Hedley, I., Jordanova, N., Kostadinova, M. & Gigov, V., 2004. Archaeomagnetic dating of archaeological sites from Switzerland and Bulgaria, *Journal of Archaeological Science,* 31, 1463-1479

Kovacheva, M., Boyadziev, Y., Kostadinova-Avramova, M. & Jordanova, N., 2009a. Updated archeomagnetic data set of the past eight millenia from the Sofia laboratory, Bulgaria, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, doi:10.1029/2008GC002347

Kovacheva, M., Chauvin, A., Jordanova, N., Lanos, P. & Karloukovski, V., 2009b. Remanence anisotropy effect on the palaeointensity results obtained from various archaeological materials, excluding pottery, *Earth Planets Space,* 61, 711-732

Krämer, W., 1962. Manching II : Zu den Ausgrabungen in den Jahren 1957-1961, *Germania*, 40, 239-317

Kurz, S., 2006. Relative und absolute Chronologie der Heuneburg, in *Frühe Zentralisierungs- und Urbanisierungsprozesse nördlich der Alpen*, Kolloquien und Arbeitsberichte des DFG SPP 1171 : Kolloquium Bad Dürkheim April 2005 : Chronologische Eckdaten zu den Zentralisierungs- und Urbanisierungsprozessen wärhend der Späthallstatt- und Frühlatènezeit, http://w210.ub.uni-tuebingen.de/dbt/volltexte/2006/2399/

Laffitte, J.D., 2002. Le briquetage de la Seille à Moyenvic (Moselle, France) au lieu-dit Les Crôleurs, *in* O. Weller (ed.), *Archéologie du sel, Techniques et sociétés dans la Pré et Protohistoire européenne,* Actes du XIV^{e} Congrès UISPP de Liège, Verlag Marie Leidorf, Rahden/Westfalen, 197-207

Laj, C., Kissel, C., Scao, V., Beer, J., Thomas, D.M., Guillou, H., Muscheler, R. & Wagner, G., 2002. Geomagnetic intensity and inclination variations at Hawaii for the past 98 kyr from core SOH-4 (Big Island): a new study and a comparison with existing contemporary data, *Phys. Earth planet. Inter.*, 129, 205-243

Lambert, G.N., 2008. A century of dendrochronology and archaeology quiet activities, in *Construire le temps, Histoire et méthodes des chronologies et calendriers des derniers millénaires avant notre ère en Europe occidentale*, Lehoërff, A. (dir.), Actes du XXX° colloque international HALMA-IPEL 7-9 décembre 2006 à Lille, Bibracte, 16, Glux-en-Glenne, 113-122

Lambot, B. & Méniel, P., 1992. Le site protohistorique d'Acy-Romance (Ardennes). I. l'habitat gaulois (1988-1990), *Mémoire de la Société Archéologique Champenoise*, 7, supplément au bulletin n°2, 181 p.

Lanos, P., 1994. Pratiques artisanales des briquetiers et archéomagnétisme des matériaux d'argile cuite. Une histoire de positions de cuisson, *Histoire & Mesure*, 9(3-4), 287-304

Lanos, P., 2004. Bayesian inference of calibration curves, application to archaeomagnetism, *in* Buck, C.E., and Millard, A.R., *Tools for constructing chronologies, crossing discplinary boundaries*, Lecture notes in statistics, Springer, London, 177, 43-82

Lanos, P., 2009. *Archéomagnétisme et modélisation chronologique : recherches méthodologiques et implications archéologiques*, Thèse d'Habilitation à Diriger des Recherches, Université Bordeaux 3, 231 p.

Lanos, P. & Dufresne, P., 2012. Analyse des données chronologiques par modélisation statistique bayésienne : le logiciel RenDateModel, in *Archéologie en mouvement*, Actes du Colloque INSHS, 23-25 juin 2010, Editions du CNRS, Paris, sous presse

Lanos, P., Le Goff, M., Kovacheva, M. & Schnepp, E., 2005. Hierarchical modelling of archaeomagnetic data and curve estimation by moving average technique, *Geophys. J. Int.*, 160, 440-476

Lanza, R. & Zanella, E., 2003. Palaeomagnetic secular variation at Vulcano (Aeolian Islands) during the last 135 kyr, *Earth planet. Sci. Lett.*, 213, 321-336

Lanza, R., Meloni, A. & Tema, E., 2005. Historical measurements of the Earth's magnetic field compared with remanence directions from lava flows in Italy over the last four centuries, *Phys. Earth planet. Inter.*, 148, 97-107

La Torre, M., Livadie Arbore, C., Nardi, G. & Pierratini, D., 1998. Archaeomagnetic study of the Late Archaic furnace of Treglia (Campania, Southern Italy), *Sci. Tech. Cultural Heritage*, 7(2), 7-12

Laubenheimer, F., 1990. *Sallèles-d'Aude, un complexe de potiers gallo-romains: le quartier artisanal*, D.A.F., 26, éd. MSH, Paris, 157 p.

Lebeaupin, D. & Séjalon, P., 2008. *Lattara* et l'Etrurie, nouvelles données sur l'installation d'un comptoir vers 500 av. J.-C., *Gallia*, *Dossier Lattara/Lattes (Hérault), nouvelles données, nouveaux acquis sur une ville portuaire protohistorique et romaine,* 65, 45-64

Le Goff, M., 1990. Lissage et limites d'incertitude des courbes de migration polaire : pondération des données et extension bivariante de la statistique de Fisher, *C. R. Acad. Sci.*, Sér II, 311, 1191-1198

Le Goff, M., Henry, B. & Daly, L., 1992. Practical method for drawing a VGP path, *Phys Earth planet Int.*, 70, 201-204

Le Goff, M. & Gallet, Y., 2004. A new three-axis vibrating sample magnetometer for continuous high-temperature magnetization measurements: applications to paleo- and archeo-intensity determinations, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 229, 31-43

Le Goff, M., Gallet, Y., Genevey, A. & Warmé, N., 2002. On archeomagnetic secular variation curves and archeomagnetic dating, *Phys. Earth planet. Inter.*, 134, 203-211

Lengyel, S., 2010. The pre-AD 545 extension of the U.S. Southwest archaeomagnetic reference curve, *J. Archaeo. Sci.*, 37(12), 3081-3090

Leonhardt, R., Matzka, J., Nichols, A.R.L. & Dingwell, D.B., 2006. Cooling rate correction of paleointensity for volcanic glasses by relaxation speedometry, *Earth Planet. Sci. Lett.,* 243, 282-292

Levi, S., 1977. The effect of magnetite particle size on palaeointensity determinations of the geomagnetic field, *Phys. Earth planet. Int.*, 13, 245-259

Lhuillier, F., Fournier, A., Hulot, G. & Aubert, J., 2011. The geomagnetic secular-variation timescale in observations and numerical dynamo models, *Geophys. Res. Lett.*, 38, L09306, doi:10.1029/2011GL047356

Lifton, N., Smart, D.F. & Shea, M.A., 2008. Scaling time-integrated in situ cosmogenic nuclide production rates using a continuous geomagnetic model, *Earth. Planet. Sci. Lett.*, 268, 190-201

Lodge, A., Holme, R., 2009. Towards a new approach to archaeomagnetic dating in Europe using geomagnetic field modelling, *Archaeometry*, 51(2), 309-322

Lorho, T., Blancquaert, G. & Malrain, F., 2007. Un inventaire national des sites ruraux du Hallstatt D3 au gallo-romain précoce, *Bulletin de l'association française pour l'étude de l'Âge du Fer*, 25, 41-47

Love, J.J. & Constable, C.G., 2003. Gaussian statistics for paleomagnetic vectors, *Geophys. J. Int*, 152, 515-565

Malin, S.R.C. & Bullard, E., 1981. The direction of the Earth's magnetic field at London 1570-1975, *Philos. Trans. R. Soc. London*, 299, 357-422

Mankinen, E.A. & Champion, D.E., 1993. Broad trends in geomagnetic paleointensity on Hawaii during Holocene time, *J. Geophys. Res.*, 98, 7959-7976

Marichal, R. & Rébé, I., 2003. *Les origines de Ruscino (Château-Roussillon, Perpignan, Pyrénées-Orientales) du Néolithique au premier âge du Fer,* Monographies d'archéologie méditerranéenne, 16, Lattes, 300 p.

Marolle, C., 1986. Mairy : les Hautes Charvières, *Gallia Préhistoire*, 29, 2, 321-323

Marton, P., 2009. Prehistorical archaeomagnetic directions from Hungary in comparison with those south-eastern Europe, *Earth Planets Space*, 61, 1351-1356

Marton, P., 2010. Two thousand years of geomagnetic field direction over central Europe revealed by indirect measurements, *Geophys. J. Int.*, 181, 261-268

Marton, P. & Ferencz, E., 2006. Hierarchical versus stratification statistical analysis of archaeomagnetic directions : the secular variation curve for Hungary, *Geophys. J. Int.*, 164, 484-489

Marton, P., Abdeldayem, D., Tarling, D.H., Nardi, G. & Pierratini, D., 1992. Archaeomagnetic study of two kilns at Segesta, Sicily, *Sci. Tech. Cultural Heritage*, 1, 123-127

Masse, A. & Toron, S., 2008. Construire le temps de l'âge du Bronze à l'âge du Fer, entre Seine et Meuse, in *Construire le temps, Histoire et méthodes des chronologies et calendriers des derniers millénaires avant notre ère en Europe occidentale*, Lehoërff, A. (dir.), Actes du XXX° colloque international HALMA-IPEL 7-9 décembre 2006 à Lille, Bibracte, 16, Glux-en-Glenne, 179-188

Masse, A., (dir.), Tachet, N., Chombart, J., Delage, M. & Meurisse-Fort, M., 2011. *Gouy-Saint-André « le Rossignol », Rapport final d'opération de fouille archéologique*, Dainville, Centre départemental d'archéologie, Pas-de-Calais, 232 p.

Mauné, S., (dir.) 1998. *Recherches récentes sur les établissements ruraux protohistoriques en Gaule méridionale (IX^{e}-III^{e} s. av. J.-C.)*, éd. Monique Mergoil, Montagnac, 175 p.

Maus, S., Lühr, H., Rother, M. *et al.*, 2007. Fifth generation lithospheric magnetic field model from CHAMP satellite measurements, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 8, Q05013, doi:10.1029/2006GC001521

McClelland-Brown, E., 1984. Experiments on TRM intensity dependence on cooling-rate, *Geophys. Res. Lett.*, 11, 205-208

McFadden, P.L., 1982. Rejection of palaeomagnetic observations, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 61, 392-395

McFadden, P.L. & Lowes, F.J., 1981. The discrimination of mean directions drawn from Fisher distributions, *Geophys. J.,* 67, 19-33

McFadden, P.L. & McElhinny, M.W., 1988. The combined analysis of remagnetization circles and direct observations in paleomagnetism, *Earth planet. Sci. Lett.*, 87, 161-172

McFadden, P.L. & Reid, A.B., 1982. Analysis of paleomagentic inclination data, *Geophys. J. R. astr. Soc.*, 69, 307-319

McIntosh, G., Kovacheva, M., Catanzariti, G., Osete, M.L. & Casas, L., 2007. Widespread occurrence of a novel High coercivity, thermally stable, low unblocking température magnetic phase in heated archaeological material, *Geophys. Res. Lett.*, 34, L21302, doi:10.1029/2007GL031168

McIntosh, G., Kovacheva, M., Catanzariti, G., Donadini, F. & Osete, M.L., 2011. High coercivity rémanence in baked clay materials used in archaeomagnetism, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 12, Q02003, doi:10/10292010GC003310

Metzler, J., 1995. *Das Treverische Oppidum auf dem Titelberg (G.H. Luxemburg) : zur Kontinuität zwischen der spätkeltischen und der frührömischen Zeit in Nord-Gallien*, Musée national d'histoire et d'art, Luxembourg, 2, vol., 789 p.

Milcent, P.Y., 2007. *Bourges-Avaricum : un centre proto-urbain celtique du Ve siècle av. J.-C. Les fouilles du quartier Saint-Martin-des-Champs et les découvertes des établissements militaires*, Ville de Bourges, Service d'archéologie municipal, 2 vol., 341 p.

Miron, A., 1986. Das Gräberfeld von Horath. Untersuchungen zur Mittel- und Spätlatène zeit im Saar-Mosel-Raum, *Trierer Zeitschrift*, 49, 7-198

Miron, A., 1992. Grafunde der Mittel und Spätlatènezeit im Kreis Bernkastel-Wittlich, *Trierer Zeitschrift*, 55, 129-191

Morales, J., Goguitchaichvili, A., Aguilar-Reyes, B., Pineda-Duran, M., Camps, P., Carvallo, C. & Calvo-Rathert, M., 2011. Are ceramics and bricks reliable absolute geomagnetic intensity carriers?, *Phys. Earth planet. Inter.*, 187(3-4), 310-321

Morel, J.P., 1990. Aperçu sur la chronologie des céramiques à vernis noir aux II^{ème} et I^{er} siècles avant J.-C., in Duval, A., Morel, J.P. & Roman, Y. (dir.), *Gaule interne et Gaule méditerranéenne aux II^{e} et I^{er} siècles avant J.-C. : confrontations chronologiques*, Actes de la table-ronde de Valbonne (11-13 novembre 1986), Revue Archéologique de Narbonnaise, suppl. 21, 349 p.

Moutmir, A., 1994. Une méthode de datation : l'archéomagnétisme, in *Le passé à la loupe, Enquête sur 50 siècles d'habitat à Herblay, en bord de Seine*, Musée d'archéologie départementale du Val d'Oise

Moutmir, A., 1995. *Analyses magnétiques de terres cuites protohistoriques en France. Apports en archéomagnétisme (Premier millénaire avant J.-C.) et en archéologie,* Thèse de doctorat, Muséum National d'histoire Naturelle, Paris, 245 p.

Moutmir, A., Semah, F. & Biquand, D., 1995. Analyse magnétique détaillée de deux structures de combustion à Lignat (1010 av. J.-C., Auvergne, France) : mise en évidence d'un remaniement mécanique partiel, implications archéomagnétique et archéologique, *C.R. Acad. Sci. Paris*, 321, série IIa, 1-8

Müller-Karpe, H., 1959. *Beiträge zur Chronologie der Urnenfelderzeit nördlich und südlich der Alpen*, Berlin, De Gruyter, 334 p.

Muxworthy, A.R., Ji, X., Ridley, V., Pan, Y., Chang, L., Wang, L. & Roberts, A.P., 2011. Multi-protocol palaeointensity determination from middle Brunhes Chron volcanics, Datong Volcanic Province, China, *Phys. Earth planet. Inter.*, doi:10.1016/j.pepi.2011.06.005

Nachasova, I.E. & Burakov, K.S., 2009. Variation of the intensity of the Earth's magnetic field in Portugal in the 1st Millenium BC, *Fizika Zemli*, 7, 54-62 [Izvestiya Physics of the Solid Earth, 45(7), 595-603]

Nardi, G., Pierratini, D. & Talamo, P., 1995. Archaeomagnetic data from Campania (Southern Italy): the 'Medieval' furnace of Pratola Serra, Avellino, *Sci. Tech. Cultural Heritage*, 4(1), 71-77

Needham, J., 1962. *Science and Civilisation in China*, 4, *Physics and Physical Technology*, Part 1 Physics, Cambridge University Press, Cambridge, 434 p.

Néel, L., 1955. Some theoretical aspects of rock magnetism, *Phil. Mag. Suppl.*, 4, 191-243

Nilsson, A., Snowball, I., Muscheler, R. & Uvo, C.B., 2010. Holocene geocentric dipole tilt model constrained by sedimentary paleomagnetic data, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 11, Q08018, doi:10.1029/2010GC003118

Noël, M. & Batt, C.M., 1990. A method for correcting geographically separated remanence directions for the purpose of archaeomagnetic dating, *Geophys. J. Int.*, 102, 753-756

Olivier, L, 2009. Contribution à l'étude de l'évolution techno-typologique des modes de production du sel dans la vallée de la Seille (Moselle) à l'âge du Fer, *Antiquités nationales*, 40, 119-137

Olmer, F., 2003. *Les amphores de Bibracte, 2 : le commerce du vin chez les Eduens d'après les timbres d'amphores*, Bibracte, 7, Glux-en-Glenne, 375 p.

Olsen, N., Lühr, H. & Sabaka, T.J., 2006. CHAOS, a model of Earth's magnetic field derived from CHAMP, Oersted and SAC-C magnetic satellite data, *Geophys. J. Int.*, 166, 67-75

Papusoi, C., 1972a. Effet de la vitesse de refroidissement sur l'intensité de l'aimantation thermorémanente d'un ensemble de grains monodomaines, *Ann. Univ. Al. I. Cuza Iasi. Sect. 1b Phys.*, 18, 1, 31-47

Papusoi, C., 1972b. Variation de l'intensité de l'aimantation thermorémanente d'un ensemble de grains à structure de polydomaines magnétiques en fonction de la vitesse de refroidissement, *Ann. Univ. Al. I. Cuza Iasi. Sect. 1b Phys.*, 18, 2, 155-166

Pare, C., 1991. Swords, Wagon-graves, and the beginning of the Early Iron Age in Central Europe, *Kleine Schriften aus dem Vorgeschichtlichen Seminar Marburg*, 37, Philipps-Universität

Pares, J.M., De Jonge, R., Pascual, J.O., Bermudez, A., Tovar, C.J., Luezas, R.A. & Maestro, N., 1993. Archaeomagnetic evidence for the age of a Roman pottery kiln from Calahorra (Spain), *Geophys. J. Int.*, 112, 533-537

Pastor, L., 2010. *Les ateliers de potiers de la Meuse au Rhin à La Tène Finale et durant l'époque gallo-romaine*, Thèse de doctorat de l'Université de Strasbourg, sous la direction d'Anne-Marie Adam

Paterson, G.A., 2011. A simple test for the presence of multidomain behavior during paleointensity experiments, *J. geophys. Res.*, 116, B10104, doi:10.1029/2011JB008369

Paunier, D. & Luginbühl, T., 2004. *Le site de la maison 1 du Parc aux chevaux (PC1), des origines de l'*oppidum *au règne de Tibère,* Bibracte, 3, Centre archéologique européen, Glux-en-Glenne, 472p.

Pavon-Carrasco, F.J., Osete, M.L., Torta, J.M. & Gaya-Piqué, L.R., 2009. A regional archeomagnetic model for Europe for the last 3000 years, SCHA.DIF.3k : applications to archeomagnetic dating, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 10, Q03013, doi:10.1029/2008GC002244

Pavon-Carrasco, F.J., Rodriguez-Gonzalez, J., Osete, M.L. & Torta, J.M., 2010a. A Matlab tool for archaeomagnetic dating, *J. Arch. Sci.*, 38, 408-419

Pavon-Carrasco, F.J., Osete, M.L. & Torta, J., 2010b. Regional modeling of the geomagnetic field in Europe from 6000BC to 1000BC, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 11, Q11008, doi:10.1029/2010GC003197

Pesonen, L.J., Leino, M.A.H. & Nevanlinna, H., 1995. Archeomagnetic intensity in Finland during the last 6400 years: Evidence for a latitude-dependant nondipole field at approximate AD 500, *J. Geomagn. Geoelectr.,* 47, 19-40

Pike, C.R., Roberts, A.P. & Verosub, K.L., 1999. Characterizing interactions in fine magnetic particle systems using first order reversal curves, *J. Appl. Phys.*, 85, 6660-6667

Pion, P., 2008. « La monnaie de l'absolu » : un siècle de numismatique gauloise dans les chronologies du second âge du Fer, in *Construire le temps, Histoire et méthodes des chronologies et calendriers des derniers millénaires avant notre ère en Europe occidentale*, Lehoërff, A. (dir.), Actes du XXX° colloque international HALMA-IPEL 7-9 décembre 2006 à Lille, Bibracte, 16, Glux-en-Glenne, 349-358

Polenz, H., 1982. Münzen in Latènezeitlichen Gräbern Mitteleuropas aus der Zeit zwischen 300 und 50 v. Chr. Geburt., *bayerische Vorgeschichtsblätter*, 47, 27-222

Poux, M., 2004. *L'âge du vin : rites de boisson, festins et libations en Gaule indépendante,* Collection Protohistoire européenne, 8, Ed. Monique Mergoil, Montagnac, 637 p.

Prévot, M., Mankinen, E.A., Coe, R.S. & Gromme, C.S., 1985. The Steens Mountain (Oregon) geomagnetic polarity transition, 2. Field intensity variations and discussion of reversal models, *J. Geophys. Res.,* 90, B12, 10417-10448

Prilaux, G., 2000. *La production du sel à l'Age du Fer, contribution à l'établissement d'une typologie à partir des exemples de l'autoroute A16*, Eds Monique Mergoil, AFAN, Coll. Protohistoire européenne, vol 5, 109 p.

Principe, C., Tanguy, J.-C., Arrighi, S., Paiotti, A., Le Goff, M. & Zoppi, U., 2004. Chronology of Vesuvius activity from A.D. 79 to 1631 based on archaeomagnetism of lavas and historical sources, *Bull. Volcanol.*, 66, 703-724

Prodéo, F., Casagrande, F., Cordier, F, de Groote, F. & Vigier, S., 2002. *ASF-A20 Loupiac, Combe Nègre 2*, AFAN doc., 3, 333 p.

Pullaiah, G., Irving, E., Buchan, K.L. & Dunlop, D.J., 1975. Magnetization changes caused by burial and uplift, *Earth planet. Sci. Lett.*, **28**, 133-143

Py (Dir), 1993a. *DICOCER : dictionnaire des céramiques antiques (VII^{ème} av. n.è. – VII^{ème} de n.è.) en Méditerranée nord-occidentale (Provence, Languedoc, Ampurdan)*, Lattes, éd. ARALO (coll. *Lattara,* 6), 624 p

Py, M., 1993b. *Les Gaulois du Midi. De la fin de l'âge du Bronze à la conquête romaine*, Hachette, Paris, 288 p.

Py, M., 1997. *Syslat 3.1, système d'information archéologique, manuel de référence,* Lattes, éd. ARALO (coll. *Lattara,* 10), 380 p.

Py, M., 2008. Nouvelles données, nouvelles questions sur l'urbanisme et la société de *Lattara* protohistorique, *Gallia*, *Dossier Lattara/Lattes (Hérault), nouvelles données, nouveaux acquis sur une ville portuaire protohistorique et romaine,* 65, 123-129

Py, M. 2009. *Lattara, Lattes (Hérault), comptoir méditerranéen entre Etrusques, Grecs et Romains*, Errance, Paris, 348 p.

Réddé, M., 2003. *Alésia, l'archéologie face à l'imaginaire*, Errance, Hauts lieux de l'histoire, Paris, 210 p.

Reimer, P.J., Baillie, M.G.L., Bard, E., Bayliss, A., Beck, J.W., Bertrand, C.J.H., Blackwell, P.G., Buck, C.E., Burr, G.S., Cutler, K.B., Damon, P.E., Edwards, R.L., Fairbanks, R.G., Friedrich, M., Guilderson, T.P., Hogg, A.G., Hughen, K.A., Kromer, B., McCormac, G., Manning, S., Ramsey, C.B., Reimer, R.W., Remmele, S., Southon, J.R., Stuiver, M., Talamo, S., Taylor, F.W., van der Plicht, J. & Weyhenmeyer, C.E., 2004. IntCal04 terrestrial radiocarbon age calibration, 0-26 cal kyr BP. *Radiocarbon*, 46(3), 1029-1058

Reimer, P.J., Baillie, M.G.L., Bard, E., Bayliss, A., Beck, J.W., Blackwell, P.G., Bronk Ramsey, C., Buck, C.E., Burr, G.S., Edwards, R.L., Friedrich, M., Grootes, P.M., Guilderson, T.P., hajdas, I., heaton, T.J., Hogg, A.G., Hughen, K.A., Kaiser, K.F., Kromer, B., McCormac, F.G., Manning, S.W., Reimer, R.W., Richards, D.A., Southon, J.R., Talamo, S., Turney, C.S.M., van der Plicht, J. & Weyhenmeyer, C.E., 2009. INTCAL09 and MARINE09 radiocarbon age calibration curves, 0-50,000years Cal BP, *Radiocarbon*, 51(4), 1111-1150

Reinach, S., 1899. *Guide illustré du Musée de Saint Germain*, Saint-Germain-en-Laye

Reinders, J. & Hambach, U., 2001. Archäomagnetische Datierung eines römischen Töpferofens aus Haltern, in *Die römischen Töpferofen von Haltern*, pp. 303-305, ed. Rudnic, B., Bodenaltertümer Westfalens von Zabern, Mainz

Reinecke, P., 1902. Zur Kenntnis der Latènekmäler der Zone nordwärts der Alpes, *Festschrigt zur Feier des 50 jährigen Bestehers des Römisch-Germanischen Central-Museums Mainz*, Mayence, 53-109

Reinecke, P., 1965. *Mainzer Aufsätze zue Chronologie des Bronze- une Eisenzeit*, Bonn, Habelt, 156 p.

Rice, P.M., 1987. *Pottery analysis, a sourcebook*, University of Chicago Press, 559 p.

Rivet, L., 2007. *Entre date et datation, deux ou trois réflexions sur la chronologie des céramiques,* SFECAG, Actes du Congrès de Langres 2007, 11-14

Roberts, A.P., Pike, C.R. & Verosub, K.L., 2000. FORC diagrams: a new tool for characterizing the magnetic properties of natural samples, *J. Geophys. Res.*, 105(28), 461-475

Rodriguez-Ceja, M., Goguitchaichvili, A., Morales, J., Ostrooumov, M., Manzanilla, L.R., Aguilar-Reyes, B. & Urrutia-Fucugauchi, J., 2009. Integrated archeomagnetic and micro-Raman spectroscopy study of Pre-Columbian ceramica from the Mesoamerican formative village of Cuanalan, Teotihuacan Valley, Mexico, *J. Geophys. Res.*, **114**, B4, doi:10.1029/2008JB006106

Rogers, J., Fox, J.M.W. & Aitken, M.J., 1979. Magnetic anisotropy in ancient pottery, *Nature,* 277, 644-646

Rolley, C., 2003. *La tombe princière de Vix*, Picard, Société des amis du musée du Châtillonnais, Paris, Châtillon-sur-Seine, 2 vol., 384 p.

Roux, J.-C. & Raux, S., 1996. Les foyers domestiques dans l'habitat lattois du IIe Age du Fer (IVe-Ier s. av. n.è.), *Lattara*, 9, 401-432

Ruiz-Martinez, V.C., Pavon-Carrasco, F.J. & Catanzariti, G., 2008. First archaeomagnetic data from northern Iberia, *Phys. Chem. Earth*, 33, 566-577

Sabaka, T.J., Olsen, N. & Purucker, M. 2004. Extending comprehensive models of the Earth's magnetic field with Oersted and CHAMP data, *Geophys. J. Int.*, 159, 521-547, doi:10.1111/j.1365-246X.2004.02421.x

Salis, J.S., Bonhommet, N. & Levi, S., 1989. Paleointensity of the geomagnetic field from dated lavas of the Chaîne des Puys, France. 7-12 thousand years Before Present, *J. Geophys. Res.*, 94, B11, 15771-15794

Sapin, C., Baylé, M., Büttner, S., Guibert, P., Blain, S., Lanos, P., Chauvin, A., Dufresne, P. & Oberlin, C., 2008. Archéologie du bâti et archéométrie au Mont-Saint-Michel, nouvelles approches de Notre-Dame-sous-Terre, *Archéologie Médiévale*, 38, 71-122

Schnepp, E. & Lanos, P., 2005. Archaeomagnetic secular variation in Germany during the past 2500 years, *Geophys. J. Int.*, 163, 479-490

Schnepp, E. & Lanos, P., 2006. A preliminary secular variation reference curve for archaeomagnetic dating in Austria, *Geophys. J. Int.*, 166, 91-96

Schnepp, E., Worm, K. & Scholger, R., 2008. Improved sampling techniques for baked clay and soft sediments, *Phys. Chem. Earth*, 33, 6-7, 407-413

Schnepp, E., Pucher, R., Reinders, J., Hambach, U., Soffel, H. & Hedley, I., 2004. A German catalogue of archaeomagnetic data, *Geophys. J. Int.*, 157, 64-78

Schnepp, E., Lanos, P. & Chauvin, A., 2009. Geomagnetic paleointensity between 1300 and 1750 A.D. derived from a bread oven floor sequence in Lübeck, Germany, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 10, Q08003, doi :10.1029/2009GC002470

Séguier, J.M. & Vidal, M., 1992. Les rapports commerciaux le long de l'axe Aude-Garonne aux âges du Fer, in *Marseille grecque et la Gaule*, Collection Etudes Massaliètes, 3, 431-444

Selkin, P.A. & Tauxe, L., 2000. Long-term variations in palaeointensity, *Philos. Trans. R. Soc. Lond. A*, 358, 1065-1088

Shaar, R., Ben-Yosef, E., Ron, H., Tauxe, L., Agnon, A. & Kessel, R., 2011a. Geomagnetic field intensity : How high can it get ? How fast can it change ? Constraints from Iron age copper slag., *Earth planet. Sci Lett.*, 301, 297-306

Shaar, R., Ron, H., Tauxe, L., Kessel, R., Agnon, A., 2011b. Paleomagnetic field intensity derived from non-SD. Testing the Thellier IZZI technique on MD slag and a new bootstrap procedure, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 310, 213-224

Sievers, S., 2003. *Manching, die Keltenstadt*, Theiss, Stuttgart, 158 p.

Sireix, C., 1989. Le site protohistorique des Grandes-Vignes II à Sainte-Florence (Gironde), *Aquitania*, 7, 5-25

Sireix, C., Reginato, A. & Abaz, B., 1994. Officines de potiers du second âge du Fer dans le Sud-Ouest de la Gaule. Organisation, structure de cuisson et production, Actes du 16° colloque de l'Association Française d'Etude de l'Age du Fer à Agen en 1992, *Aquitania*, 12

Snowball, I. & Muscheler, R., 2007. Palaeomagnetic intensity data: an Achilles heel of solar activity reconstructions, *The Holocene*, 17(6), 851-859

Snowball, I., Zillen, L., Ojala, A., Saarinen, T. & Sandgren, P., 2007. FENNOSTACK and FENNORPIS : Varve dated Holocene palaeomagentic secular variation and relative palaeointensity stacks for Fennoscandia, *Earth planet. Sci. Lett.*, 255, 106-116

Spassov, S., Hus, J., Geeraerts, R. & Heller, F., 2008. Archaeomagnetic dating of a High Middle Age likely iron working site in Corroy-le-Grand (Belgium), *Phys. Chem. Earth*, 33, 6-7, 544-556

Speranza, F., Maritan, L., Mazzoli, C., Morandi Bonacossi, D. & D'Ajello Caracciolo, F., 2005. First directional archaeomagnetic results from Syria : evidence from Tell Mishrifeh/Qatna, *Geophys. J. Int.*, 165, 47-52

Sperber, L., 1987. *Untersuchungen zue Chronologie der Urnenfelderkultur im nördlichen Alpenvorland von der Schweiz bis Oberösterreich*, Bonn, Habelt, 359 p.

Stark, F., Cassidy, J., Hill, M.J., Shaw, J. & Sheppard, P., 2010. Establishing a first archaeointensity record for the SW Pacific, *Earth planet. Sci. Lett.*, **298**, 113-124

Sternberg, R.S., 1989. Secular variation of the archaeomagnetic direction in the american Southwest, AD750-1425, *J. geophys. Res.*, 94, 527-546

Sternberg, R.S., 2008. Archaeomagnetism in *Archaeometry* : a semi-centennial review, *Archaeometry*, 50(6), 983-998

Surmely, F., 2003. Les fours polynésiens en Auvergne (France) : bilan des connaissances, in Frere-Sautot, M.-C., *Le feu domestique et ses structures au Néolithique et aux Ages des Métaux*, Monique Mergoil, 568 p.

Suteu, C.A., Batt, C.M. & Zananiri, I., 2008. New developments in archaeomagnetic dating for Romania – a progress report on recent directional studies, *Phys. Chem. Earth*, 33, 557-565

Suttie, N., Holme, R., Hill, M.J. & Shaw, J., 2011. Consistent treatment of errors in archaeointensity implies rapid decay of the dipole prior to 1840, *Earth. Planet. Sci. Lett.*, 304(1-2), 13-21

Szabo, M., Timar, L. & Szabo, D., 2007. La basilique de Bibracte, un témoignage précoce de l'architecture romaine en Gaule centrale, *Archäologisches Korrespondenzblatt*, 37(3), 389-408

Taffanel, O, Taffanel, J. & Janin, T., 1998. *La nécropole du Moulin à Mailhac (Aude)*, ARALO, Lattes, 394 p.

Tanguy, J.-C., Le Goff, M., Principe, C., Arrighi, S., Chillemi, V., Paiotti, A., La Delfa, S. & Patanè, G., 2003. Archaeomagnetic dating of Mediterranean volcanics of the last 2100 years: validity and limits, *Earth planet. Sci. Lett.*, 211, 111-124

Tarling, D.H., 1999. The global archaeomagnetic database, *Geophys. Res. Abstr.*, 1, 161

Tema, E., 2009. Estimate of the magnetic anisotropy effect on the archaeomagnetic inclination of ancient bricks, *Phys. Earth planet. Inter.*, **176**, 213-223

Tema, E., 2011. Archaeomagnetic research in Italy: recent achievements and future perspectives, in Petrovsky, E., Herrero-Bervera, E., Harinarayana, T., Ivers, D. (eds), *The Earth's magnetic Interior*, IAGA Special Sopron Book Series I, 213-233

Tema, E. & Kondopoulou, D., 2011. Secular variation of the Earth's magnetic field in the Balkan region during the last eight millennia based on archaeomagnetic data, *Geophy. J. Int.*, 186(2), 603-614, doi:10.1011/j.1365-246X.2011.05088.x

Tema, E., Hedley, I. & Lanos, P., 2006. Archaeomagnetism in Italy : a compilation of data including new results and a preliminary Italian secular variation curve, *Geophys. J. Int.*, 167, 1160-1171

Tema, E., Goguitchaichvili, A. & Camps, P., 2009. Archaeointensity determinations from Italy : new data and the Earth's magnetic field strength variation over the past three millenia, *Geophys. J. Int.*, 180(2), 596-608

Thébault, E. & Gallet, Y., 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, doi:10.1029/2010GL044788

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

Thellier, E., 1976. Méthode archéomagnétique de datation, in Labeyrie, J., Lalou, C., *Datations absolues et analyses isotopiques en préhistoire : méthode et limites*, Actes du IX° Congrès de l'Union internationale des sciences préhistoriques et protohistoriques (UISPP), Nice, 13-18 septembre 1976, 133-154

Thellier, E, 1981. Sur la direction du champ magnétique terrestre, en France, durant les deux derniers millénaires, *Phys Earth planet Int.*, 24, 89-132

Thellier, E. & Thellier, O., 1944. Recherches géomagnetiques sur des coulées volcaniques d'Auvergne, *Ann. Geophys.,* 1, 37-52.

Thellier, E. & Thellier, O., 1959. Sur l'intensité du champ magnétique terrestre dans le passé historique et géologique, *Ann. Geophys.*, 15, 285-376

Thuillier, F., 2003. *Les ateliers céramiques d'époque gallo-romaine dans le Nord de la Gaule : organisation et typologie des structures de production*, Thèse de doctorat de l'Université de Tours, sous la direction d'Alain Ferdière

Tischler, O., 1885. Über Gliederung der Latène-Periode und über Dekorierung des Eisenwaffen in dieser Zeit, *Korrespondenzblatt der deutschen Gesellschaft für Anthropologie-Ethnologie und Urgeschichte*, 16, 157-161

Trachsel, M., 2004. *Untersuchungen zur relativen und absoluten Chronologie der Hallstattzeit*, Rudolf Habelt GmbH, Bonn, 2 vol., 619 p.

Turner, G.M. & Thompson, R., 1981. Lake sediment record of the geomagnetic secular variation in Britain during Holocene times, *Geophys. J. R. Astron. Soc.*, 65, 703-725

Vaginay, M. & Guichard, V., 1988. *L'habitat gaulois de Feurs (Loire) : fouilles récentes (1978-1981)*, DAF, 14, Ed. Maison des sciences de l'Homme, Paris, 200 p.

Valet, J.-P., Herrero-Bervera, E., Le Mouël, J.-L. & Plenier, G., 2008. Secular variation of the geomagnetic dipole during the past 2000 years, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 9, Q01008, doi:10.1029/2007GC001728

Vallet, G., Villard, F. & Auberson, P., 1983. *Megara Hyblaea, Guida alla scavi : introduzione alla storia di una città coloniale d'occidente,* Mélanges d'archéologie et d'histoire de l'école française de Rome, Supplément 3, Rome, 182 p.

Van Geel, B., van der Plicht, J., Kilian, M.R., Klaver, E.R., Kouwenberg, J.H.M., Renssen, H., Reynaud-Farrera, I & Waterbolk, H.T., 1998. The sharp rise of $\Delta^{14}C$ ca. 800 cal. BC: possible causes, related climatic teleconnections and the impact on human environments, *Radiocarbon*, 40, 535-550

Veitch, R.J., Hedley, I.G. & Wagner, J.J., 1984. An investigation of the intensity of the geomagnetic field during Roman times using magnetically anisotropic bricks and tiles, *Arch. Sci.* (Geneva), 37(3), 359-373

Verdin, F., 2006. Les mutations de la fin de l'âge du Fer (II^{e}-II^{er} s. av. J.-C.) dans le midi de la Gaule, in Haselgrove, C. (dir.), *Celtes et Gaulois, l'Archéologie face à l'Histoire, les mutations de la fin de l'âge du Fer*, Actes de la table ronde de Cambridge 7-8 juillet 2005, Bibracte, Glux-en-Glenne, 12/4, 235-250

Verger, S., 2008. Quelques synchronismes dans les relations entre l'Europe hallstattienne et les cultures de la Méditerranée occidentale, in *Construire le temps, Histoire et méthodes des chronologies et calendriers des derniers millénaires avant notre ère en Europe occidentale*, Lehoërff, A. (dir.), Actes du XXX° colloque international HALMA-IPEL 7-9 décembre 2006 à Lille, Bibracte, 16, Glux-en-Glenne, 251-274

Vital, J., 1990. *Protohistoire du défilé de la Donzère*, Documents d'Archéologie Française, 28, Ed. Maison des sciences de l'Homme, Paris

Vitali, D. (Ed), 2007. *Albinia, le fornaci e le anfore di Albinia, primi dati su produzioni e scambi della costa tirrenica al modo gallico*, Seminario internazionale, Ravenna May 6-7th 2006, 206 p.

Wahba, G., 1990. *Spline models for observational data*, Society for industrial and applied mathematics, Philadelphia, Pennsylvania, 169 p.

Wardinski, I & Korte, M., 2008. The evolution of the core-surface flow over the last seven thousands years, *J. geophys. Res.*, 113, B05101, doi:10.1029/2007JB005024

Warmé, N., 2009. L'archéomagnétisme appliqué aux fours du haut Moyen Âge, Dix ans d'activité en collaboration avec le PCR « Habitat rural du haut Moyen Âge », in, eds, Gentili, F. & Lefèvre, A., *L'habitat rural du haut Moyen Âge en Ile-de-France*, 2ème supplément au Bulletin archéologique du Vexin français et du Val d'Oise, 193-194

Weller, O., 2002. *Archéologie du sel. Techniques et sociétés dans la Pré et Protohistoire européenne*, Actes du colloque 12.2 du XIV° Congrès de l'UISPP à Liège, Verlag Marie Leidorf, Rahden/Westfalen

Wirth, S., 2009. Quelques considérations à propos de la chronologie de la « période des Champs d'Urnes », in Richard, A., Barral, P., Daubigney, A., Kaenel, G., Mordant, C. & Piningre, J.F. (éds), *L'isthme européen Rhin-Saône-Rhône dans la Protohistoire, Approches nouvelles en hommage à Jacques-Pierre Millotte, Besançon 16-18 octobre 2006*, Besançon, Presses universitaires de Franche-Comté, 376 p. (Annales Littéraires, 860, Série »Environnement, sociétés et archéologie », 13)

Xu, S. & Dunlop, D.J., 2004. Thellier palaeointensity theory and experiments for multidomain grains, *J. Geophys. Res.*, 109, B07103, doi:10.1029/2004JB003024

Yang, S., Odah, H. & Shaw, J., 2000. Variations in the geomagnetic dipole moment over the last 12000 years, *Geophys. J. Int.*, 140, 158-162

Yu, Y., 2011. Importance of cooling rate dependence of thermoremanence in paleointensity determination, *J. Geophys. Res.*, 116, B09101, doi:10.1029/2011JB008388

Yu., Y., Dunlop, D.J., 2002. Multivectorial paleointensity determination from the Cordova Gabbro, southern Ontario, *Earth planet. Sci. Lett.*, 203, 983-998

Yu, Y., Tauxe, L. & Genevey, A., 2004. Towards an optimal geomagnetic field intensity determination technique, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, **5**(2), Q02H07, doi:10.1029/2003GC000630

Zananiri, I., Batt, C.M., Lanos, P., Tarling, D.H. & Linford, P., 2007. Archaeomagnetic secular variation in the UK during the past 4000 years and its application to archaeomagnetic dating, *Phys. Earth planet. Int.*, 160, 97-107

Zanella, E., Gurioli, L., Chiari, G., Ciarallo, G., Cioni, R., De Carolis, E. & Lanza, R., 2000. Archaeomagnetic results from mural paintings and pyroclastic rocks in Pompeii and Herculanum, *Phys. Earth planet. Inter.*, 118, 227-240

Glossaire des abréviations

AD : *Anno domini*, après J.-C.

AF : *Alternating Field*, champ alternatif

ARA : Aimantation Rémanente Anhystérétique

ARC : Aimantation Rémanente Chimique

ARN : Aimantation Rémanente Naturelle

ATR : Aimantation ThermoRémanente

ATRp : Aimantation ThermoRémanente partielle

BC : *Before Christus*, avant J.-C.

CMT : Champ Magnétique Terrestre

CRM : *Chemical Remanent Magnetization*, équivalent d'ARC

D : Déclinaison

DANG : *Deviation Angle*, paramètre utilisé pour l'analyse de l'archéointensité

F : Archéointensité, Intensité du champ magnétique terrestre

I : Inclinaison

MD : *Multi Domain*, grains multi-domaines ou poly-domaines

MAD : *Mean Angular Deviation*, paramètre utilisé pour l'analyse de l'archéointensité

NMI : Nombre Minimum d'Individus

NR : Nombre de Restes (nombre de tessons)

NRM : *Natural Remanent Magnetization*, équivalent d'ARN

PSD : *Pseudo-single domain*

SD : *Single Domain*, grains mono-domaines

SHA : *Spherical Harmonic Analysis*, analyse en harmoniques sphériques

SVC : *Secular Variation Curve*, courbe de variation séculaire du champ magnétique terrestre

TAQ : *Terminus Ante Quem*

TPQ : *Terminus Post Quem*

TRM : *ThermoRemanent Magnetization*, équivalent d'ATR

u.s. : Unité stratigraphique

VADM : *Virtual Axial Dipole Moment,* moment du dipôle axial virtuel

VGP : *Virtual Geomagnetic Pole*, pôle géomagnétique virtuel

VDM : *Virtual Dipole Moment,* moment du dipôle virtuel

Liste des figures

Cette liste ne comprend pas les figures des trois articles (Chapitres 5, 8 et 9), qui font l'objet d'une numérotation distincte.

Première partie

Figure 1.1 : Composantes du vecteur champ magnétique

Figure 1.2 : Spectre d'énergie du champ magnétique et temps de réorganisation des degrés d'harmoniques sphériques

Figure 1.3 : Répartition spatiale et temporelle des données archéomagnétiques et volcaniques

Figure 1.4 : Comparaison du moment dipolaire déduit des données ouest-européennes avec les modèles globaux

Figure 1.5 : Principe de la datation archéomagnétique sur RenDateModel

Figure 1.6 : Etat des courbes de variation séculaire de la direction en France

Figure 1.7 : Variation de la direction du champ magnétique terrestre en Europe occidentale

Figure 1.8 : Variation de la direction du champ magnétique terrestre en Europe orientale

Figure 1.9 : Variation de l'intensité du champ magnétique terrestre en Europe occidentale

Figure 1.10 : Variation de l'archéointensité en Grèce et en Bulgarie

Figure 1.11 : Variation de l'archéointensité au Proche-Orient

Figure 1.12 : Zones géographiques au Bronze Final.

Figure 1.13 : Carte synthétique de l'âge du Fer en « France » entre 600 et 450 av. J.-C.

Figure 1.14 : Carte synthétique de l'âge du Fer en « France » entre 450 et 200 av. J.-C.

Figure 1.15 : Carte synthétique de l'âge du Fer en « France » entre 200 et 0 av. J.-C.

Figure 1.16 : Cartographie des cités gauloises à l'époque de César

Figure 1.17 : Chronologies relatives du premier millénaire av. J.-C.

Figure 1.18 : Evolution des systèmes chronologiques de la fin de l'âge du Fer

Figure 1.19 : Courbe de calibration dendrochronologique des âges radiocarbone et effets plateaux pour le premier millénaire av. J.-C.

Figure 1.20 : Variation de la production du radiocarbone atmosphérique au 1er millénaire av. J.-C.

Figure 1.21 : Etat du référentiel dendrochronologique du chêne pour le Nord et le Centre de la France

Deuxième partie

Figure 2.1 : Localisation des sites archéologiques étudiés au cours du doctorat

Figure 2.2 : Schéma d'un four de potier à deux volumes

Figure 2.3 : Exemples de fours de potiers

Figure 2.4 : Exemples typiques de fourneau à sel

Figure 2.5 : Exemples de foyers analysés

Figure 2.6 : Théorie du calage chronologique de la dernière chauffe d'une structure en place (four, foyer)

Figure 2.7 : Datation radiocarbone du four de Vix (21711A)

Figure 2.8 : Datation radiocarbone du four néolithique de Chartres-Beaulieu

Figure 2.9 : Plan général des fouilles de la Pâture-du-Couvent au Mont-Beuvray et plan détaille de la phase 1 de l'angle Nord-ouest de l'îlot des Grandes Forges

Figure 2.10 : Diagramme stratigraphique simplifié de la pièce 30 de l'angle Nord-ouest de l'îlot des Grandes Forges et tableaux synthétiques des datations chrono-typologiques des UF

Figure 2.11 : Calage chronologique de la dernière chauffe du foyer 2011 de la pièce 1977 sur le site de la Côme-Chaudron au Mont-Beuvray.

Figure 2.12 : Datation de l'u.s. 27345 de Lattes Saint-Sauveur

Figure 2.13 : 11369A, le petit four de Sallèles-d'Aude

Figure 2.14 : 11369B, le grand four de Sallèles-d'Aude

Figure 2.15 : Variation de l'intensité d'ARN en fonction de la susceptibilité en champ faible des fours 11369A et 11369B

Figure 2.16 : Courbes thermomagnétiques représentatives des briquettes des fours 11369A et 11369B

Figure 2.17 : Désaimantation par champ alternatif et résultats d'acquisition d'ARI des briquettes des fours 11369A et 11369B

Figure 2.18 : Résultats d'archéointensité représentatifs des briquettes des fours 11369A et 11369B

Figure 2.19 : Correction d'anisotropie des briquettes de Sallèles-d'Aude

Figure 2.20 : Représentations stéréographiques des directions d'aimantation, corrigées de l'anisotropie des briquettes des fours 11369A et 11369B

Figure 2.21 : Histogrammes des facteurs de correction de vitesse de refroidissement des briquettes de Sallèles-d'Aude

Figure 2.22 : Facteur de correction en fonction de la durée du refroidissement pour les 17 briquettes du four 11369B

Figure 2.23 : Comparaison des facteurs de correction avec un refroidissement linéaire et exponentiel

Figure 2.24 : Facteur de correction (refroidissement lent 0,4°C/min) en fonction du champ coercitif rémanent

Figure 2.25 : Proportion du facteur de correction porté par les grains de température de blocage entre 580 et 650°C en fonction du champ coercitif rémanent

Figure 2.26 : Variation du facteur de correction de la vitesse de refroidissement en fonction de la température

Troisième partie

Figure 3.1 : Les nouvelles courbes (bayésienne et par moyenne mobile) de référence de l'inclinaison et de la déclinaison en Europe occidentale

Figure 3.2 : Comparaison des anciennes et nouvelles courbes bayésiennes de l'inclinaison et de la déclinaison

Figure 3.3 : Courbes bayésienne et par moyenne mobile de l'intensité.

Figure 3.4 : Datation archéomagnétique au premier âge du Fer

Figure 3.5 : Datation archéomagnétique au second âge du Fer

Figure 3.6 : Datation archéomagnétique au premier âge du Fer avec le modèle global ARCH3k.1 et le modèle régional SCHA.DIF.3k.

Figure 3.7 : Etat de la documentation archéomagnétique en Italie

Figure 3.8 : Courbes bayésiennes univariées de la variation séculaire en Méditerranée centrale.

Figure 3.9 : Datation archéomagnétique du four de Pompéi

Figure 3.10 : Datation archéomagnétique du four **50**,71 de Mégara Hyblaea

Figure 3.11 : Datation archéomagnétique du four **50**,92 de Mégara Hyblaea

Figure 3.12 : Datation archéomagnétique du four **32**,21j de Mégara Hyblaea

Liste des tableaux

Cette liste ne comprend pas les tableaux des trois articles (Chapitres 5, 8 et 9), qui font l'objet d'une numérotation distincte.

Première partie

Tableau 1.1 : Points de référence actuellement publiés pour la période protohistorique en France

Deuxième partie

Tableau 2.1 : Présentation des sites archéologiques et des structures étudiés

Tableau 2.2 : Direction et intensité du champ magnétique terrestre à Sallèles-d'Aude

Tableau 2.3 : MDF, Jrs et Hcr des briquettes des fours 13369A et 11369B

Tableau 2.4 : Résultats d'archéointensité des échantillons des briquettes du four 11369A

Tableau 2.5 : Résultats d'archéointensité des échantillons des briquettes du four 11369B

Troisième partie

Tableau 3.1 : Résultats de direction et d'intensité des fours de Pompéi et Megara Hyblaea