



HAL
open science

Caractérisation thermique des sédiments chauffés des foyers de la Grotte des Fraux (Dordogne, France) Mise en place d'une approche couplée entre thermoluminescence, susceptibilité magnétique, expérimentation et simulation

Aurélie Brodard, Pierre Guibert, Francois Leveque, Delphine Lacanette, Vivien Mathé, Albane Burens-Carozza, Laurent Carozza

► **To cite this version:**

Aurélie Brodard, Pierre Guibert, Francois Leveque, Delphine Lacanette, Vivien Mathé, et al.. Caractérisation thermique des sédiments chauffés des foyers de la Grotte des Fraux (Dordogne, France) Mise en place d'une approche couplée entre thermoluminescence, susceptibilité magnétique, expérimentation et simulation. Expressions esthétiques et comportements techniques au Paléolithique, XVI Congrès mondial de l'Union Internationale des Sciences Préhistoriques et Protohistoriques / XVIth International Union of Prehistoric and Protohistoric Sciences World Congress, Sep 2011, Florianopolis, Brésil. pp.133-148, 10.1016/j.quageo.2012.04.013 . hal-00913973

HAL Id: hal-00913973

<https://hal.science/hal-00913973v1>

Submitted on 4 Dec 2013

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.

UNION INTERNATIONALE DES SCIENCES PRÉHISTORIQUES ET PROTOHISTORIQUES
INTERNATIONAL UNION OF PREHISTORIC AND PROTOHISTORIC SCIENCES

PROCEEDINGS OF THE XVI WORLD CONGRESS (FLORIANÓPOLIS, 4-10 SEPTEMBER 2011)
ACTES DU XVI CONGRÈS MONDIAL (FLORIANÓPOLIS, 4-10 SEPTEMBRE 2011)

VOL. 3

Actes des sessions 36 et 37
Proceedings of sessions 36 and 37



Expressions esthétiques et
comportements techniques
au Paléolithique / Aesthetic
Expressions and Technical
Behaviours in the Palaeolithic Age

Edited by

Marc Groenen

BAR International Series 2496
2013

Published by

Archaeopress
Publishers of British Archaeological Reports
Gordon House
276 Banbury Road
Oxford OX2 7ED
England
bar@archaeopress.com
www.archaeopress.com

BAR S2496

Proceedings of the XVI World Congress of the International Union of Prehistoric and Protohistoric Sciences
Actes du XVI Congrès mondial de l'Union Internationale des Sciences Préhistoriques et Protohistoriques

Secretary of the Congress: Rossano Lopes Bastos
President of the Congress National Commission: Erika Robrahn-González
Elected Bureau (2011-2014):
President: Jean Bourgeois
Secretary General: Luiz Oosterbeek
Treasurer: François Djindjian
Series Editors: Luiz Oosterbeek, Erika Robrahn-González
Volume editors: Marc Groenen

Expressions esthétiques et comportements techniques au Paléolithique / Aesthetic Expressions and Technical Behaviours in the Palaeolithic Age

© Archaeopress and the individual authors 2013

ISBN 978 1 4073 1112 8

The signed papers are the sole responsibility of their authors.
Les textes signés sont de la seule responsabilité de leurs auteurs.

Contacts:

General Secretariat of the U.I.S.P.P. – International Union of Prehistoric and Protohistoric Sciences
Instituto Politécnico de Tomar, Av. Dr. Cândido Madureira 13, 2300 TOMAR
Email: uispp@ipt.pt

Printed in England by Information Press, Oxford

All BAR titles are available from:

Hadrian Books Ltd
122 Banbury Road
Oxford
OX2 7BP
England
www.hadrianbooks.co.uk

The current BAR catalogue with details of all titles in print, prices and means of payment is available free from Hadrian Books or may be downloaded from www.archaeopress.com

CARACTÉRISATION THERMIQUE DES SÉDIMENTS CHAUFFÉS DES FOYERS DE LA GROTTÉ DES FRAUX (DORDOGNE, FRANCE) – MISE EN PLACE D'UNE APPROCHE COUPLÉE ENTRE THERMOLUMINESCENCE, SUSCEPTIBILITÉ MAGNÉTIQUE, EXPÉRIMENTATION ET SIMULATION

Aurélié BRODARD, Pierre GUIBERT, François LÉVÊQUE, Delphine LACANETTE, Vivien MATHÉ,
Albane BURENS & Laurent CAROZZA

Aurélié Brodard, Pierre Guibert : IRAMAT-CRP2A Institut de recherche sur les Archéomatériaux – Centre de Recherche en Physique Appliquée à l'Archéologie, UMR 5060 CNRS – Université de Bordeaux 3, Maison de l'archéologie, Esplanade des Antilles, 33607 Pessac Cedex – aurelie.brodard@gmail.com, guibert@u-bordeaux3.fr

François Lévêque, Vivien Mathé : LIENSs, Littoral, Environnement et Sociétés (LIENSs) UMR 6250 CNRS – Université de La Rochelle, 2 rue Olympe de Gouges, 17000 La Rochelle – francois.leveque@univ-lr.fr, vivien.mathe@univ-lr.fr

Delphine Lacanette : I2M Institut de Mécanique et d'Ingénierie - Equipe GCE et TREFLE, UMR 5295 CNRS – Université de Bordeaux 1, 33400 Talence – lacanette@enscbp.fr

Albane Burens, Laurent Carozza : GEODE, Géographie de l'environnement UMR 5602 CNRS – Université de Toulouse le Mirail, Maison de la Recherche, 5 Allées A. Machado, 31058 TOULOUSE Cedex 9 – albane.burens@univ-tlse2.fr, carozza.laurent@wanadoo.fr

Résumé

Les nombreuses traces de feux visibles au sein de la grotte des Fraux (Dordogne, France) posent des questions sur la fonction du site et sur les conditions de vie des hommes de l'Âge du Bronze à l'intérieur de la grotte. L'étude des foyers est une des voies pour répondre à ces questions. Cet article présente la méthodologie mise en place pour la caractérisation thermique des foyers. Elle est fondée sur l'observation de la thermoluminescence (TL) de grains de quartz (provenant d'échantillons ponctuels) et sur une carte de susceptibilité magnétique, laquelle est principalement portée par les oxydes de fer contenus dans les sédiments. La carte de susceptibilité magnétique permet de repérer et délimiter les zones chauffées. La TL permet d'obtenir une température équivalente maximum (paléotempérature) atteinte par le sédiment, en comparant les courbes TL des échantillons avec celles de références thermiques (réalisées à partir de sédiment de la grotte chauffé en laboratoire selon un cycle thermique arbitraire et reproductible). La tendance observée entre la paléotempérature et la susceptibilité magnétique permet d'exprimer la susceptibilité magnétique comme une fonction de la température. Ces informations nous renseignent sur l'intensité des feux. Des expérimentations de feux et simulations de la propagation de la chaleur ont été réalisées pour observer et comparer l'effet thermique des feux sur le substrat. Cette approche croisée apportera dans le futur des indices pour comprendre la fonction des foyers et à travers elle, la fonction du site.

Abstract

*In the cave of Les Fraux (Dordogne, France), the numerous traces of fires raise the questions of function of the site and of the way of life of the Bronze Age human groups inside the cave. The study of hearths is one possible way to answer those questions. This paper presents the methodology developed for the first time in the cave of les Fraux for the study of hearths. It consists in three parts: (1) the thermal characterization of sediment of the hearth; (2) the experimentation of fires; (3) the simulation of propagation of heat in the sediment. The **thermal characterization** is based on the examination of the thermoluminescence (TL) of quartz grains (from localized samples) and a map of magnetic susceptibility which is mainly brought by iron oxides contained in sediments. First, a map of magnetic susceptibility was built on the surface of the studied hearth and allowed the location of the heated zones. Then samples were extracted from the sediment along gradient of magnetic susceptibility located on the map. After the extraction of quartz grains, measurements of TL gave the paleotemperature attained by the sediment samples. This determination is based on the comparison between 'natural' TL curves of samples and 'simulated natural' TL curves of thermal references. The latter were made by heating, in laboratory, sediment from the cave with the same geological origin than hearth samples. They were heated according to an arbitrary and reproducible thermal cycle: heating at 20°C/min, one hour at the maximal temperature and subsequently cooling at 5°C/min. Thirteen thermal references were created with their maximal temperature ranged between 200°C and 650°C, keeping an unheated sample. The comparison allowed to associate one temperature to each sample. Then, the trend between paleotemperature and magnetic susceptibility permits to express magnetic susceptibility as a function of the paleotemperature and to obtain a map of temperature of the studied hearth. These results give some data about intensity of fires. To compare the fire effect observed on archaeological heated sediment and paleotemperature found, **experimentations of fires** were made. A substratum of sandstones and clay extracted from non-archaeological zones of the cave of Les Fraux was built. Temperatures in different positions and depths were recorded during firing and matched quite well with the surface paleotemperatures of archaeological hearth. Even the changing of sediment color seems to be identical. Finally, some tests of **simulation of heat propagation** were made in a homogeneous substratum. After a validation of the numerical modeling with the*

experimental data, it is possible to observe at different times the propagation of the heat. The methodology based on in situ and laboratory measurements, experimentations and simulations need to be supplement. The thermal characterization of a second hearth is begun, completed by a complete study of magnetic properties of the sediment in order to see if it is possible to obtain a new paleothermometer from magnetic mineralogy. A second step of experimentations of fires in underground environment and simulations in heterogeneous substratum are planned. Finally, it is hope that these reciprocal approaches will give clues to understand the function of the hearths and thus data on occupation of the site.

Mots clés : *expérimentation, foyer, paléotempérature, simulation, susceptibilité magnétique, thermoluminescence (TL)*

Keywords: *experimentation, hearth, magnetic susceptibility, paleotemperature, simulation, TL.*

1. LA GROTTÉ DES FRAUX

1.1. Cadre général

La grotte des Fraux est située en Dordogne, dans le Périgord vert en la commune de Saint-Martin-de-Fressengeas. Cette cavité a été découverte en 1989 par le propriétaire des lieux, M. Edmond Goineaud, lorsqu'il a brusquement vu sa mare disparaître dans une faille, laissant apparaître l'entrée actuelle de la grotte. Le réseau karstique exploré à ce jour s'étend sur plus de 1 km de long en une succession de salles et boyaux où les traces d'occupation sont présentes en quantité variable. L'effondrement de l'entrée de la cavité suite à l'occupation humaine à l'Âge du Bronze a permis de garder en l'état les sols, mobiliers et tracés digités... (Carozza *et al.*, 2009)

Devant cet ensemble complexe mettant en connexion sols archéologiques, foyers, mobiliers et art pariétal, se pose bien entendu la question de la fonction de ce site et du mode d'occupation. Suite à l'étude du mobilier archéologique découvert ainsi qu'à plusieurs datations ¹⁴C sur des charbons provenant du sol, d'un mouchage de torche et de tracés digités, l'occupation a été évaluée de la fin du Bronze moyen au Bronze final (1450-1120 BC ; Carozza, 2010). La conservation exceptionnelle et la faible sédimentation postérieure à cette occupation permet d'accéder aisément aux restes archéologiques et en particulier aux foyers.

1.2. Les foyers

Plus d'une trentaine de foyers a pour le moment été repérée dans la grotte (Carozza, 2010). Compte tenu du nombre important de structures de combustion et de leur inégale répartition dans les galeries, il est évident que la compréhension de leurs fonctions et modes d'utilisation est nécessaire à l'étude du site. Pour aborder la question complexe de la fonction des foyers, les températures atteintes par le sédiment et par là même l'intensité de chauffe des foyers, ont été prises comme point de départ de l'étude.

En se basant sur les effets thermiques du feu sur le substrat une nouvelle méthodologie d'étude des foyers a été mise en place pour estimer les paléotempératures maximales atteintes. Elle couple une cartographie de susceptibilité magnétique et des paléotempératures ponctuelles déterminées par thermoluminescence (TL)

dans le but d'obtenir une carte en température du foyer. L'objectif futur est de retrouver des éléments du cadre de vie des hommes dans la grotte des Fraux en associant les résultats de paléotempératures à des expérimentations et simulations numériques.

2. EXEMPLE D'ÉTUDE DU FOYER F4

Parmi les nombreux foyers présents dans la grotte, une structure construite (foyer F4, secteur 13) a été repérée [fig. 1]. Elle est constituée d'une sole foyère, au cœur d'une zone rubéfiée et parsemée de blocs de grès plus ou moins gros et altérés. Cette zone a notamment été choisie pour mettre en place la méthodologie et établir un protocole de caractérisation de l'ensemble des foyers de la grotte. Après avoir expliqué le protocole suivi pour la caractérisation thermique, nous présenterons les premiers résultats obtenus grâce aux expérimentations et simulations réalisées.

2.1. Vers une carte en température

Cette première étape constitue le fondement de notre étude. La méthodologie de caractérisation thermique mise en place et appliquée au foyer F4 est présentée dans sa globalité, des mesures de terrain de susceptibilité magnétique jusqu'à la carte en température du foyer F4 (pour plus de détails sur les méthodes, les mesures... Brodard *et al.*, à paraître).

Cartographie de susceptibilité magnétique

Une cartographie de susceptibilité magnétique du foyer étudié [fig. 2] est l'étape préalable à toute l'étude. C'est une mesure de contact (susceptibilitémètre KT-9 Exploranium, de volume d'investigation de 5 cm de diamètre et environ 2 cm d'épaisseur) qui donne des indications en temps réel sur la concentration en minéraux magnétiques (oxydes de fer tels que la magnétite ; Cornell et Schwertmann, 2003) contenus dans le sédiment et ainsi sur l'intensité relative de la chauffe subie par ces mêmes sédiments. En effet, une augmentation de température va engendrer des créations et destructions de minéraux magnétiques (Le Borgne, 1955 et 1960 ; Carrancho et Villalain, 2008 et 2011 ; Cudennec et Lecerf, 2005), faisant varier la susceptibilité magnétique et la tendance générale veut que la susceptibilité magnétique augmente avec la température.

Sur la figure 2, trois cœurs de plus forte concentration en minéraux magnétiques, donc avec une intensité de chauffe relative plus élevée, apparaissent. Ils correspondent à la sole foyère (C), à une zone fortement rubéfiée (A), et à une zone sans spécificité visible (B).

Prélèvements

Sur la base de cette cartographie de susceptibilité magnétique, des prélèvements [fig. 2] ont été réalisés suivant des gradients de susceptibilité magnétique donc, a priori, de température. Ces prélèvements ont été effectués sur le premier centimètre d'épaisseur de sédiment.

Du sédiment de la grotte, non chauffé, a aussi été prélevé pour réaliser des références thermiques. En effet, la détermination des températures est basée sur la comparaison entre le signal de TL de références thermiques et celui des échantillons du foyer.

Paléotempératures

Pour constituer les références thermiques à partir du sédiment non chauffé, il faut simuler :

- *La chauffe archéologique* : pour cela, le sédiment est chauffé suivant un cycle thermique précis : une chauffe d'une petite quantité de sédiment dans un four à 20°C/min, un palier de 1h à la température maximale puis un refroidissement à 5°C/min environ (cycle thermique choisi proche de celui d'un feu réel, (Canti et Linford, 2000; Carrancho et Villalain, 2011; Werts et Jarhen, 2007). 13 références ont ainsi été créées avec des températures maximales qui s'échelonnent entre 200°C et 650°C et un témoin non chauffé.
- *Le temps écoulé depuis cette chauffe* : après extraction des grains de quartz, une irradiation bêta simule sur les références l'irradiation qu'elles auraient reçue si elles avaient chauffé il y a 3300 ans environ, suivie d'un préchauffage.

Le signal TL des références montre une évolution marquée suivant la température maximale choisie [fig. 3], phénomène observé dans de précédentes études (Valladas, 1981; Roque, 2004; Duttine, 2005). C'est cette variation de forme et d'intensité qui permet d'utiliser la TL du quartz comme un paléothermomètre. Le signal TL simulé sur les références thermiques est ensuite comparé au signal TL des échantillons du foyer. Les paléotempératures obtenues seront des températures « équivalentes » puisque dépendantes du cycle thermique de référence. De plus le foyer est considéré dans son état final avec des réutilisations probables mais qu'il n'est pas possible de prendre en compte ici. Cette comparaison se fait visuellement dans un premier temps puis est confirmée par une classification hiérarchique des prélèvements et des références. Chaque prélèvement est ainsi associé à une paléotempérature.

Carte en température

En prenant en compte la susceptibilité magnétique de chaque prélèvement, on note que l'augmentation de la susceptibilité magnétique est corrélée à l'augmentation de la température. Il est alors possible de coupler les paléotempératures avec la cartographie de susceptibilité magnétique du foyer permettant d'obtenir une carte en température du foyer F4 [fig. 4].

Les trois cœurs de chauffe sont maintenant repérés par des variations « chiffrées » d'intensité de la chauffe. La sole (C) apparaît comme la plus chauffée (à 600°C et plus) ainsi que la zone B qui atteint aussi des températures fortes. La zone rubéfiée (A) a chauffé mais de manière plus modérée autour de 500°C.

Pour compléter ces informations thermiques et pour pouvoir aller plus loin dans l'interprétation de l'utilisation de ces foyers, la comparaison des résultats d'intensité avec celles de feux expérimentaux est nécessaire.

2.2. Expérimentations

L'objectif de ces feux est avant tout de comparer les effets de la chauffe sur le substrat entre feux archéologiques et feux expérimentaux afin d'établir une classification des feux suivant leur taille, leur intensité de chauffe, les quantités de combustibles nécessaires...

Mise en œuvre d'un feu expérimental

Un des feux expérimentaux reprend la configuration du foyer F4, c'est-à-dire un substrat gréseux (grossier en profondeur, puis plus fin en surface) et une sole d'argile déposée dessus, ces matériaux provenant de zones non archéologiques de la grotte. Ce foyer a été instrumenté au fur et à mesure de sa construction par une vingtaine de thermocouples (Chromel-Alumel) répartis en surface et en profondeur [fig. 5] et reliés à une chaîne d'acquisition permettant d'obtenir en temps réel les variations de températures dans le substrat.

Quatre chauffes successives de quelques heures chacune ont été menées sur trois jours.

Apports de l'expérimentation

Un des apports principaux de ces feux est tout d'abord dans l'aspect pratique de la *construction d'un foyer*. En effet, ces feux sont le préliminaire à d'autres qui seront réalisés en milieu souterrain. Il était nécessaire de quantifier la quantité d'argile et de grès nécessaires au support ainsi que le volume de combustible consommé (ici la consommation était de 7.3 kg de châtaigner sec par heure).

Les chauffes ont engendré des *rubéfections* tout à fait comparables à celles des foyers archéologiques tant au niveau de l'argile que du grès.

Les relevés de température en surface comme en profondeur sont aussi riches en renseignement [fig. 6]. La première observation, qui semble évidente, est la présence d'un palier des températures à 100°C au sein du substrat tant que ce dernier n'est pas sec. Par exemple, il faut presque 30 min de feu pour que la température du sédiment à 2 cm de profondeur passe au-delà de 100°C. Cette constatation permet de souligner l'importance de l'humidité des sédiments au moment de la chauffe et son contrôle sur les températures atteintes.

Sinon, les températures en surface atteignent en général 600°C à 700°C, 400°C à 500°C à 2 cm de profondeur, 200°C à 300°C à 4 cm, 200°C à 6 cm et sont inférieures à 200°C au plus profond (15 cm).

Par ailleurs, lors du démontage de la structure expérimentale, de l'argile et du grès ont été prélevés à l'emplacement de certains thermocouples. Ces sédiments ayant ainsi une histoire thermique connue, leur signal TL sera mesuré et permettra d'estimer la correspondance entre cycle thermique réel et température équivalente.

Ces mesures de températures sont une source d'information quand à la propagation de la chaleur dans un milieu hétérogène et une base de données pour la simulation numérique de ce phénomène.

2.3. Simulation

Une phase de simulation numérique des transferts de chaleur dans le substrat est en cours. Elle utilise le code Thétis développé au département TREFLE du laboratoire I2M. Les premiers tests présentés ici ont consisté à observer la propagation de l'onde de chaleur dans un milieu homogène en modifiant la conductivité thermique du milieu pour retrouver les mesures de températures expérimentales.

Une sole de 2 cm d'épaisseur est chauffée à 600°C (température issue des expérimentations) et on observe la distribution de température dans le milieu (2 m de large sur 15 cm de profondeur) en fonction du temps.

La figure 7 montre cette propagation après 30 min, 1h et 3h de chauffe.

Ces premières simulations montrent le potentiel d'un modèle numérique adapté à nos besoins. Après ce test en milieu homogène, il est prévu de se rapprocher de la réalité et de réaliser des simulations dans un milieu hétérogène comparable à la configuration du feu expérimental, à savoir un assemblage de grès grossier, surmonté par une couche de grès fins et sur laquelle une sole est posée.

Un second aspect de la simulation numérique dans le cadre de la grotte des Fraux est la propagation de la chaleur dans le sol et l'air afin de simuler l'influence de l'allumage d'un ou plusieurs foyers sur l'atmosphère de la grotte. Suivant leur emplacement, leur intensité supposée et leur effet (chaleur, lumière, fumée) peut-être sera-t-il

possible de remonter à une ou plusieurs fonctions des foyers.

3. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Au sein de la grotte des Fraux, le couplage entre thermoluminescence et susceptibilité magnétique a montré son potentiel pour l'obtention de données de températures de la surface d'un foyer. Les premières expérimentations apportent des éléments de comparaison quant à la propagation de la chaleur dans le substrat. Les simulations offrent un cadre théorique et des possibilités de tests pour des paramètres tels que la température de chauffe en surface, la surface chauffée...

La méthodologie développée à la grotte des Fraux est transposable à d'autres sites archéologiques. Par contre il est nécessaire, pour tout nouveau site, de recréer un référentiel thermique propre au matériau substrat local.

Un second foyer est étudié par le couplage susceptibilité magnétique / thermoluminescence. Les sédiments de ce foyer font par ailleurs l'objet d'une étude de leurs propriétés magnétiques afin de mieux comprendre les évolutions minéralogiques qui interviennent avec la chauffe et ainsi appréhender au mieux le lien entre variation de susceptibilité magnétique et augmentation de température.

Les expérimentations réalisées en plein air vont être complétées par des feux en milieu souterrain pour voir l'influence d'un milieu confiné sur les températures atteintes dans le substrat mais aussi dans l'air et sur les parois. Nous observerons aussi l'influence du confinement sur la combustion, la chaleur et la lumière émises, les fumées dégagées.

Une seconde phase de simulation sera nécessaire à l'échelle de la grotte des Fraux pour étudier l'influence de l'allumage d'un ou plusieurs feux sur l'atmosphère interne de la cavité, sur les circulations d'air...

Cette approche couplant des mesures de terrain, de laboratoire, des expérimentations et de la simulation permettra, nous l'espérons, d'obtenir *in fine* des informations sur la fonction des foyers et la possibilité de leur utilisation simultanée et ainsi sur le mode d'occupation de la grotte des Fraux par les hommes de l'Âge du Bronze.

BIBLIOGRAPHIE

- BRODARD A., GUIBERT P., LEVEQUE F., MATHE V., CAROZZA L., BURENS A., à paraître. Research on thermal characterization of hearths from the Bronze Age in the Cave of Les Fraux (St Martin de Fressengeas, Dordogne, France) by thermoluminescence and magnetic susceptibility, *Archéosciences*.
- CANTI M.G., LINFORD N., 2000. The effects of fires on archaeological soils and sediments: temperature and colour relationships. *Proceedings of the Prehistoric Society*, 66, p. 385-395.
- CAROZZA L., BURENS A., BILLAUD Y., FERULLO O., BOURRILLON R., PETROGNANI S., TOSELLO G., GOINEAUD E. & M., 2009. L'horizontal et le vertical - L'Âge du Bronze de la grotte des Fraux (Saint-Martin-de-Fressengeas - Dordogne), dans : *De méditerranée et d'ailleurs... Mélanges offerts à Jean Guilaine: Archives d'Ecologie Préhistorique*, Toulouse, p. 159-172, 8 fig.
- CAROZZA L., 2010. *L'Âge du Bronze de la grotte des Fraux - Saint-Martin-de-Fressengeas (Dordogne) : rapport de fouille programmée tri-annuelle 2008-2010, troisième année*, Service Régional de l'Archéologie d'Aquitaine, Bordeaux.
- CARRANCHO A., VILLALAIN J.J., 2008. Estudio experimental de las transformaciones en la mineralogía magnética en fuegos prehistóricos y sus implicaciones en Arqueomagnetismo, *Geotemas*, 10, p. 1-4.
- CARRANCHO A., VILLALAIN J.J., 2011. Different mechanisms of magnetization recorded in experimental fires: Archaeomagnetic implications. *Earth and Planetary Science Letters*, 312, p. 176-187.
- CORNELL R.M., SCHWERTMANN U., 2003. *The Iron Oxides. Structure, Properties, Reactions, Occurrences and Uses*, VCH Ed., 573 p.
- CUDENNEC Y., LECERF A., 2005. Topotactic transformations of goethite and lepidocrocite into hematite and maghemite, *Solid State Sciences*, 7, p. 520-529.
- DUTTINE M., GUIBERT P., PERRAUT A., LAHAYE C., BECHTEL F., VILLENEUVE G., 2005. Effects of thermal treatment on TL and EPR of flints and their importance in TL-dating: application to French Mousterian sites of Les Forêts (Dordogne) and Jiboui (Drôme), *Radiation Measurements*, 39, p. 375-385.
- LE BORGNE E., 1955. Susceptibilité magnétique anormale du sol superficiel, *Annales de Géophysique*, 11, p. 399-419.
- LE BORGNE E., 1960. Influence du feu sur les propriétés magnétique du sol sur celles du schiste et du granite, *Annales de Géophysique*, 16, p. 159-196.
- ROQUE C., GUIBERT P., DUTTINE M., VARTANIAN E., CHAPOULIE R., BECHTEL F., 2004. Dependence of luminescence characteristics of irradiated quartz with the thermal treatment and consequences for TL dating, *Geochronometria - Journal on Methods and Applications of Absolute Chronology*, 23, p. 1-8.
- VALLADAS H., 1981. Thermoluminescence de grès de foyers préhistoriques : estimation de leur température de chauffe, *Archaeometry*, 23, p. 221-229.
- WERTS S. P., JARHEN A.H., 2007. Estimation of temperature beneath archaeological campfires using carbon stable isotope composition of soil organic matter, *Journal of Archaeological Science*, 34, p. 850-857.



*Figure 1. Foyer F4, Secteur 13 de la grotte des Fraux.
© A. Burens. Photographie publiée avec la permission de M. Goineaud, propriétaire de la grotte.
Hearth F4, Sector 13 of the cave of Les Fraux.*

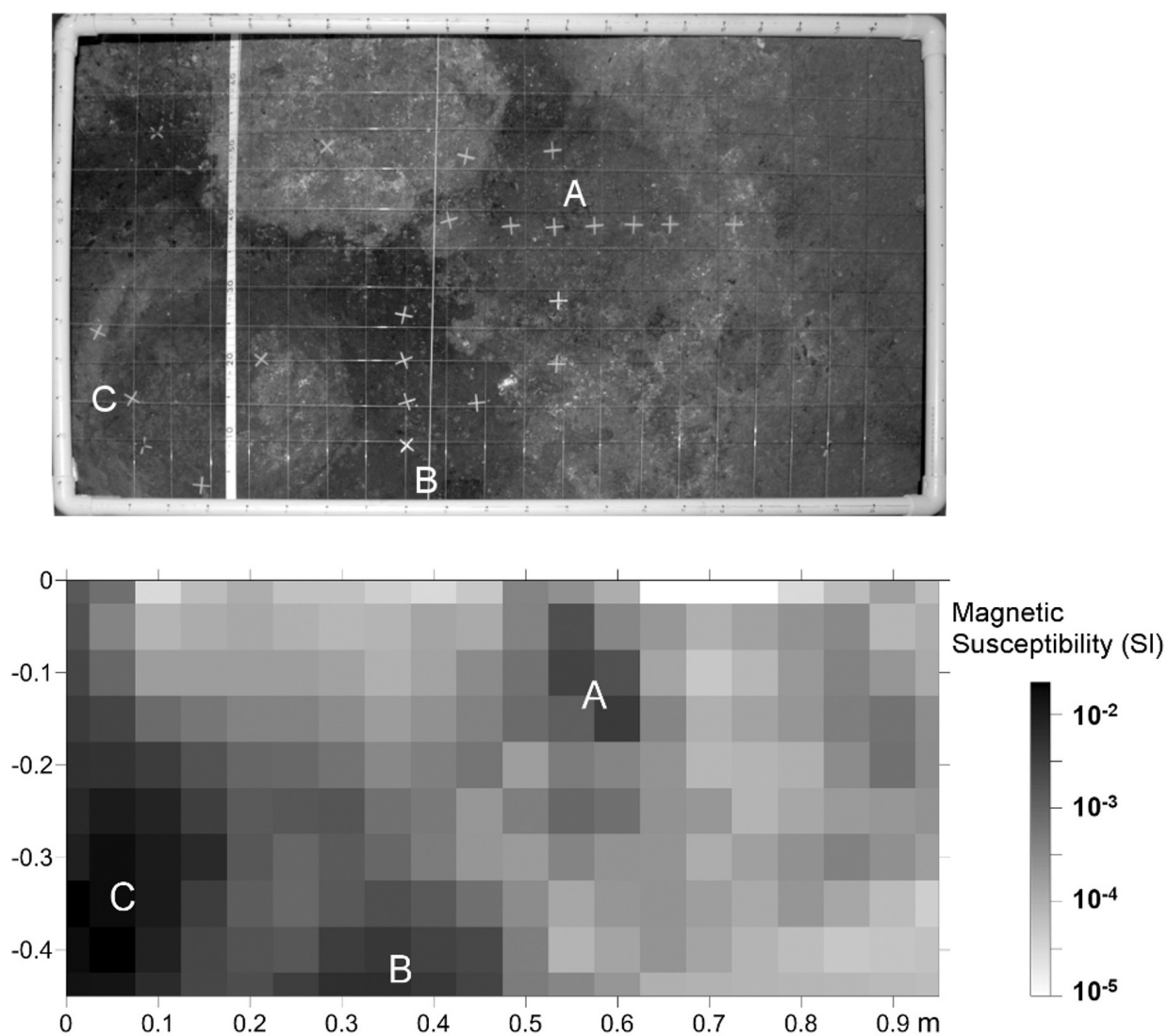


Figure 2. Foyer étudié et carte de susceptibilité magnétique du foyer F4.

Trois zones de forte susceptibilité magnétique sont visibles (A : zone rubéfiée, B : pas de caractéristiques visuelles, C : sole foyère). Les croix blanches représentent la position des prélèvements.

Studied hearth and magnetic susceptibility mapping conducted in the area of the fire F4.

Three places with strong magnetic susceptibility are visible (A: reddened area, B: no specific visual characteristics, C: built hearth). Samples are located by the white crosses.

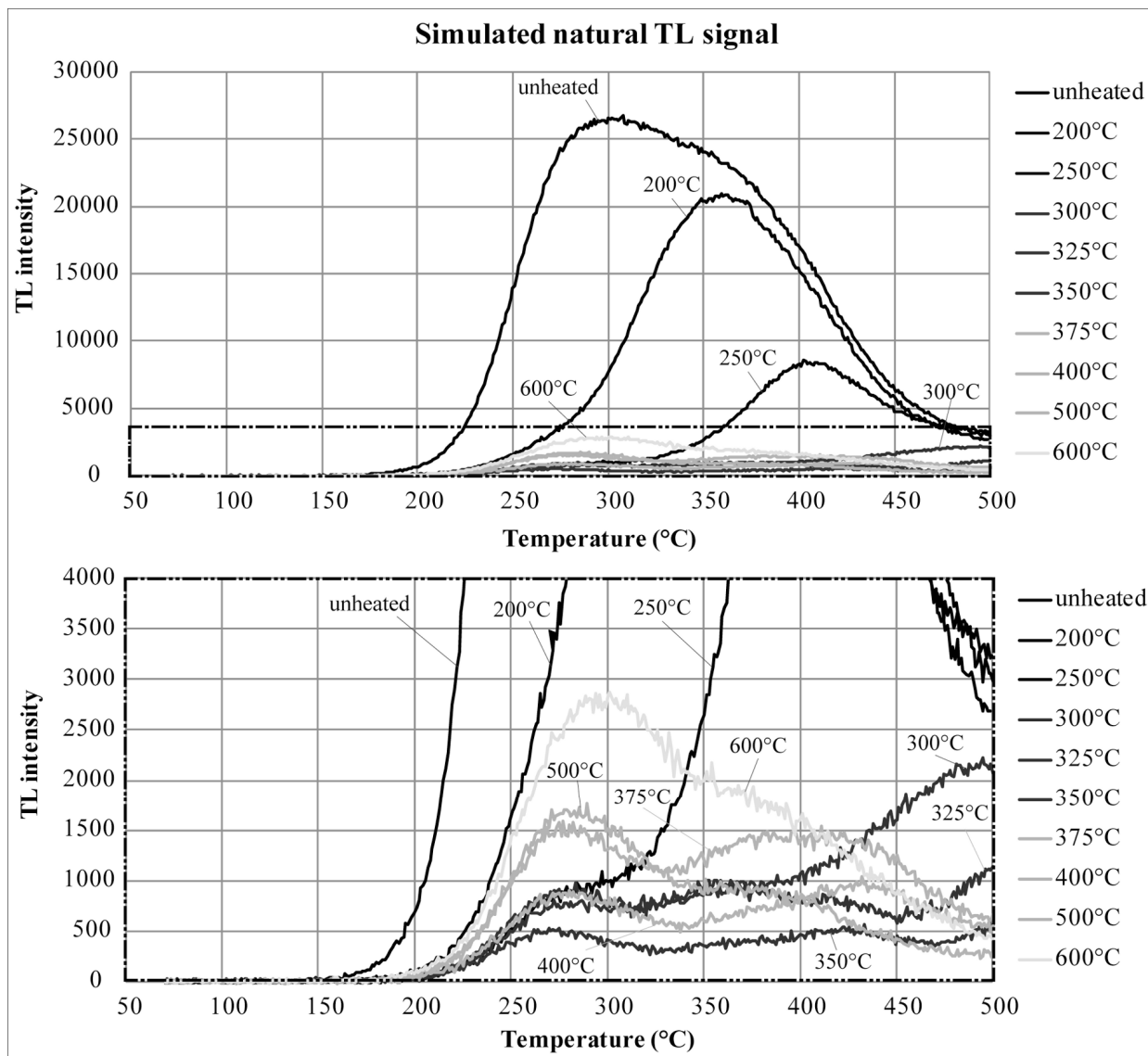


Figure 3. Variation du signal TL simulé des références thermiques. L'intensité et la position des pics varient et en particulier les références chauffées à moins de 300°C se distinguent par une forte intensité.
 Evolution of simulated TL signal of thermal references. Intensity and peak position both vary; particularly references heated below 300°C have a strong intensity.

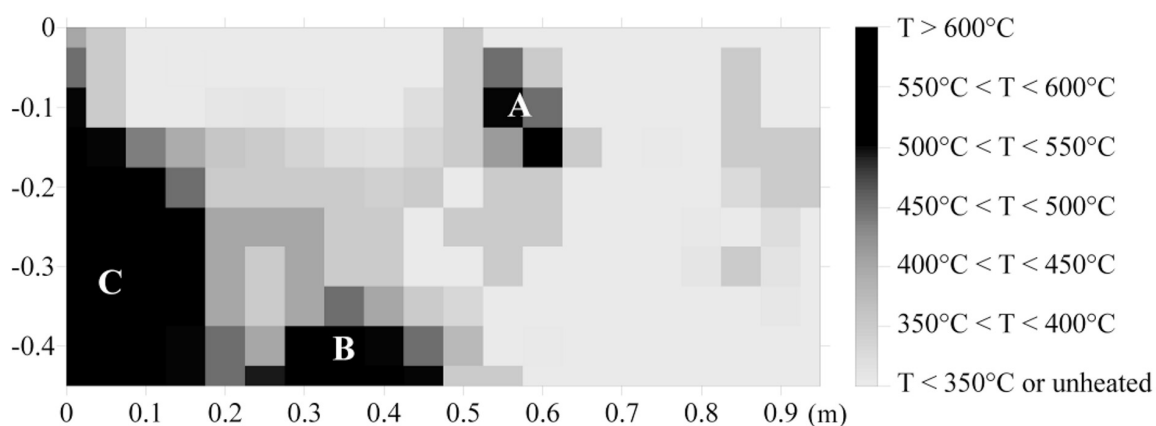


Figure 4. Carte en température du foyer F4 où les températures des trois zones chauffées sont précisées.
Map of temperature of the studied hearth: the three heated places have temperature data.

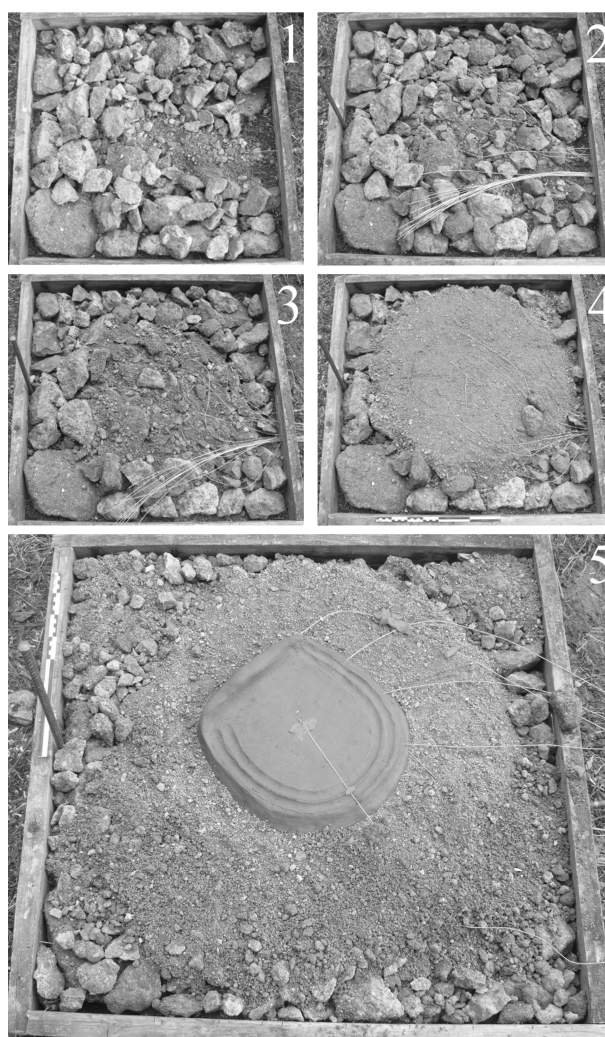


Figure 5. Étapes de construction du foyer expérimental dans un cadre de 1 m de côté et de 15 cm de profondeur.
Les thermocouples sont disposés entre chaque couches : au fond du cadre, sur les blocs grossiers, sur de grès broyé grossièrement, sur du grès broyé finement, dans et sur la sole.
Steps of construction of the experimental fire (1m side and 15cm deep). Thermocouples are put between each layer: in the bottom, on blocs of sandstone, on sandstone roughly crushed, on sandstone finely crushed, on and into the built hearth.

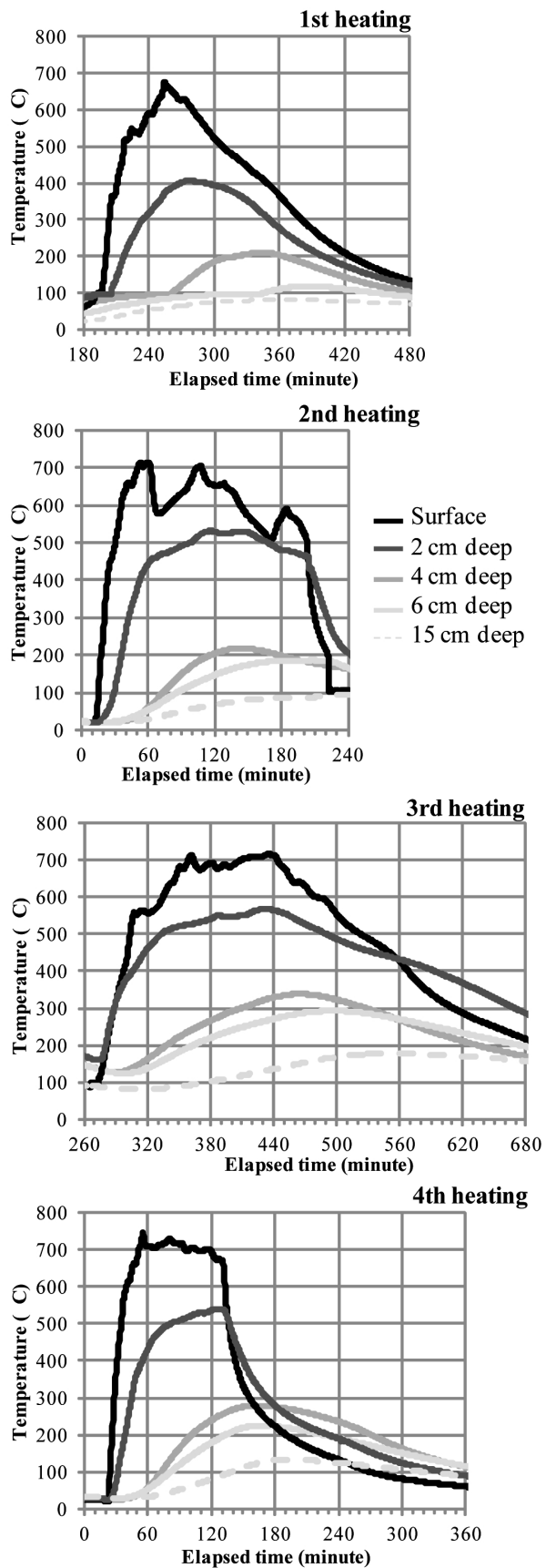


Figure 6. Courbes de températures enregistrées à différentes profondeurs dans le substrat. Temperatures recorded at different depths in the substratum.

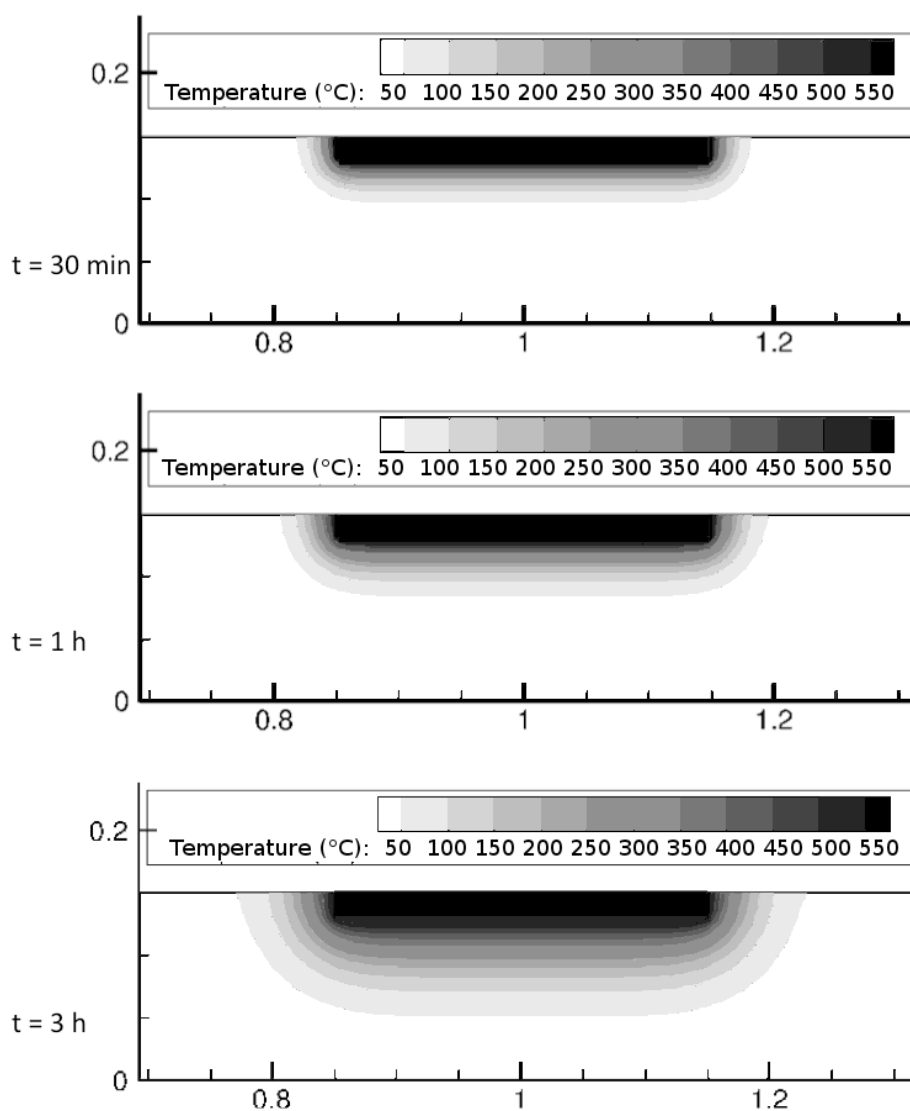


Figure 7. Simulation de la propagation de la chaleur dans un milieu homogène. Une sole de 2cm d'épaisseur est chauffée à 600°C et on observe la propagation de la chaleur au bout de (par exemple) 30 min, 1h et 3h.
Simulation of heat propagation in a homogeneous substratum. A built hearth of 2cm thick is heated at 600°C and we observe the heat propagation after 30 min, 1h and 3h for instance.