

APPORTS DU MAGNETISME DES TERRES CUITES DANS LA DETERMINATION DES ARCHEOTEMPERATURES ET DES HISTOIRES THERMOFONCTIONNELLES DE STRUCTURES DE COMBUSTION NEOLITHIQUES

By

Abdelkrim Moutmir

Service Central de la Police Judiciaire de la Gendarmerie Royale

Professeur attaché à l'Institut National des Sciences de l'Archéologie et du Patrimoine. Laboratoire «Sources Alternatives de l'Histoire du Maroc (SAHIM)» Rabat-Maroc (karimmoutmir@yahoo.fr)

ABSTRACT

[EN] MAGNETIC CONTRIBUTIONS OF FIRED CLAYS TO THE DETERMINATION OF ARCHAEO-TEMPERATURES AND THERMO-FUNCTIONAL HISTORIES OF NEOLITHIC

Combustion Structures: This work focuses on the archaeomagnetic study of combustion structures from two French archaeological sites. The samples were taken from two hearth 'plaques' on the Lignat site (S1 & S2; dating between 1215-805 BC) and a domestic oven on the Rungis site (dating between 3495-2939 BC). The analysis of their thermoremanent magnetization (TRM) revealed the presence of complex phenomena responsible for disturbances of the primary magnetization. During thermal demagnetization, the calculation of the mean direction of the remaining and lost magnetizations at low and high temperatures highlighted significant clustering of the primary TRM directions for S1 and Fd and a complex thermo-mechanical history for S2, characterized by two heating phases separated by a structural rearrangement. The characterization of partial TMRs carried by S2 provided the opportunity to reconstruct a sequence of human activities, dating from around 1000 BC, at the Lignat site, allowing for the uncovering of an initial use at high temperatures, probably to produce pottery (archT1 $\approx$ 600°C), followed by partial maintenance recycling fired clay blocks, and a later reuse for a likely domestic function (archT2 < 440°C). The experimental protocol for thermal demagnetization of fired clay, as well as the statistical calculation applied to the grouping of directions at low and high temperatures can be considered as an archaeometric approach, specifically adapted to exploit archaeological combustion structures that do not meet the criteria for archaeomagnetic validity. The methodological contributions related to determining archaeotemperatures and thermo-mechanical history are of central importance in understanding the evolution of technical concepts related to the arrangement and function of archaeological combustion structures.

KEYWORDS: Archaeomagnetism, combustion structure, thermal demagnetization, archaeotemperature, thermofunctional recycling, thermomechanical history.

[FR] Ce travail porte sur l'étude archéomagnétique des structures de combustion de deux sites archéologiques français. Les prélèvements ont concerné deux plaques foyers sur le site de Lignat (S1 et S2; 1215-805 ans av. J.-C.), et un four domestique sur le site de Rungis (Fd; 3495-2939 ans av. J.-C.). L'analyse de leur aimantation thermorémanente (ATR) a montré l'existence de phénomènes complexes à l'origine des perturbations de l'aimantation primaire. Lors de la désaimantation thermique, le calcul de la direction moyenne des aimantations restantes et perdues, à basses et à hautes températures, a mis en évidence des regroupements significatifs des directions de l'ATR primaire pour S1 et Fd, et une histoire thermo-mécanique complexe pour S2, marquée par deux phases de chauffe séparées par un remaniement structurel. La caractérisation des ATR partielles portées par S2, a permis de retracer des gestes anthropiques datant de 1000 ans av. J.-C. à Lignat, révélant une première utilisation à haute température pour produire probablement de la poterie (archT1 $\approx$ 600°C), suivie d'un entretien partiel recyclant des blocs de terres cuites, et d'une réutilisation tardive pour une fonction vraisemblablement domestique

Received: 17-12-2024. Accepted: 13-04-2025. Available online: 22-10-2025.

DOI: 10.21608/jguua2.2025.345103.1244

20

JGUAA2 vol.10/3 special issue, 2025: 20-40

(archT₂<440°C). Le protocole expérimental de la désaimantation thermique des terres cuites ainsi que le calcul statistique appliqué aux regroupements des directions à basses et à hautes températures, peuvent être retenus comme une approche archéométrique, spécifiquement adaptée pour exploiter des structures de combustion archéologiques non conformes aux critères de validité archéomagnétique. Les apports méthodologiques relatifs à la détermination d'archéotempératures et d'une histoire thermomécanique, sont d'un intérêt central dans l'appréhension de l'évolution des concepts techniques, en relation avec l'aménagement et la fonction des structures de combustion archéologiques.

MOTS-CLES: Archéomagnétisme, structure de combustion, désaimantation thermique, archéotempérature, recyclage thermo-fonctionnel, histoire thermomécanique.

[AR] مساهمات مغناطيسية الطين المحروق في تحديد درجات الحرارة الأثرية ومجريات التحولات الوظيفية الحرارية والهيكليّة للهياكل الاحتراقية النيوليثية: يركز هذا العمل على دراسة الأركيومغنتة لهياكل احتراقية من موقعين أثريين فرنسيين. تعلق العمل الميداني بأخذ عينات الطين المحروق من صفيحتين حراريتين في موقع لينيا (ص ١ و ص ٢ ٨٠٥.١٢١٥ ق.م) ومن قرن للاستخدام المنزلي في موقع رانجيس (ف-م: ٢٩٣٩-٣٤٩٥ ق.م). ولقد أظهرت دراسة التمغنط الحراري الناتج عن الطهي الأثري، وجود ظواهر معقدة تسببت في اضطرابات هذا التمغنط الأولي. وأثناء الإزالة الحرارية التجريبية للتمغنط، سمح التحديد الإحصائي للاتجاه المتوسط للتمغنط المتبقية والمفقودة عند درجات الحرارة المنخفضة و المرتفعة، بالكشف عن تجمعات تمثل اتجاهات التمغنط الحراري الأولي في ص ١ و ف-م، وعن التحولات الوظيفية والهيكليّة المعقدة التي عرفتها الصفيحة ص ٢، والتي تميزت بمرحلتين حراريتين مختلفتين، فصلت بينهما مرحلة تدبير هيكلي. إن توصيف تمغنطات جزئية تحملها ص ٢ جعل من الممكن تتبع الأنشطة البشرية التي يرجع تاريخها إلى ١٠٠٠ سنة ق.م في لينيا، حيث تم الكشف عن استخدام أولي تحت درجات حرارة عالية، على الأرجح في إنتاج الفخار (أركيوحرارة ١ ~ ٦٠٠ درجة مئوية)، تلاه صيانة جزئية للهيكلي، تضمنت إعادة تدوير كتل الطين المحروق، قبل أن يُعاد استخدامه لوظيفة لاحقة، من المحتمل أن تكون منزلية (أركيوحرارة ١ ~ ٤٠٠ درجة مئوية). ويمكن اعتبار البروتوكول التجريبي لإزالة التمغنط الحراري للطين المحروق، وكذلك التحليل الإحصائي المطبق على تجمع الاتجاهات عند درجات الحرارة المنخفضة و المرتفعة، كنهج مقياسي تم تكييفه خصيصاً لاستغلال هياكل الاحتراق الأثرية التي لا تفي بمعايير الصلاحية المتعلقة بتجمع الاتجاهات الأركيومغناطيسية. إن المساهمات المنهجية المتعلقة بتحديد درجات الحرارة الأثرية ومجريات التحولات الوظيفية الحرارية والهيكليّة التي قام بها مستعملي الهياكل الاحتراقية، لها أهمية مركزية في فهم تطور المفاهيم التقنية المتعلقة بتنظيم ووظيفة هياكل الطهي الأثرية.

الكلمات الدالة: الأركيومغنتة، هياكل احتراقية أثرية، إزالة حرارية تجريبية للتمغنط، أركيوحرارة، تدبير هيكلي وظيفي.

I. INTRODUCTION

L'archéomagnétisme est développé pour retrouver la variation séculaire de la direction et de l'intensité du champ magnétique terrestre (CMT), enregistrée par les terres cuites issues des structures de combustion archéologiques. Il est classiquement exploité comme une méthode de datation dont la précision est tributaire des développements statistiques¹, combinant le nombre de sites étudiés aux informations chronologiques (C14, typologie, ...), disponibles pour chacun d'entre eux.

Lors du fonctionnement thermique d'une structure, après chauffe à une température supérieure à la température de Curie des minéraux magnétiques contenus dans la terre argileuse, ces derniers acquièrent, au cours du refroidissement, une aimantation thermorémanente (ATR) sous l'action du CMT. Cette aimantation primaire est conservée dans le temps archéologique, tant que la terre cuite ne subit pas de chauffe postérieure. L'ATR est effacée complètement ou partiellement selon que le nouveau degré de chauffe a atteint l'ensemble ou une partie des températures de déblocage des différents assemblages magnétiques².

Sur les bases théoriques et expérimentales de l'acquisition de l'ATR², les recherches se sont multipliées pour étudier la fiabilité et la stabilité³ de l'archéo-intensité et de l'archéo-direction de l'aimantation des matériaux qui en sont porteurs, mais aussi pour approcher les caractéristiques thermo fonctionnelles des structures de combustion.

¹ BUCUR 1994: 87; VASCHALDE 2014: 44

² TUCKER & RUTH 1983: 9-19.

³ AITKEN & HAWLAY 1971: 13; LANOS 1990: 47.

Des recherches publiées dès 1995⁴, exploitant les méthodes d'analyses magnétiques (désaimantation thermique, cycle d'hystérésis et susceptibilité magnétique), ont porté sur plusieurs structures de combustion datant des premiers millénaires av. J.-C. Elles ont permis de discuter les critères de fiabilité de la direction archéo-magnétique, d'approcher les archéo-températures de cuisson et de retracer l'histoire de recyclage thermo-fonctionnel et de remaniement. Des travaux postérieurs ont porté sur l'influence des conditions de chauffage sur les mécanismes d'acquisition de la rémanence⁵, ainsi que sur l'effet des altérations géochimiques sur l'archéo-intensité⁶ et les changements de susceptibilité magnétique en tant qu'indicateurs de la température de cuisson des structures⁷.

Pour les archéologues, la découverte d'une structure de combustion constitue un centre d'intérêt particulier, en tant qu'espace domestique ou de transformation de la matière. Centré sur l'énergie thermique, la caractérisation physique de sa structure et de sa fonction est susceptible de révéler des modes de gestion et de maîtrise⁸, traduisant des actes de différents niveaux de réflexion, de conception, de création, de mise et de remise en œuvre et de rendement⁹. Outre l'apport en chronologie archéo-magnétique, l'étude des mécanismes d'acquisition et de stabilité de la thermorémanence peut être considérée comme une approche archéométrique anthropocentrique sur les structures de combustion archéologiques¹⁰.

Cette note met en évidence l'intérêt du magnétisme des terres cuites pour la détermination de l'archéotempérature, la caractérisation des fonctions ainsi que la traçabilité physique des gestes liés aux recyclages structurels. Elle présente l'étude d'un four domestique de la Tène finale et de deux plaques-foyers datant du Bronze final. Le développement méthodologique, basé sur l'analyse de leurs ATR, a permis de discuter la contemporanéité des foyers et les actions anthropiques liées à l'utilisation d'une même structure pour deux fonctions distinctes, et à son entretien structurel.

II. MATERIELS ET METHODES

A. Matériels D'étude

Les études ont concerné deux sites archéologiques en France.

Le Site de Rungis

Le site archéologique de Rungis (Île-de-France; L = 48°46'N, l = 2°21'E) a livré une structure de combustion [FIGURE 1] sous forme d'un four excavé, avec une sole en cuvette, comprenant une zone charbonneuse, une autre destinée à la cuisson, des graines carbonisées et une meule¹¹. Ces données archéologiques ont été en faveur de penser que le four avait une fonction culinaire (four à pain ou four destiné à la torréfaction des céréales). La datation des charbons de bois par le Centre de datation et

⁴ MOUTMIR & BIQUAND 1995A: 321; MOUTMIR 1995B: 13, 245.

⁵ JORDANOVA *et Al.* 2003: 153; CARRANCHO & VILILAIN 2011: 312; MORALES *et Al.* 2011: 187.

⁶ SPASSOV & HUS 2006: 167; TEMA & FERRARA 2019: 35.

⁷ RASMUSSEN *et Al.* 2012: 39; KOSTADINOVA-AVRAMOVA *et Al.* 2018: 17; JORDANOVA *et Al.* 2018: 123

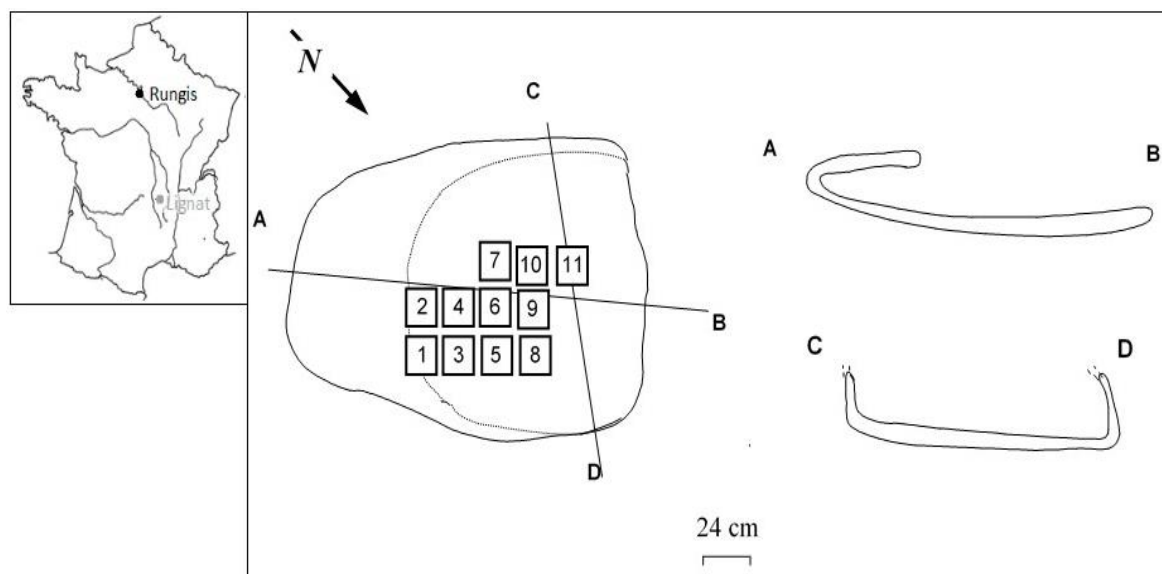
⁸ TABORIN 1989: 77-80; GASCÓ 2002: 49; BENTSEN 2007: 19-24; WADLEY 2012: 247.

⁹ GASCÓ & MULLER-PELLETIER 2004: 323-339.

¹⁰ MOUTMIR 2021; MOUTMIR 2022: RQM 11.

¹¹ BOUETIEZ & PROST 1989.

d'analyses isotopiques de l'université Claude-Bernard-Lyon I, a placé l'âge du four, après correction dendro-chronologique, dans un intervalle compris entre 3495 et 2939 ans av. J.-C. (ref. Ly- 5048). Pour notre étude archéo-magnétique, onze échantillons ont été prélevés sur la partie rubéfiée et indurée, sur une épaisseur de 7 à 10 cm.



[FIGURE 1]: Site de Rungis - Organisation du four prélevé: La coupe AB montre la partie conservée de la voûte. Les numéros représentent les échantillons prélevés.

2. Le Site de Lignat

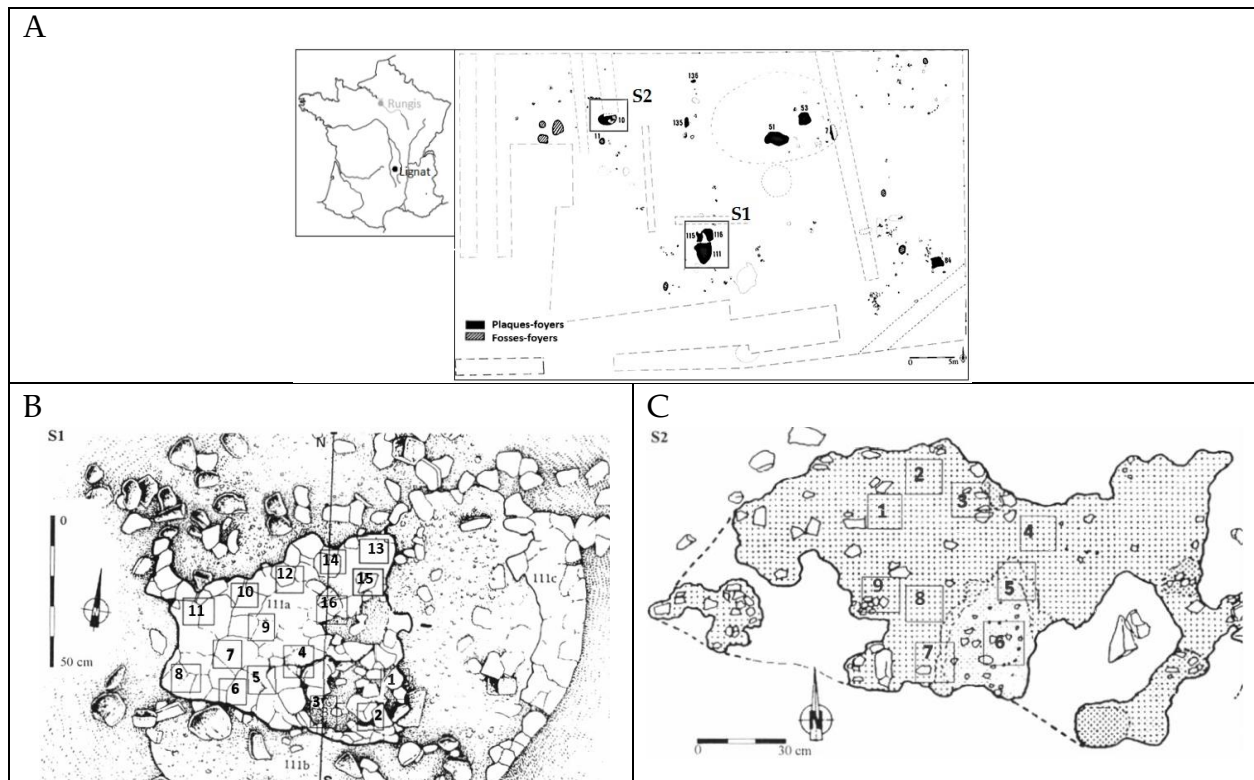
Le site de Lignat (Auvergne; 45°43'15"N et 3°16'E) est caractérisé par la présence de deux phases d'habitats protohistoriques, scellées par une occupation gallo-romaine. La phase la plus ancienne, représentant l'occupation principale du site, a été attribuée au Bronze final 3b¹². La datation au carbone 14 a placé cette occupation au IX^e siècle avant notre ère en données calibrées (âge cal. entre 1215-805 av. J.-C., ref. ARC92/R1165G), en concordance avec la datation typologique de l'abondante céramique (31 000 fragments pesant plus de 760 kg).

L'occupation est marquée par 10 plaques-foyers réparties sur une surface de 1500 m² [FIGURE 2/A]. Elles sont localisées dans les aires à forte densité en vestiges mobiliers, et peuvent être formées d'une simple chape d'argile rubéfiée d'épaisseur variable, ou de plusieurs niveaux de rubéfaction.

L'étude archéo-magnétique a porté sur deux structures:

- **La Plaque-Foyer S1 [FIGURE 2/B].** Le prélèvement de 16 échantillons a été fait sur la partie supérieure qui correspond à une couche d'argile rubéfiée, compacte et légèrement bombée, de 4 à 6 cm d'épaisseur.
- **La Plaque-Foyer S2 [FIGURE 2/C].** Elle est formée d'une simple couche d'argile rubéfiée dans laquelle on trouve, intégrés ou en surface, de nombreux tessons très fragmentés sous l'effet de chauffés répétées. Seuls 9 échantillons y ont été prélevés.

¹² GARDETTE 1992; GARDETTE, MOUTMIR & SURMELY 1996: 35.



[FIGURES 2/A-C]: Site de Lignat. A. Plan général des structures avec emplacements des plaques-foyer S1 et S2; B-C. Emplacements des échantillons prélevés sur S1 - S2

B. Méthodes

Sur le terrain, le prélèvement a consisté à dégager des blocs parallélépipédiques décimétriques, à les figer à l'aide de bandes plâtrées, puis à couler un chapeau de plâtre horizontal sur leur surface. Deux flèches y étaient ensuite tracées pour indiquer la direction du nord magnétique et l'azimut du soleil au moment du prélèvement. La méthode de prélèvement et d'orientation des échantillons de grande taille est décrite par E. Thellier¹³.

Au laboratoire, plusieurs mesures ont été réalisées pour analyser l'aimantation rémanente naturelle (ARN: ATR et ARV) et suivre la stabilité de l'ATR (aimantation thermorémanente) lors du traitement thermique, selon un protocole de chauffe identique pour l'ensemble des échantillons [FIGURE 3]. L'ARV (aimantation rémanente visqueuse) étant une aimantation secondaire parasite, acquise sous l'action du CMT depuis l'abandon des structures.

La mesure de l'ARN a été réalisée par l'inductomètre à rotation¹⁴ pour les échantillons de Lignat et par le magnétomètre à aimants¹⁵, plus sensible, et donc mieux adapté aux échantillons de Rungis à plus faible intensité. Ces deux instruments de mesures sont adaptés aux échantillons de grande taille.

La désaimantation thermique a été faite à l'aide d'un grand four, placé à l'intérieur d'une enceinte en μ -métal assurant une annulation du champ magnétique terrestre.

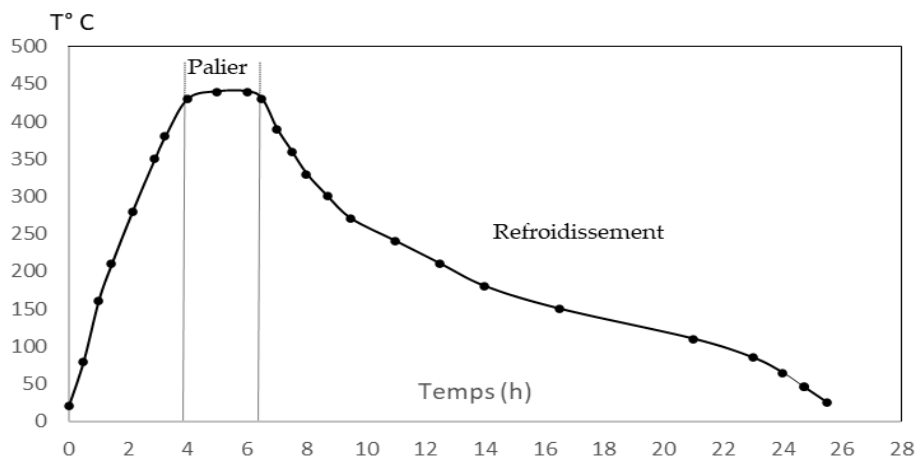
¹³ THELLIER 1981: 24.

¹⁴ THELLIER 1967: 149; LE GOFF 1975: 85.

¹⁵ POZZI 1967: 88.

Protocole de Chauffe

<i>Durée totale de la chauffe</i>	4h30min
<i>Durée au palier</i>	3 heures
<i>Durée de refroidissement (variable)</i>	• 18 h pour $T \leq 300^{\circ}\text{C}$ • 24 h pour $T > 300^{\circ}\text{C}$



[FIGURE 3]: Exemple d'un cycle «chauffe-refroidissement» dans le grand four, avec une température au palier de 440°C .

L'approche statistique basée sur l'extension bivariate de Fisher¹⁶, a été adoptée pour suivre le regroupement des directions d'aimantation le long du protocole expérimental. Par ailleurs, les analyses par induction en champ fort et par champ alternatif ont été utilisées pour étudier la minéralogie magnétique et tester la présence éventuelle de l'ARI (aimantation rémanente isotherme parasite, liée à des perturbations électriques).

III. RESULTATS

A- MESURE DE L'ARN

Le Site de Rungis

Les résultats relatifs à la mesure de l'ARN ont dégagé les points suivants [TABLEAU 1]:

- Une grande dispersion des directions individuelles;
- Un indice de viscosité élevé;
- Une intensité d'aimantation faible.

Les premiers calculs statistiques donnent une faible valeur du facteur de précision k et une grande valeur du demi-angle au sommet du cône de confiance (α_{95}). La grande dispersion des directions individuelles [FIGURE 4/A] et le grand indice de viscosité sont non conformes aux critères de fiabilité de Thellier¹⁹. À ce stade de l'étude, la direction moyenne calculée ne peut être retenue comme direction archéo-magnétique.

¹⁶ FISHER 1953: 217; LE GOFF: 1990: 270; LE GOFF *et Al.* 1992: 70.

¹⁹ THELLIER 1959: 98-112.

Le Site de Lignat

Les résultats [TABLEAU 2] montrent que:

- l'intensité de l'aimantation ($8.2 \cdot 10^{-1}$ A/m) de S1 est en moyenne plus importante que celle de S2 ($3.3 \cdot 10^{-1}$ A/m);
- l'indice moyen de viscosité (1.5 %) de S1 est sensiblement plus faible que celui de S2 (3.3 %);
- le faible taux de l'ARV et le bon regroupement des directions de S1 [FIGURE 4/B] permettent de calculer une direction moyenne (ARN-S1) valable d'un point de vue archéo-magnétique, soit:

D1moy de S1	D = 25.6°E	I = 66.1°	k = 251.5	$\alpha_{95} = 2.2^\circ$
--------------------	-------------------	------------------	------------------	---

- Pour S2, bien que tous les échantillons présentent un indice de viscosité inférieur à 5 % à l'exception de l'échantillon 6 ($v = 8\%$), la grande dispersion de leurs directions [FIGURE 4/B] empêche le calcul d'une direction magnétique moyenne significative.

Ech.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
v %	19,3	21,6	21,0	22,4	39,4	40,0	61,8	37,0	29,0	45,7	50,0
M 10^{-2} A/m	6,8	9,6	6,7	12,6	3,7	2,5	2,2	3,8	3,8	1,9	3,7
D°	3,9	16,7	-3,2	9,5	- 21,8	- 14,4	31,1	- 12,4	18,4	18,6	- 34,6
I°	47,2	52,2	63,6	60,9	72,3	56,7	59	48,8	54,5	68,2	53,6

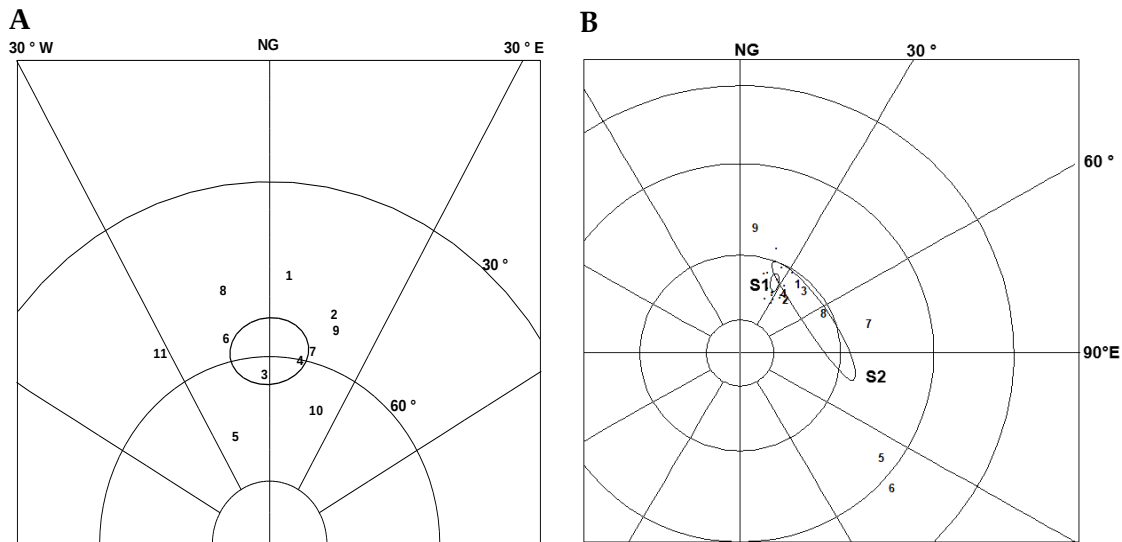
[TABLEAU 1]: Mesure de l'ARN du site de Rungis. v. indice de viscosité;
M. intensité d'aimantation; D. déclinaison; I. inclinaison.

Ech.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
v %	1.5	1.3	1.7	1.5	1.4	1.5	1.2	1.4	1.6	1.4	1.9	1.6	1.5	1.6	1.5	1.9
M 10^{-1} A/m	8	9.2	7.1	9.2	7	6.3	10. 6	11. 8	7	8.2	9.2	4	5.8	5.6	11. 7	10.3
D°	26. 3	26. 6	22. 9	29. 6	25. 6	17. 9	15. 9	18. 3	31. 7	24. 6	31. 3	33. 2	33.7	29.3	27. 2	21.7
I°	68. 6	68. 4	71. 1	71. 5	64. 3	63. 3	63. 9	55. 4	64. 9	60. 2	60. 1	68	68.7	70.4	69. 4	68

[TABLEAU 2/A]: Mesure de l'ARN des échantillons du site S1 de Lignat.

Ech.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
v %	3.1	3.1	2.6	4.9	2.5	7.9	2.5	4	3.2
M 10^{-1} A/m	1.6	2.9	3.9	6.6	3.4	0.76	4.5	3.6	2.4
D°	38.5	40.1	46.3	36.1	129.1	133.7	78.7	65.8	5.5
I°	64.4	70.5	64.6	69.3	35.4	25.5	51.3	63.7	52.6

[TABLEAU 2/B]: Mesure de l'ARN des échantillons du site S2 de Lignat.

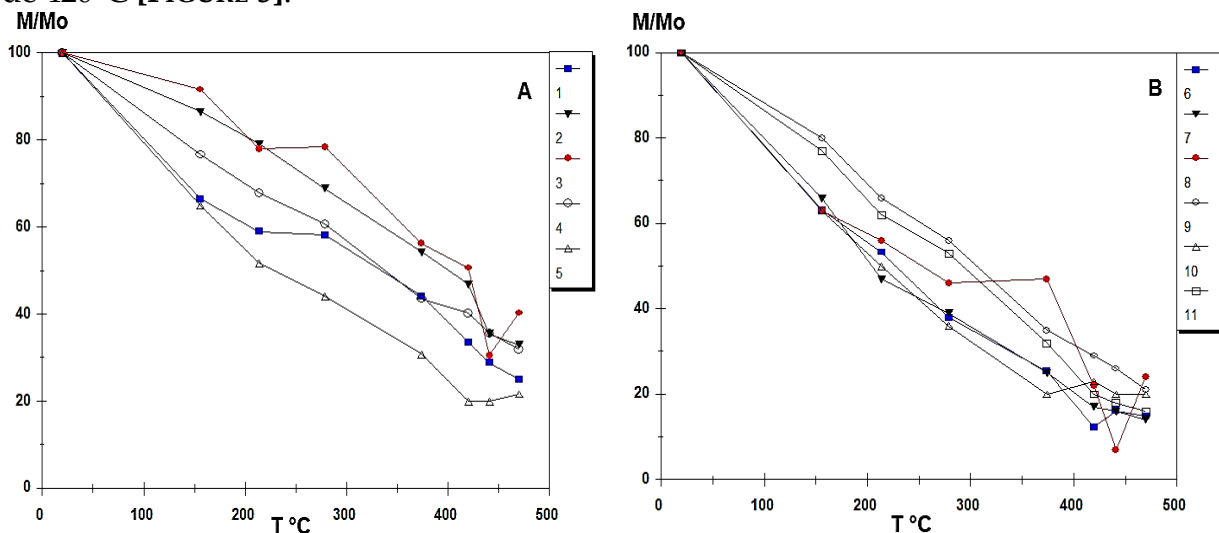


[FIGURES 4/A-B]: Diagrammes de Schmidt représentant les directions individuelles de l'ARN de Rungis. A. numéros) et de Lignat; B. points pour S1, numéros pour S2) et des cônes de confiance autour de la direction moyenne de leurs aimantations.

B- DESAIMANTATION THERMIQUE

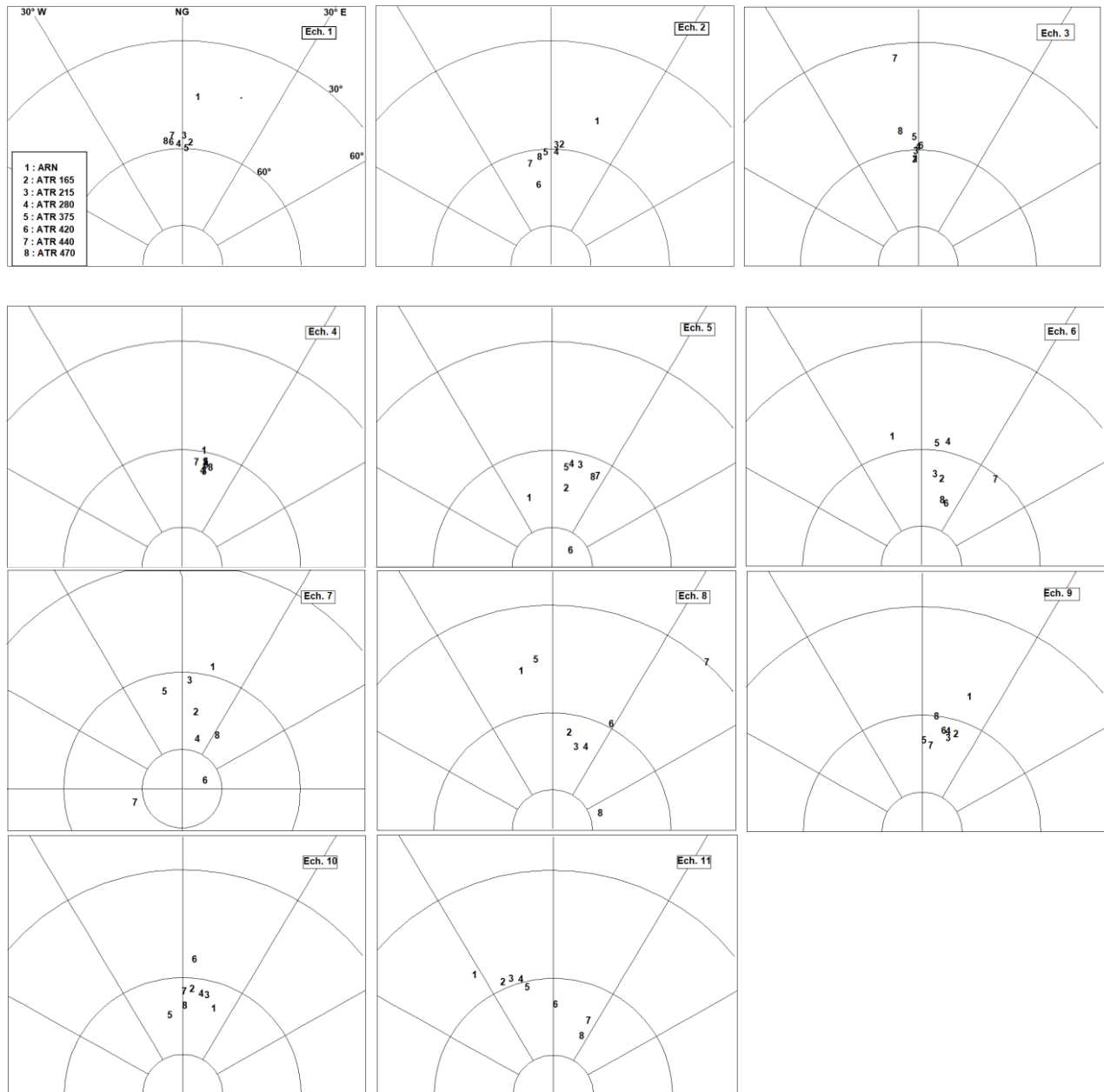
1- Étude de la stabilité de l'ATR du four de Rungis.

La désaimantation thermique des échantillons a nécessité huit paliers, ayant atteint une température maximale de 470°C. Les courbes de désaimantation montrent une diminution régulière de l'intensité de l'aimantation qui semble se stabiliser à partir de 420°C [FIGURE 5].



[FIGURES 5/A-B]: Courbes de désaimantation thermique du site de Rungis. A. éch. 1 à 5; B. éch. 6 à 11.

Le taux de baisse enregistré au premier palier (156°C), compris entre 9 et 37 %, correspond à la disparition de l'ARV. Les diagrammes de Schmidt présentent l'évolution des directions individuelles de l'aimantation de chaque échantillon le long des différents paliers [FIGURE 6]. De manière générale, après les chauffes, les directions s'écartent de la direction de l'ARN (position 1 sur les diagrammes).



[FIGURE 6]: Diagramme de Schmidt du site de Rungis, montrant l'évolution des directions individuelles d'aimantation au cours de la désaimantation thermique. Les numéros (1-8) indiquent les directions aux différents paliers.

La Direction de l'ATR et la Température D'acquisition

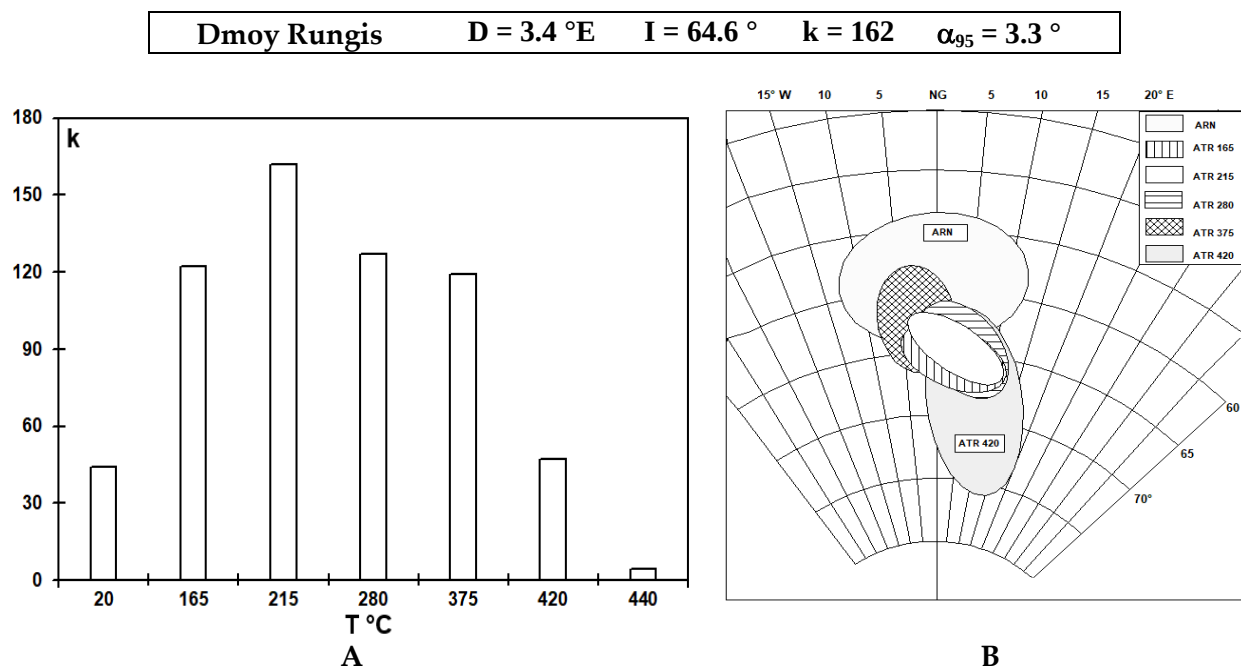
La direction moyenne des directions individuelles [TABLEAU 3] a été calculée pour chaque palier.

Palier en °C	20	165	215	280	375	420	441
N (nbr d'éch.)	11	--	--	--	--	--	--
D (°)	-0.3	3.6	3.4	4.7	-3	8	10.4
I (°)	59	64.5	64.6	64.7	62.3	68.8	57.4
k	44	122	162	127	119	47	4.5
α_{95} (°)	6.4	3.8	3.3	3.7	4	6.1	20

[TABLEAU 3]: Calcul de la direction moyenne de l'aimantation aux différents paliers de l'analyse pour le site de Rungis

L'évolution de la direction moyenne (facteur k et α_{95}) [FIGURE 7] montre que:

- La dispersion importante des directions individuelles (faible valeur de k), en deçà de 165°C et au-delà de 375°C [FIGURE 7/A], est à relier respectivement à l'ARV et à la baisse de la stabilité de l'aimantation primaire. Au-delà de 375 °C, la dispersion et la baisse de l'intensité de l'ATR indiquent que la cuisson n'a pas dépassé 400°C pour solliciter les grains dont la température de déblocage est supérieure à cette dernière.
- Les directions d'aimantations individuelles sont significativement mieux regroupées dans l'intervalle [165-375°C]. La direction moyenne (Dmoy Rungis), retenue pour le site de Rungis [FIGURE 7/B], est celle calculée au palier de 215 °C. Elle correspond à la valeur maximale de k, et représente l'aimantation thermique acquise lors du dernier fonction du four.



[FIGURES 7/A-B]: Évolution de la stabilité de l'ATR lors de la désaimantation thermique des échantillons de Rungis. A. Valeurs du facteur de précision k des directions moyennes de l'aimantation aux différents paliers; B. Évolution de la direction moyenne avec son cône de confiance (diagramme de SCHMIDT).

2- Étude Thermique des Différentes Composantes D'aimantations du Site de Lignat.

La grande dispersion des directions de S2 montre une importante dérive angulaire Est de la déclinaison des échantillons 5 et 6 [FIGURE 4/B]. Aussi, la distribution de l'ensemble des directions selon un arc de cercle, qui passe au voisinage de la direction moyenne de S1, suggère la présence d'une aimantation complexe.

2. A. Analyse Thermique des Échantillons Pilotes 4 et 6 de la Plaque-Foyer S2

L'étude de la composition vectorielle de la rémanence s'est focalisée sur les échantillons pilotes 4 et 6. Ils sont choisis pour leurs directions individuelles; celle du premier étant très proche de la direction moyenne de S1 et celle du second en est très éloignée.

Le protocole de chauffe a impliqué plus de 14 cycles, atteignant une température maximale de plus de 620°C lors du dernier palier. Après chaque cycle 'chauffe – refroidissement', le calcul a concerné la direction et l'intensité de l'aimantation résiduelle (restante), mais aussi la direction de l'aimantation perdue (vecteur différence) entre deux paliers de chauffe.

Le résultat est spectaculaire [FIGURE 8]. Il traduit l'existence d'une aimantation complexe, correspondant à la résultante de deux composantes thermorémanentes partielles (ATRp).

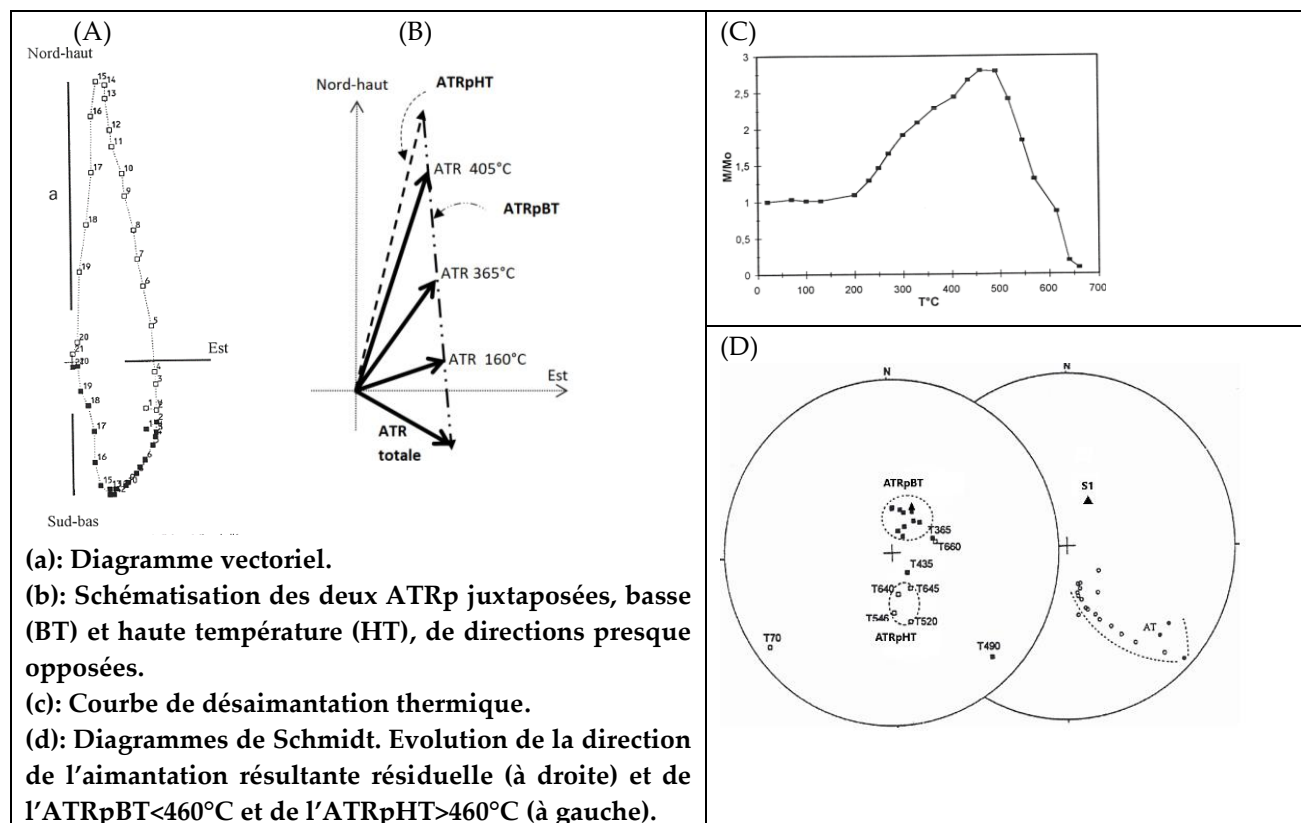
2.B.Caractérisation Thermo-vectorielle des Composantes Thermorémanentes Partielles

Cas de l'échantillon 6

La mesure des aimantations, résiduelle et perdue, a permis d'observer les résultats suivants:

- I. Le diagramme vectoriel indique que l'aimantation est portée par deux vecteurs d'inclinaisons presque opposées [FIGURE 8/A]. La représentation de la juxtaposition des deux ATRp [FIGURE 8/B] illustre les conditions de leur acquisition à basse température (ATRpBT) et à haute température (ATRpHT), ayant sollicité des spectres de températures de blocage et de déblocage magnétiques juxtaposées²⁰.
- II. La courbe de désaimantation thermique [FIGURE 8/C] montre une première phase d'augmentation du moment résultant des deux vecteurs (intensité de l'aimantation restante). Cette phase, qui accompagne la disparition de l'ATRpBT, est suivie d'une seconde phase de décroissance, traduisant la disparition de l'ATRpHT à partir de la température de 460°C.
- III. L'ATRpBT, reconstituée à partir de la somme des vecteurs perdus jusqu'au palier 460°C, a une direction très proche de D1 [FIGURE 8/D].
- IV. Au-delà de 460°C, l'ATRpHT adopte une direction stable jusqu'à une température supérieure à 580°C, mais présente une inclinaison négative, presque opposée à celle de l'ATRpBT [FIGURE 8/D].

²⁰ DALY 1981: 24.



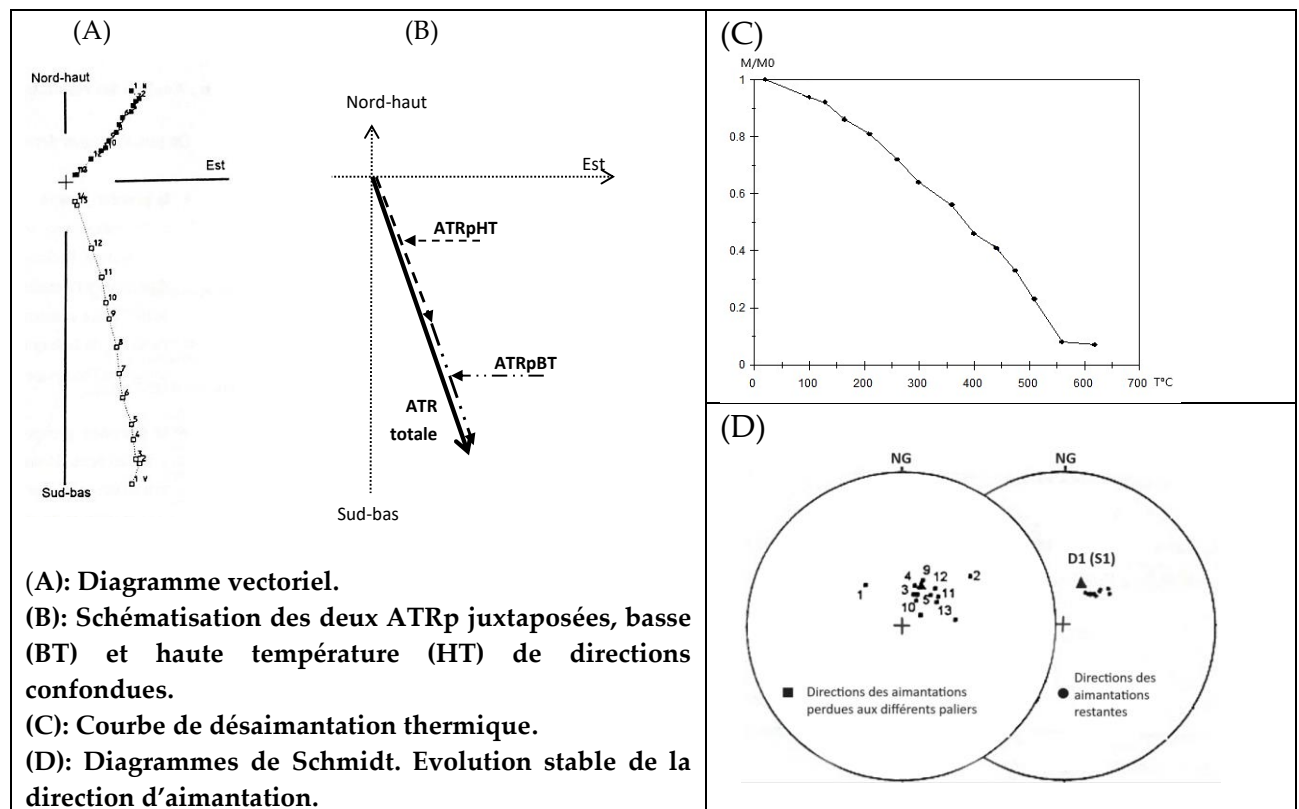
[FIGURE 8]: Évolution vectorielle des composantes thermorémanentes partielles lors de la désaimantation thermique de l'échantillon 6 de la plaque-foyer S2 du site de Lignat.

Cas de L'échantillon 4

Contrairement à l'échantillon 6, l'échantillon 4 semble ne comporter qu'une seule composante d'aimantation [FIGURES 9/A- D]. Les directions des aimantations, restante et perdue, ne varient pas et restent stables et groupées autour de D1 à basses et hautes températures. L'intensité de l'aimantation baisse graduellement et devient négligeable à partir de 560°C (température de Curie de la magnétite), comme le montre la courbe de désaimantation.

À première vue, l'échantillon 4 pourrait être porteur d'une ATR totale de direction comparable à celle de l'ATRpBT de l'échantillon 6. Ceci exige que des températures très différentes auraient affecté des zones différentes de la plaque S2. Mais, cette hypothèse ne peut pas être compatible avec la faible surface de S2 (environ 900 cm²) qui impose, pour les deux échantillons, une histoire thermique comparable.

La différence entre les deux échantillons est alors interprétée en supposant qu'ils se trouvent effectivement porteurs des deux mêmes composantes ATRpBT et ATRpHT, de directions distinctes dans le cas de l'échantillon 6 [FIGURE 8/B], mais confondues dans le cas de l'échantillon 4 [FIGURE 9/B]. Ceci implique que la partie d'où provient l'échantillon 6 a été soumise à un remaniement matériel ou entretien structural avant l'acquisition de l'ATRpBT, alors que celle portant l'échantillon 4 est restée intacte pendant les deux phases de cuissons responsables des ATRpBT et ATRpHT.



[FIGURE 9]: Évolution vectorielle de l'ATR lors de la désaimantation thermique de l'échantillon 4 de la plaque-foyer S2 du site de Lignat.

2.C. L'ATR Basse Température (ATR_{pBT}) de la Structure S2 et Température D'acquisition

À la lumière des résultats obtenus sur les échantillons pilotes, la désaimantation thermique a été appliquée à l'ensemble des échantillons de S2. Elle a permis de distinguer deux groupes:

- I. Le groupe 1, constitué par la majorité des échantillons, présente une aimantation composée de deux ATRp. Leur séparation thermique est définie expérimentalement à 440°C, en deçà de laquelle la direction de l'aimantation perdue ATR_{pBT} est très proche de D1. À haute température, la direction du vecteur restant ATR_{pHT} évolue vers une direction distincte de D1 et différente d'un échantillon à un autre.
- II. Le groupe 2, constitué par les échantillons 1, 2 et 4, présente des aimantations similaires à l'échantillon 4 (direction d'aimantation très proche de D1 et stable jusqu'à des températures avoisinant la température de Curie de la magnétite 580°C).

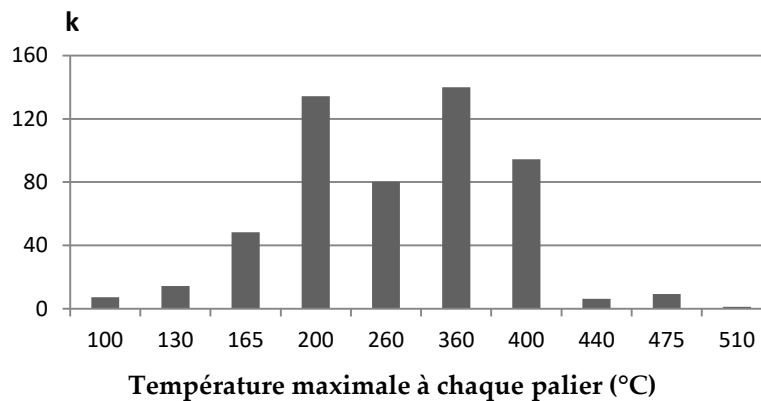
La caractérisation de l'ATR_{pBT} a consisté à déterminer sa direction et la température responsable de son acquisition au cours du dernier fonctionnement de S2 pour l'ensemble des échantillons. Le calcul du facteur de précision k [TABLEAU 4 / FIGURE 10], relatif aux directions moyennes de la composante d'aimantation perdue entre deux paliers successifs, a permis de préciser les points suivants.

- Jusqu'à 165 °C, les faibles valeurs de k indiquent une relative dispersion des composantes perdues, correspondant à la disparition de l'ARV.
- Entre 200 et 400 °C, les vecteurs perdus sont au contraire bien regroupés (valeur élevée de k) autour d'une direction moyenne proche de D1.

- Au-delà de 400 °C, le facteur k diminue considérablement, traduisant la dispersion de la direction de l'aimantation perdue à hautes températures (l'ATR_pHT).

Plage de T°C	20 - 100	100 - 130	130 - 165	165 - 200	200 - 260	260 - 360	360 - 400	360 - 440	440 - 475	475 - 510
N	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-
K	7.4	14.4	48.3	134.3	80.3	140	94.5	6.3	9.3	1.3
α_{95}	18.2	13.1	7	4.3	5.5	4.2	5.1	19.7	16.2	46.2
D°	15.8	18.4	21.6	30.5	26.7	34.8	37.6	31.8	39	30
I°	-	-	65.5	71.5	69.3	68	66.7	70.4	57.4	70.9

[TABLEAU 4]: Site de Lignat. Valeurs de la direction moyenne (D moy et I moy) des vecteurs perdus des huit échantillons de S2 (N), calculées entre les différents paliers de température, avec les valeurs respectives du facteur de précision k et de α_{95} .



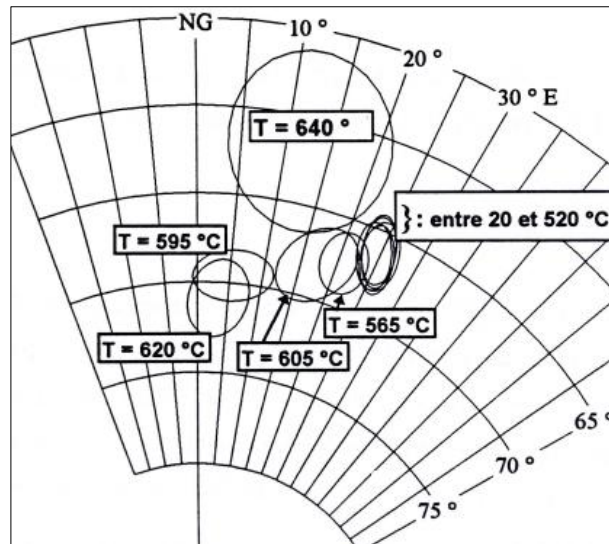
[FIGURE 10]: Site de Lignat. Variation du facteur k calculé pour la direction moyenne des vecteurs perdus à différents paliers de l'analyse thermique.

La sommation des vecteurs perdus entre 200°C et 400°C pour les huit échantillons, a permis de calculer une direction moyenne D2 de l'ATR_pBT. La direction D2 est assez proche de D1, et sa caractérisation a limité statistiquement la température maximale de la dernière chauffe de S2 (Basse T° de cuisson), responsable de l'acquisition de l'ATR_pBT.

D2 de l'ATR _p BT :	D = 33.7°E	I = 68.9°	k = 483.5	$\alpha_{95} = 2.3^\circ$
Basse T° de cuisson:	400°C ≤ BTC < 440°C			

2-D. Analyse Thermique des Échantillons de la Structure S1

Lors de la désaimantation thermique des 16 échantillons de S1, la direction moyenne est restée quasiment stable jusqu'à des températures avoisinant la température de Curie de la magnétite (580 °C) [FIGURE 11]. À partir de cette dernière, l'intensité de l'ATR est devenue très faible.



[FIGURE 11]: Site de Lignat. Diagramme de Schmidt. Evolution de la direction moyenne de l'ATR de tous les échantillons de S1 lors de l'analyse thermique. La direction moyenne est restée stable entre 20°C et une température comprise entre 520 et 565°C.

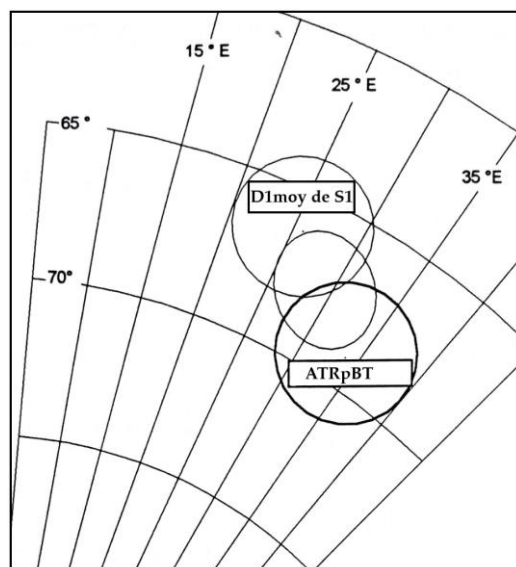
IV. DISCUSSION ET APPORTS METHODOLOGIQUES

A-Détermination des Directions Archéo-magnétiques Fiables

Selon les critères de fiabilité de Thellier, relatifs au bon regroupement des directions individuelles et au faible taux de la viscosité, le four de Rungis et la plaque-foyer S2 de Lignat, sont à considérer comme non conformes pour une étude archéomagnétique. Toutefois, le développement méthodologique, basé sur l'analyse à hautes températures de l'ATR et sur le suivi de l'évolution du facteur de précision k des statistiques de Fisher en fonction des paliers, a permis de cerner des plages de températures où les directions moyennes de l'ATR sont mieux regroupées. Ces regroupements ont été validés suivant deux approches physiques:

1. Calcul de la direction de l'aimantation résiduelle après chaque palier. Ceci est illustré par le cas du four Rungis.
2. Calcul de la direction de l'aimantation perdue entre deux paliers successifs. Dans ce cas particulier, la plaque-foyer S2 de Lignat livre un modèle où la dispersion de l'ARN trouve son origine dans la juxtaposition de deux composantes d'aimantations acquises lors de deux phases de cuissons à des températures différentes.

Pour le site de Lignat, la caractérisation de l'ATR_{pBT} a permis de comparer sa direction à celle de S1. Le recoupement de leurs directions moyennes (D1_{moy} de S1: D=25,6°E, I=66.1° et D2 de l'ATR_{pBT} S2: D=33.7°E, I= 68.9°) plaide pour la contemporanéité des deux structures [FIGURE 12]. Leur direction moyenne est ainsi considérée comme direction archéo-magnétique de référence à Lignat, pour l'âge compris entre 1215 et 805 av. Ce résultat vient reconforter l'hypothèse des archéologues.



[FIGURE 12]: Site de Lignat. Direction archéo-magnétique de référence calculée à partir des directions moyennes de S1 & S2, considérées contemporaines.

Le [TABLEAU 5] récapitule les directions archéo-magnétique de référence²¹ retenues pour Rungis et Lignat.

Rungis	3495 - 2939 av. J.-C.	Dir. Archéo-magnétique	D = 3.4 °E I = 64.6 ° k = 162 $\alpha_{95} = 3.3^\circ$
Lignat	1215 - 805 av. J.-C.	Dir. Archéo-magnétique	D = 29.4°E I = 67.7° k = 146 $\alpha_{95} = 2.4^\circ$

[Tableau 5]: Directions archéo-magnétiques de références pour les sites de Rungis et de Lignat

B- Détermination des Archéo-températures de Cuissons et des Fonctions des Structures de Combustion

Compte tenu des lois de Thellier concernant la thermorémanence, les températures expérimentales de déblocage des ensembles de grains magnétiques, porteurs des aimantations archéo-magnétiques déterminées, peuvent être considérées comme des archéo-températures, approchant les températures des dernières cuissons et la nature des fonctions des structures [TABLEAU 6].

- Dans le cas de Rungis, la stabilité de l'aimantation thermique jusqu'à une température inférieure à 400°C, laisse considérer cette valeur comme la température apparente maximale atteinte au cours du dernier fonctionnement du four. Cette structure ne servait donc pas pour des cuissons à hautes températures. Cette donnée archéométrique vient confirmer l'hypothèse archéologique indiquant que le four servait à des fins domestiques, comme en témoignent les graines de céréales et la meule archéologiques retrouvées au voisinage et dans la structure.
- Dans le cas de S1 de Lignat, la stabilité de l'aimantation jusqu'à 565°C, témoigne d'une température de chauffe suffisamment haute pour débloquent des grains comme la magnétite. La baisse de l'intensité d'aimantation associée à la dispersion des directions

²¹ HERVÉ 2012: 330.

d'aimantations au-delà de 600°C, plaide pour une température de cuisson avoisinant cette valeur. Ceci indique que la structure a dû produire de la poterie comme le laisse suggérer la forte densité des vestiges mobiliers en terres cuites.

- Pour S2 de Lignat, la mise en évidence d'une aimantation complexe a permis de découvrir deux chauffes successives, portées à deux températures différentes. La basse température de la dernière cuisson (BTC) a été évaluée grâce à la caractérisation de l'ATR_pBT, portée par les grains magnétiques ayant des températures de déblocage inférieures à 440°C. Au-delà de cette limite supérieure, les grains magnétiques à plus hautes températures de déblocage, ont préservé le message magnétique d'une cuisson antérieure, traduit par la stabilité de la direction de l'ATR_pHT jusqu'à 600 °C.

La détermination d'une basse et d'une haute températures de cuisson, indique que la structure a connu une histoire thermo-fonctionnelle qui démontre une première fonction semblable à celle de S1, suivie et scellée par une fonction tardive à caractère plutôt culinaire.

Site	Type de structure	Archéo-température	Fonction	Mobiliers archéologiques
Rungis	Four	$T < 440^{\circ}\text{C}$	Culinaire	•graines de céréales •une meule
Lignat	Plaque-foyer S1	$T \cong 600^{\circ}\text{C}$	Production d'objets	•Objets en bronze (Epingles, anneau, boucle d'oreille et bracelets) •Objets céramiques (micro-vases, gobelets, coupes, jattes et jarres, urnes...)
	Plaque-foyer S2 (double fonctions)	$400^{\circ}\text{C} \leq \text{BTC} < 440^{\circ}\text{C}$	Culinaire <i>fonction tardive</i>	
		$T \cong 600^{\circ}\text{C}$	Production d'objets <i>fonction initiale</i>	

[TABLEAU 6]: Détermination des archéo-températures et des fonctions des structures de combustion de Rungis et de Lignat. Pour S2, l'étude thermomagnétique a mis en évidence deux archéo-températures relatives à deux fonctions différentes (initiale et tardive).

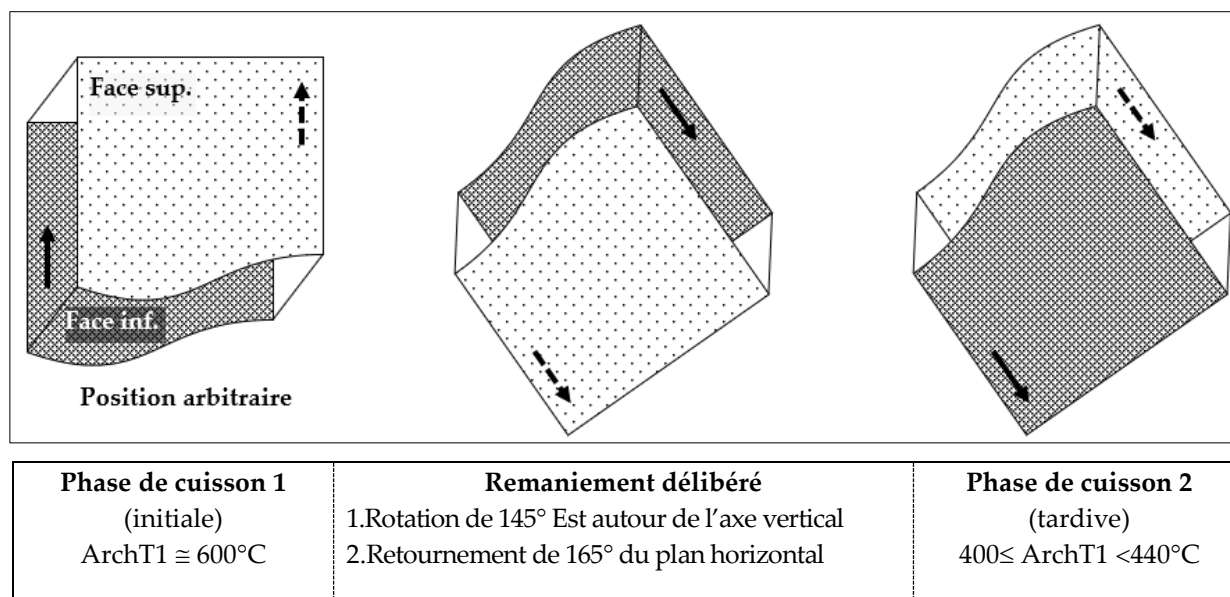
C-Histoire Thermo-Structurale de S2

Si la stabilité rémanente de l'unique composante d'aimantation de S1 constitue une preuve que la dernière chauffe de la structure a été opérée à une archéo-température avoisinant 600°C, la présence de deux composantes vectorielles de l'aimantation de S2 a rendu l'interprétation des résultats plus complexe pour cette dernière.

Dans la mesure où les deux ATR_p (HT et BT) sont de directions quasi-opposées pour une partie de S2 (groupe 1) et confondues pour le reste de la structure (groupe 2) et si l'on considère que la température de la dernière cuisson est homogène pour toute la structure S2, l'interprétation des données exige la présence d'une zone remaniée et d'une zone stable. À ce stade de l'interprétation, il est à noter que l'échantillon 6 (groupe 1) a été prélevé au niveau de la zone remaniée (voir fig. 2C), décrite par les archéologues comme étant un "rechapage partiel" de la surface de S2.

La caractérisation vectorielle de l'ATR_pHT de l'échantillon 6, a permis de retrouver avec précision les gestes du remaniement mécanique de la zone rechapée [FIGURE 13]. La direction d'inclinaison négative est expliquée par une rotation de 145° Est par rapport à son axe vertical (dérive de la déclinaison de l'ARN [FIGURE 4], tout en

lui imprimant un retournement presque complet du plan horizontal de 165°. La [FIGURE 13] schématise les gestes de manipulation des utilisateurs au Bronze final.



[FIGURE 13]: Site de Lignat. Représentation schématique de la chronologie des actes du recyclage thermo-structurel de la plaque-foyer S2. La position arbitraire présente les faces inférieure et supérieure du bloc recyclé, avec des flèches matérialisant les rotations vectorielles.

Cet aspect archéométrique trace une gestion anthropique différentielle ayant marqué l'histoire thermo-structurale de S2. Suite à sa détérioration lors des utilisations répétées à haute température (ArchT1; $\sim$ 600°C), les néolithiques du Bronze final récupéraient des blocs déjà cuits au sein du site, pour effectuer un réaménagement partiel, pour ensuite recycler S2 en tant que foyer domestique, où la température de cuisson ne devait pas excéder 440°C (ArchT2) pour ne pas calciner les aliments²².

V. CONCLUSION

Les résultats archéo-magnétiques présentés dans cette note confèrent à la caractérisation vectorielle à hautes températures des composantes résiduelle et perdue de l'aimantation thermorémanente, une place de choix dans les études des structures de combustion. Outre l'intérêt de retrouver des directions archéo-magnétiques de référence, contribuant à l'esquisse de la courbe de datation archéo-magnétique pour des périodes néolithiques, à partir de sites initialement non conformes (ARV; Rungis, et remaniement mécanique; Lignat S2), ce développement méthodologique s'est avéré d'un apport archéométrique original. Le remontage d'une histoire thermomagnétique complexe, mais aussi structurale, a mis en évidence d'inédites données physiques centrées sur la température et la structure du foyer. Elle a livré des informations qui échappent à l'observation des archéologues, en reconstituant un entretien structural et un recyclage fonctionnel de la plaque-foyer S2. La détermination d'archéo-températures (600°C et 400°C) a constitué un paramètre indiciel pour différencier la nature

²² ORLIAC & WATTEZ 1987: 2, 69-75.

fonctionnelle des structures (production d'objets et domestique). Dans le cas S2, ces données, associées à la caractérisation de gestes de remaniements et de recyclages délibérés, sont autant d'éléments qui permettent de retrouver des actes anthropiques archéologiques de gestion et de maîtrise d'aires centrées sur le feu.

Cette contribution montre également l'intérêt de confronter les données archéologiques avec les données archéométriques. L'association des trouvailles archéologiques, telles que les graines de céréales, la meule ou la richesse du mobilier céramique, aux archéo-températures, autorise la confirmation indiscutable quant à la distinction thermo-fonctionnelle entre structures, voire même le traçage du recyclage fonctionnel d'une même structure, passant de la cuisson de production de la poterie au culinaire. Cette approche interdisciplinaire semble être une alternative archéométrique intéressante pour une interprétation plus significative des analyses magnétiques, dont les implications chronologiques, archéologiques et anthropologiques peuvent être insoupçonnées.

BIBLIOGRAPHIE

- AITKEN, M.J. & HAWLEY, H.N.: «Archaeomagnetism: Evidence for Magnetic Refraction in kiln Structures», *Archaeometry* 13, 1971, 83-85.
- BENTSEN, S.E.: «A Social Instrument: Examining the Chaîne Opératoire of the Hearth», in: *Fire as an Instrument: The Archaeology of Pyrotechnologies*, D. GHEORGHIUDIR (ed.), 2007, 19-24.
- BOUETIEZ, E. & PROST, D.: «Rapport de fouille»: Zac des Antes-Rungis, Laboratoire départementale d'archéologie du Val-de-Marne, Villejuif (Val-de-Marne) 1989.
- BUCCUR, I.: «The Direction of the Terrestrial Magnetic Field in France, during the last 21 Centuries. Recent Progress», *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 87/1-2, 1994, 95-109.
- CARRANCHO, Á. & VILLALAIN JJ.: «Different Mechanisms of Magnetisation Recorded in Experimental Fires: Archaeomagnetic Implications», *Earth and Planetary Science Letters* 312/1, 2011, 176-87.
- DALY, L.: «Des aimantations partielles aux aimantations superposées: espoirs et difficultés», *Phys. Earth planet. Inter* 24, 1981, 218-227.
- FISHER, R.A.: «Dispersion on a Sphere», *Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical and Physical Sciences*, vol. 217, London (The Royal Society) 1953, 295-305.
- GARDETTE, G.: *Un habitat du bronze final à Lignat. Rapport de fouille*, Clermont-Ferrand (Service régional de l'archéologie d'Auvergne) 1992
- GARDETTE, G., MOUTMIR, A. & SURMELY, F.: «Contribution de l'archéomagnétisme à l'étude du gisement du Bronze final 3b de Lignât (Saint-Georges-ès-Allier, Puy-de-Dôme)», *Revue archéologique du Centre de la France* 35, 1996, 97-111.
- GASCO, J. & MULLER-PELLETIER, C.: «L'étude des foyers de la Préhistoire: historique, modalités, variantes et perspectives nouvelles», dans: un XXV^e Congrès Préhistorique de France: Un siècle de construction du discours scientifique en Préhistoire, Avignon (21-25 septembre 2004) (Société Préhistorique Française) 2004, 323-339.
- GASCO, J.: «Structures de combustion et préparation des végétaux de la Préhistoire récente et de la Protohistoire en France méditerranéenne», *Civilisations*, 49|2002, «Pain, fours et foyers des temps passés», <http://journals.openedition.org/civilisations/964>, accessed on 14/09/2024
- HERVE, G.: «Datation par archéomagnétisme des terres cuites archéologiques en France au premier millénaire av. J.-C. Etalonnage des variations du champ géomagnétique en direction et intensité», *Thèse de Doctorat*, Université Michel de Montaigne Bordeaux 3, 2012.
- JORDANOVA, N. et AL.: «A Mineral Magnetic Approach to Determine Paleofiring Temperatures in the Neolithic Settlement Site of Mursalevo-Deveboaz (SW Bulgaria)», *J. Geophys. Res. Solid Earth* 123, 2018, 2522-2538.

- JORDANOVA, N. *et Al.*: «On the Suitability of Baked Clay for Archaeomagnetic Studies as Deduced from Detailed Rock-magnetic Studies», *Geophys. J. Int.* 153, 2003, 146-158.
- KOSTADINOVA-AVRAMOVA, M. *et Al.*: «Firing Temperatures of Ceramics from Bulgaria Determined by Rock-magnetic Studies», *Journal of Archaeological Science: Reports* 17, 2018, 617-633.
- LANOS, PH.: «La datation archéomagnétique des matériaux de construction d'argile cuite. Apport chronologiques et technologiques», *Gallia* 47, 1990, 321-341.
- LE GOFF, M.: «Inductomètre à rotation continue pour la mesure des faibles aimantations rémanentes et induites en magnétisme des roches», *Thèse, Dipl. Ing, CNAM, Paris*, 1975.
- LE GOFF, M., HENRY, B. & DALY, L.: «Practical Method for Drawing p VGP Path», *Phys. Earth Planet. Inter.* 70, 1992, 201-204.
- LE GOFF, M.: «Lissage et limites d'incertitude des courbes de migration polaire : pondération des données et extension bivariate de la statistique de Fisher», *C.R. Acad. sc., Paris, Série B*, 1990, 362-365.
- MORALES, J. *et Al.*: «Are Ceramics and Bricks Reliable Absolute Geomagnetic Intensity Carriers», *Phys. Earth planet. Inter.* 187/3-4, 2011, 310-321.
- MOUTMIR A.: «Apport de l'étude expérimentale de la susceptibilité magnétique dans la caractérisation des fours archéologiques», *Onzième Rencontre des Quaternaristes Marocains (RQM11)*, Rabat (Centre National pour la Recherche Scientifique et Technique) 2022.
- MOUTMIR A.: «Les implications archéomagnétiques et archéologiques des analyses magnétiques des structures de combustion protohistoriques», *XIXth World UISPP Congress*, Moulay Ismail University of Meknes - INSAP (Institut National des Sciences de l'Archéologie et du Patrimoine), Rabat, 2-7. 09.2021.
- MOUTMIR, A.: «Analyses magnétiques de terres cuites protohistoriques en France, apports en archéomagnétisme (premier millénaire av. J.-C.) et en archéologie», *Thèse de Doctorat*, Musée national d'histoire naturelle, Paris, 1995b, 245p.
- MOUTMIR, A., SEMAH F. & BIQUAND D.: «Analyse magnétique détaillée de deux structures de combustion à Lignât (1 010 ans av. J.-C, Auvergne, France): mise en évidence d'un remaniement mécanique partiel. Implications archéomagnétique et archéologique», *C.R. Acad.se*, 321, Paris, 1995a, série a, 1-8,
- NEEL, L.: «Théorie du traînage magnétique des ferromagnétiques en grains fin avec application aux terres cuites», *Ann. Geophys.* 5, 1949, 99-136.
- ORLIAC, C. & WATTEZ, J.: «Un four polynésien et son interprétation archéologique», *Actes du Colloque de Nemours, Mémoire du Musée de Préhistoire de l'Île de France*, 2, 1989.
- POZZI, J.P.: «Recent Improvements Carried out on Astatic Magnetometers», dans *Developments in Paleomagnetism*, (éds.) COLLINSON, D.W., CREER, K.M. & RUNCORN, S. K., Amsterdam (Ed. Elsevier) 1967, 88-90.
- RASMUSSEN, K.L. *et Al.*: «Pottery Firing Temperatures: A New Method for Determining the Firing Temperature of Ceramics and Burnt Clay», *Journal of Archaeological Science* 39, 2012, 1705-1716.
- SPASSOV, S. & HUS, J.: «Estimating Baking Temperatures in a Roman Pottery kiln by Rock Magnetic Properties: Implications of Thermochemical Alteration on Archaeointensity Determinations» *Geophys. J. Int.* 167, 2006, 592-604.
- TABORIN, Y.: «Le foyer: document et concept. Nature et fonction des foyers préhistoriques», *Actes du Colloque International de Nemours 1987, Mémoire du Musée de Préhistoire d'Île de France*, Nemours (Ed. APRAIF) 1987, 77-80.
- TEMA, E. & FERRARA, E.: «Magnetic Measurements as Indicator of the Equivalent Firing Temperature of Ancient Baked Clays: New Results, Limits and Cautions», *Journal of Cultural Heritage*- 35: 2019, 64-75.
- THELLIER, E.: «Sur la direction du champ magnétique terrestre, en France, durant les deux millénaires», *Phys. Earth planet. Inter.*, 24, 1981, 89 -132.
- THELLIER, E.: «A "Big Sample" Spinner Magnetometer», dans *Developments In Paleomagnetism*, (éds.) COLLINSON, D.W., CREER, K.M. & RUNCORN, S.K., Amsterdam (Ed. Elsevier) 1967, 149-154.
- THELLIER, E.: «Magnétisme terrestre», 1959, in «EMILE THELLIER (1904-1987), A Pioneer in Studies of the «Fossil» Earth's Magnetic Field», Historical Events and People in Aeronomy, Geomagnetism and

- Solar-Terrestrial Physics, (éds.) M. LEGOFF & W. SCHRÖDER, Katlenburg, Bremen (Science Edition) 2006, 98-112.
- TUCKER, P.: «Magnetization of Unconsolidated Sediments and Theories of DRM». In: *Geomagnetism of Baked Clays and Recent Sediments*, edited by K.M. GREER, P. TUCHOLKA & C.E. BARTON, Elsevier, 1983, 9-19.
- VASCHALDE, C. *et Al.*: «La datation des structures de cuisson: intégration de l'archéomagnétisme et du radiocarbone, apports de l'anthracologie», *Archéologie médiévale* 44, 2014, 155-170.
- WADLEY, L.: «Some Combustion Features at Sibudu, South Africa, between 65,000 and 58,000 Years Ago», *Quaternary International* 247, 2012, 341-349.