



HAL
open science

Apports de la numérisation 3D multi-échelle à l'étude intégrée de la grotte ornée des Fraux (Dordogne)

Albane Burens-Carozza, Francois Leveque, Pierre Grussenmeyer, Laurent Carozza, Delphine Lacanette, Yves Billaud, Samuel Guillemin, Vivien Mathé, Raphaëlle Bourrillon, Stéphane Petrognani, et al.

► **To cite this version:**

Albane Burens-Carozza, Francois Leveque, Pierre Grussenmeyer, Laurent Carozza, Delphine Lacanette, et al.. Apports de la numérisation 3D multi-échelle à l'étude intégrée de la grotte ornée des Fraux (Dordogne). *Karstologia*, 2015, *Karst, grottes et 3D*, 1 (63). <halshs-01235342>

HAL Id: halshs-01235342

<https://shs.hal.science/halshs-01235342v1>

Submitted on 10 Dec 2020

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.



HAL Authorization

Albane BURENS¹,
François LÉVÊQUE²,
Pierre GRUSSENMEYER³,
Laurent CAROZZA¹,
Delphine LACANETTE⁴,
Yves BILLAUD⁵,
Samuel GUILLEMIN³,
Vivien MATHÉ²

avec la collaboration de
Raphaëlle BOURRILLON⁶,
Stéphane PETROGNANI⁷
et Carole DUDOGNON⁶

Apports de la numérisation 3D multi-échelle à l'étude intégrée de la grotte ornée des Fraux (Dordogne)

RÉSUMÉ : Depuis sept années, une équipe interdisciplinaire conduit l'étude intégrée d'un réseau souterrain occupé durant l'âge du Bronze, dans le cadre d'un Site d'Étude en Ecologie globale du CNRS (INEE) et d'une fouille programmée soutenue par le Ministère de la Culture. La grotte des Fraux (Saint-Martin-de-Fressengeas, Dordogne), inscrite aux Monuments Historiques depuis 1995, constitue l'unique site protohistorique d'Europe associant en un même lieu des témoignages d'activités domestiques, spirituelles et artistiques. La grotte, dont l'effondrement de l'entrée est intervenu à la fin de l'âge du Bronze, a permis la préservation des vestiges durant plus de 2,5 millénaires. La cavité semble avoir fait l'objet d'occupations de courtes durées, répétées, dans un intervalle de temps compris entre 1450 et 1150 BC comme l'indiquent les datations radiocarbone. La cavité forme un vaste réseau de galeries, caractérisé par l'exceptionnelle richesse de ses vestiges archéologiques : une trentaine de dépôts de mobilier céramique et métallique, de nombreuses représentations pariétales (gravures, incisions, tracés digités, pigments...) ainsi qu'une soixantaine de structures de combustion. L'étude en cours se déroule dans le cadre d'un observatoire du CNRS dont l'objectif est le développement de nouvelles méthodologies et d'études expérimentales dans le domaine de l'écologie globale. Dans ce cadre, la modélisation 3D de la grotte constitue le support de travail commun aux diverses études, conduites sur le site à différentes échelles, par près de quarante chercheurs et étudiants. Dans ce

contexte, un partenariat scientifique avec l'INSA de Strasbourg permet à l'équipe de développer, de manière interdisciplinaire, de nouvelles méthodes d'acquisition de données, basées sur des techniques de mesures sans contact. Ce travail a permis l'acquisition d'une documentation 3D complète, respectant l'intégrité du site, ainsi que la réalisation d'un système d'information géographique 3D (en cours). L'objet de cet article est de présenter les différentes techniques utilisées à la grotte des Fraux dans le but de générer un modèle 3D géométrique du réseau, capable d'associer les informations hétérogènes et multiscalaires issues des différentes études conduites sur le site. Nous mettrons l'accent sur les récents développements méthodologiques réalisés dans le domaine de l'imagerie 3D du champ magnétique, puis concluons en évoquant quelques exemples de projets de modélisation sur la base du tout nouveau modèle 3D du réseau.

MOTS-CLÉS : grotte ornée, âge du Bronze, archéologie, numérisation 3D, lasergrammétrie, photogrammétrie, modélisation 3D, imagerie 3D du champ magnétique, art pariétal, Dordogne, France.

ABSTRACT: MULTI-SCALE 3D RECORDING FOR THE GLOBAL STUDY OF THE DECORATED CAVE OF LES FRAUX (DORDOGNE). For six years, an interdisciplinary team carried out the study of a Bronze Age underground network. This program has been labelled by the Institute of Ecology and Environment of the French Research Council (CNRS), who wants to promote new methodologies and

experimental studies in Global Ecology. It takes advantage of the support of the French Ministry of Culture. The archaeological cave of Les Fraux (Saint-Martin-de-Fressengeas, Dordogne) is the only protohistorical site in Europe wherein are gathered testimonies of domestic, spiritual and artistic activities. Fortunately, the cave was closed at the end of the Bronze Age, following to the collapse of its entrance. The site is currently registered in the French Historical Monuments. The cave forms a wide network of galleries, characterized by the exceptional richness of its archaeological remains such as ceramic and metal deposits, numerous parietal representations (engravings or fingerings incised in the clay-walls and paintings sometimes in association with deposits) and about sixty domestic fireplaces. In that framework, 3D models of the cave constitute the common work support and the best way for scientific communication for the various studies conducted on the site by nearly forty researchers. In this specific context, a partnership among archaeologists and surveyors from INSA Strasbourg allows the team to develop, in an interdisciplinary way, new methods of data acquiring based on contact-free measurements techniques in order to acquire a full 3D-documentation and a 3D GIS (work in progress). The aim of this paper is to display a statement of 6 years of 3D-recording in the cave and to display recent methodological developments as for the integration of heterogeneous data in 3D models (i.e. magnetic field recording combined with the 3D models in order to locate magnetic anomalies in the cave). Finally, we attempt to present work in progress as to 3D-modelling and simulating.

KEYWORDS: decorated Cave, Bronze Age, Archaeology, 3D Recording, Terrestrial Laser Scanner (TLS), Photogrammetry, 3D Modelling, 3D Magnetic Field Mapping, Rock Art, Dordogne, France.

(1) Laboratoire de Géographie Environnementale, CNRS, UMR 5602 GEODE, Toulouse (albane.burens, laurent.carozza)@univ-tlse2.fr

(2) UMR 7266 LIENSs, CNRS, Université de La Rochelle, La Rochelle (fleuveque, vmathe)@univ-lr.fr

(3) INSA de Strasbourg, Spécialité Topographie, Laboratoire ICube, Equipe TRIO, UMR 7357, Strasbourg - (pierre.grussenmeyer, samuel.guillemine)@insa-strasbourg.fr

(4) UMR 5295, Institut de mécanique et d'ingénierie I2M, Université de Bordeaux 1 lacanette@enscbp.fr

(5) MCC / DRASSM Marseille et EDYTEM UMR 5204 Le Bourget-du-Lac - yves.billaud@culture.gouv.fr

(6) UMR 5608 TRACES, Toulouse - r.bourrillon@gmail.com et carole.dudognon@dbmail.com

(7) UMR 7041 ArScan, Nanterre stephanepetrognani@yahoo.fr

Introduction

L'objet de cet article est de présenter les différentes techniques utilisées depuis 2008 à la grotte des Fraux dans le but de générer un modèle 3D géométrique du réseau, capable d'associer les informations hétérogènes et multiscalaires issues des différentes études conduites sur le site. Ce modèle est conçu comme un support de recherche et d'interprétation commun à l'ensemble des partenaires de ce programme de recherche interdisciplinaire. Nous présenterons en premier lieu la méthodologie mise en œuvre pour numériser en 3D ce vaste réseau souterrain occupé durant l'âge du Bronze, en respectant les conditions de pré-

servation du site : techniques de mesures sans contact fondées sur l'association lasergrammétrie / photogrammétrie. Nous exposerons ensuite un exemple d'application inédit et innovant, tirant parti du modèle 3D de la grotte, à savoir l'imagerie 3D du champ magnétique. Pour conclure, nous évoquerons la teneur des travaux de recherche qui s'engagent aux Fraux, au moment où la phase d'acquisition des données touche à sa fin.

I. La grotte des Fraux : un site archéologique couplé à un observatoire de l'INEE

A. Présentation du site

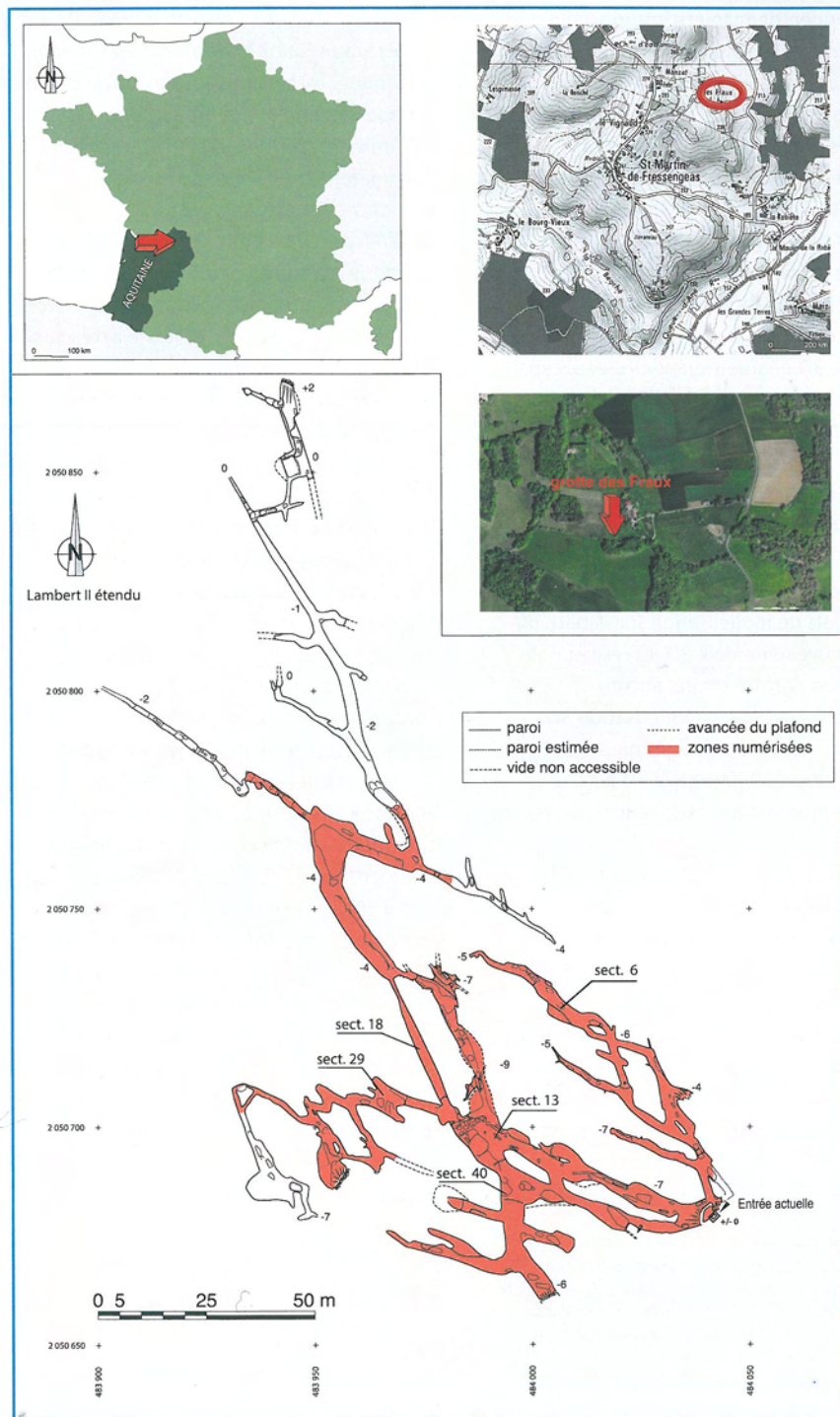
La grotte ornée des Fraux est localisée, dans le Parc naturel régional du Périgord-Limousin, sur la commune de Saint-Martin-de-Fressengeas (Dordogne) (figure 1). Cette cavité constitue, pour la France, l'un des rares cas de grotte ornée datée de l'âge du Bronze [Carozza et al., 2009]. La grotte des Fraux associe, en un même lieu, des témoignages d'activités domestiques, symboliques et artistiques. Aucune pratique funéraire n'y est attestée.

La grotte, découverte en 1989, est inscrite aux Monuments historiques depuis 1995. Elle forme un vaste réseau souterrain de galeries étroites orientées nord-ouest/sud-est, se développant sur plus d'un kilomètre de long. Elle présente, depuis l'entrée actuelle, deux galeries principales qui forment des méandres sinueux (figure 1). Ces dernières se ramifient horizontalement en boyaux et diverticules. Les plans existants montrent que l'on a quasiment affaire à un réseau maillé avec deux orientations préférentielles : N110° à N120° pour la principale et N150° à N160° pour la secondaire.

Surnommée « Le Lascaux de l'âge du Bronze » par les médias au moment de sa découverte, la grotte des Fraux se caractérise par l'exceptionnelle richesse des vestiges archéologiques qui y ont été mis au jour. L'effondrement de l'entrée de la cavité à la fin du second millénaire avant notre ère a induit l'excellent état de préservation du site. Représentations pariétales, dépôts de mobilier céramique et métallique, et témoignages d'occupations domestiques sont demeurés intacts (figure 2).

Le recouplement opéré entre datations radiocarbone et données chrono-culturelles permet de réduire la période de fréquentation de la grotte à un court intervalle de trois siècles, compris entre le Bronze Moyen et le Bronze final (1450-1150 BC). Aucune occupation anthropique antérieure au Bronze moyen ou postérieure au Bronze final n'a été mise en évidence. Le réseau semble avoir fait l'objet

Figure 1 : Localisation de la grotte des Fraux (Saint-Martin-de-Fressengeas, Dordogne, France) et plan du réseau souterrain (relevé : Y. Billaud 2013).
Location of the Bronze Age cave of Les Fraux (Saint-Martin-de-Fressengeas, Dordogne, France) and map of the underground network (survey: Y. Billaud 2013).



de courtes fréquentations, répétées dans les temps, au cours de ces trois siècles.

Des traces d'occupations anthropiques ont pu être inventoriées sur près de 70 % de la surface de la cavité : sols archéologiques, aménagements domestiques (marches d'escalier creusées dans l'argile, trous de torche aménagés dans les parois, trous de piquets...). L'équipe a pu inventorier une soixantaine de foyers, souvent de petites dimensions. Les étroites galeries de la grotte ont également livré plus de trente dépôts de mobilier céramique et métallique (figure 2). Les céramiques constituant ces dépôts portent d'évidentes traces d'usure et d'utilisation. Si 18 dépôts de mobilier ont été placés dans la grotte de façon visible, voire ostentatoire, 14 autres ont en revanche été intentionnellement dissimulés au regard des visiteurs. Un nombre suffisamment significatif de ces dépôts a été retrouvé étroitement associé à des panneaux ornés. L'association de ces deux types de vestiges plaide en faveur d'un acte délibéré.

De nombreux motifs ont été tracés dans l'argile meuble recouvrant les parois et, plus rarement, le plafond de

la grotte. Parfaitement préservés, ces tracés schématiques et géométriques n'offrent qu'une faible variété stylistique et technique [Petrognani et al., 2014]. La plupart correspondent à des tracés digités (figure 3) ou bien à de fines gravures réalisées à l'aide d'outils métalliques ou en bois (on note cependant le recours ponctuel au pigment ou à la barbotine). Les premiers indices tendent à montrer que les expressions pariétales dateraient préférentiellement du Bronze moyen (un charbon de bois prélevé dans un tracé digité réalisé dans l'argile d'un panneau du secteur 18 a pu être daté par ^{14}C).

Rappelons que la Grotte des Fraux constitue un *unicum* et que, si d'autres grottes contemporaines peuvent présenter certaines similarités (dépôts de mobilier, vestiges d'occupations domestiques), les points de divergence sont importants : absence de vocation funéraire ; présence de représentations pariétales... Nous pouvons toutefois opérer des rapprochements stylistiques avec la grotte de Rouffignac en Dordogne [Barrière 1983] qui présente, dans un contexte chronologique moins bien assuré, des motifs digités proches de ceux mis au jour aux Fraux.

B. Contexte scientifique

Toute la difficulté de l'étude de l'occupation humaine du réseau des Fraux réside dans la compréhension de son statut (domestique vs. symbolique ou rituel) et dans la perception de la chronologie des fréquentations. L'une des clés de sa compréhension tient dans la mise en œuvre d'une démarche intégrée et interdisciplinaire, promouvant l'usage de techniques non invasives (conservation) et le recours à un support collectif de travail permettant l'agrégation de données hétérogènes issues de différentes disciplines : la 3D. C'est dans cette perspective que, depuis 2007, un programme de recherche interdisciplinaire a été mis en place autour de la grotte des Fraux. L'étude du site s'inscrit dans le cadre d'une fouille archéologique programmée financée par le Ministère de la Culture et de la Communication (SRA Aquitaine). Elle bénéficie depuis 5 ans du soutien de l'Institut en Écologie et en Environnement du CNRS via la création du « Site d'Etude en Ecologie Globale ». Cet observatoire d'un nouveau type, dont l'objectif premier est l'étude des interactions entre les sociétés de l'âge



Figure 2 : Grotte des Fraux : photographies de dépôts de mobilier céramique et métallique des secteurs 6 (à gauche) et 18 (au milieu et à droite). Clichés A. Burens. Cave of Les Fraux: views of ceramic and metal deposits from the sectors 6 (on the left) and 18 (in the middle and on the right).



Figure 3 : Grotte des Fraux : tracés digités des secteurs 13 (à gauche et au milieu) et 8 (à droite). Clichés R. Bourrillon, A. Burens. Cave of Les Fraux: views of fingerings engraved into the clayey-walls from sectors 13 (on the left and in the middle) and 8 (on the right).

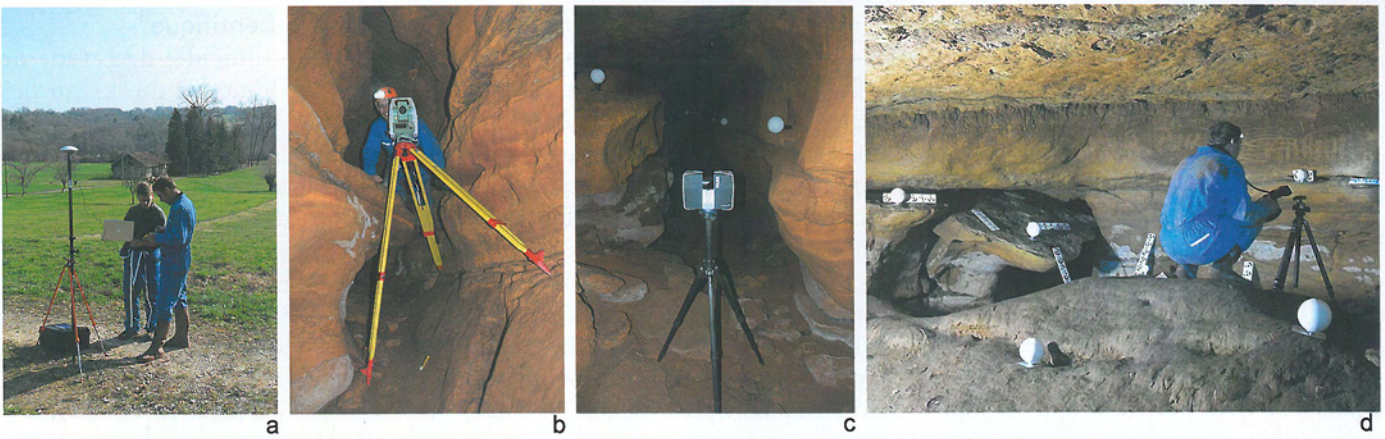


Figure 4 : Techniques de topographie et de numérisation 3D utilisées sur le site.

a : enregistrement de points géodésiques à l'extérieur de la grotte par GNSS différentiel ;

b : création d'un canevas polygonal à l'aide d'une station totale ; c : numérisation 3D de la grotte par laser scanner terrestre (Faro Focus) ;

d : photogrammétrie multi-images (images parallèles et convergentes). Clichés A. Burens.

Surveying and 3D-recording techniques used on the site.

a: measurements of geodetic points outside the cave by differential GNSS techniques;

b: creation of the polygonal network of the cave using a total station;

c: 3D-recording by terrestrial Laser Scanner (Faro Focus);

d: multi-image close-range photogrammetry (parallel and convergent pictures).

du Bronze et leur environnement, favorise le développement de nouvelles méthodes d'acquisition de données ainsi que la conduite d'approches expérimentales dans le domaine de l'écologie globale. Il fédère une équipe largement interdisciplinaire rassemblant archéologues, topographes, archéomètres, pariétalistes, paléo-environmentalistes...

II. Mise en œuvre d'une numérisation multi-échelle

Dès l'amorce du programme d'étude de la grotte des Fraux, nous avons entrepris l'acquisition d'un modèle géométrique 3D global du réseau, à même d'agréger des informations hétérogènes et multiscalaires issues des différentes études conduites sur le site (archéologie, paléo-écologie, art pariétal, climatologie, archéométrie...). Ce modèle, à l'image du SIG 3D en cours de constitution, est conçu comme un support de recherche et d'interprétation commun à l'ensemble des partenaires de ce programme de recherche interdisciplinaire.

Actuellement, la plupart des projets de numérisation de grottes archéologiques combinent balayage laser et photogrammétrie terrestre [Lerma et al., 2010 ; Gonzalez-Aguilera et al., 2009]. Ces relevés permettent non seulement de produire des données 2D (coupes ou élévations), mais aussi et surtout des modèles 3D calculés à partir des nuages de points, des vues en perspective photoréalistes et la possibilité de naviguer dans les modèles 3D avec des outils dédiés à la visualisation de l'environnement [Lasheris Corruçaga et al., 2010 ; Pinçon et al., 2010 ; Fritz et al., 2010].

Depuis 2008, les travaux à la grotte des Fraux impliquent différentes techniques basées sur une variété de scanners à balayage et d'appareils photo (de type reflex numérique) ainsi que d'autres systèmes d'imagerie spatiale. Le modèle 3D géométrique de l'ensemble des éléments structurels de la grotte a été généré et complété d'année en année par la combinaison des différents nuages de points. Les principaux

objets archéologiques (représentations pariétales, dépôts) sont également géoréférencés et numérisés (à plus haute résolution d'acquisition) pour être associés au modèle global. Les modèles sont ainsi conçus comme des outils de recherche communs, utilisables par tous les partenaires de l'équipe scientifique et multidisciplinaire, et servent d'outils de documentation et de visualisation. Le modèle global du réseau a été intégré à un SIG 3D, réalisé sous ArcMap 10.2, sous la direction de M. Koehl (INSA de Strasbourg).

Nous présenterons ici un bref rappel des techniques employées et renvoyons le lecteur à différents articles où les spécifications techniques sont présentées plus en détail [Grussenmeyer et al., 2012 et 2014 ; Burens et al., 2011 et 2014].

A. Méthodologie du relevé

Un cheminement polygonal a été mis en place progressivement dans le réseau souterrain. Un premier levé topographique a été réalisé selon les techniques de spéléologie par le Service régional de l'Archéologie (O. Ferullo) et le Service territorial de l'Architecture et du Patrimoine de Dordogne (T. Baritaud). En 2007, un cheminement topographique a été levé au théodolite et au télémètre par Yves Billaud. Dès 2008 et le début des travaux de relevé 3D de la cavité, l'ensemble des cheminement polygonaux ont été matérialisés au sol et ré-observés par des méthodes topographiques de polygonation 3D avec une station totale. Les écarts enregistrés lors des mises en station sur les points de canevas n'excédaient pas 2 cm en planimétrie et en altimétrie. Le cheminement polygonal a ensuite été raccordé en surface à plusieurs points déterminés en coordonnées XYZ par des méthodes de positionnement GNSS statique, puis rattaché au système de référence national (système Lambert 2 étendu). La précision de ce positionnement est centimétrique ; elle a été calculée avec la suite Leica GEO Office (figure 4). Le levé a été reporté en 2013 sur le cadastre.



Figure 5 : Vue en perspective du modèle 3D global de la grotte, relié à la surface (vue d'écran prise sous 3D-Reshaper). Les données sont enregistrées dans le système de référence national. *Perspective view of the global 3D-model of the underground network connected to outside (screenshot from 3D-Reshaper). Data are recorded in the French Geodetic Reference System.*

Un modèle numérique de surface a été réalisé par relevé lasergrammétrique terrestre (10 stations) (figure 4). Les nuages de points ont été acquis avec un pas de balayage de 3 mm à 10 m pour garantir un point par centimètre à 30 m (durée d'une station : environ 30 minutes). Après consolidation, le nuage de points global a été ré-échantillonné à une densité de 1pt/cm.

La volumétrie du réseau souterrain a également fait l'objet de relevés lasergrammétriques sur l'ensemble des zones concernées par une occupation anthropique (environ 600 m linéaires soit 70 % du développement de la grotte) (figures 5 et 6). Dans certaines parties du réseau non anthropisées (pour lesquelles nous disposons toutefois d'un levé topographique), la présence d'un taux particulièrement élevé de CO₂, la

difficulté de franchissement de chaos rocheux ou encore l'exiguïté de certains diverticules n'ont pas permis la réalisation de la numérisation 3D.

Enfin, la nécessité de développer un rendu photo-réaliste sur les panneaux ornés de la cavité a conduit à la réalisation de relevés photogrammétriques (pour le calcul de nuages de points denses et pour le texturage d'une sélection de modèles 3D). Des panoramas ont été réalisés à l'aide de rotules panoramiques.

B. Acquisition de la volumétrie globale de la grotte

L'acquisition des données lasergrammétriques nécessaires à l'établissement du modèle 3D a été réalisée à l'aide de scanners à balayage Faro (Photon 80, 120 et Focus3D), particulièrement adaptés au milieu souterrain (incertitude de mesure :

± 2 mm à 25 m). Pour les stations de courte portée (inférieure à 20m), le pas de balayage retenu est de 6 mm à 10 m. Il est de 3 mm à 10 m dans les secteurs ayant livré un mobilier archéologique important (dépôts céramiques...). À ce jour, ce travail de numérisation nous permet de disposer d'un nuage de points à haute densité (ré-échantillonné à 1 pt/cm) pour 600 mètres linéaires de galeries (soit environ 130 stations de mesure) (figures 1, 5 et 6). Le traitement par maillage de l'ensemble des secteurs est en voie d'achèvement.

Le processus d'acquisition repose sur le positionnement et le géoréférencement de sphères et cibles de référence sur des points spécifiques déterminés par leur bonne visibilité depuis les différentes stations. L'acquisition des nuages de points s'opère par la répétition dans l'espace des stations de numérisation le long des galeries ; une zone de recouvrement entre 2 stations étant systématiquement ménagée. Un minimum de 3 sphères communes à 2 stations du scanner est nécessaire pour relier entre eux les nuages de points [Landes et al., 2011]. Le travail de traitement post-acquisition des nuages de points (segmentation, consolidation, ré-échantillonnage), leur assemblage sur la base d'un cheminement polygonal, le maillage et les opérations de lissage améliorant le rendu visuel ont été réalisés par des élèves ingénieurs à l'INSA de Strasbourg (B. Cazalet, V. Léglise, E. Moisan). Le travail de segmentation permet de supprimer le « bruit » engendré par le matériel présent à côté du scanner, ainsi que les points inutiles. Chaque nuage de points est constitué de 40 à 60 millions de points. La manipulation

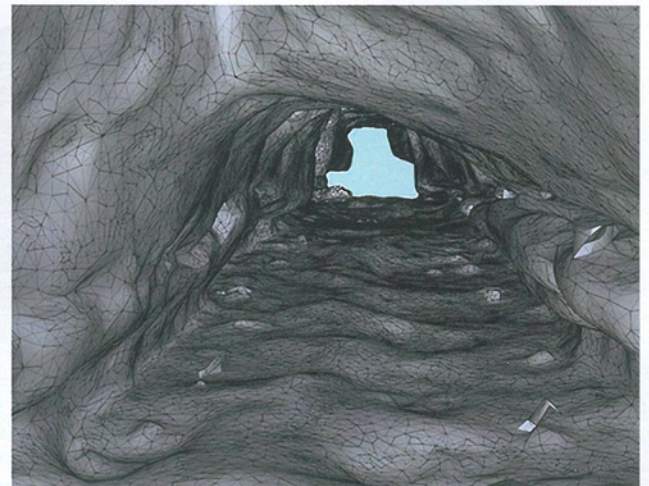


Figure 6 : Vue du secteur 18 de la grotte (à gauche) et du modèle 3D de la même galerie (à droite). *Picture of the sector 18 (on the left) and 3D model of the same gallery (on the right).*

des données lasergrammétriques issues des multiples stations nécessite d'alléger les nuages de points et d'uniformiser le nombre de points. Les nuages de points peuvent alors être sauvegardés au format ASCII puis importés et fusionnés en un nuage de points global uniforme. Le géoréférencement de la totalité des nuages de points permet d'éviter une étape de consolidation [Grussenmeyer et al., 2010 a, b]. Le modèle global du réseau a été intégré dans un système d'information géographique 3D.

C. Numérisation et texturage des panneaux ornés de la grotte

La précision et la résolution de mesure des scanners laser terrestres, très satisfaisantes pour l'enregistrement de l'ensemble des éléments structurels du réseau souterrain, se sont avérées insuffisantes pour numériser de façon optimale les tracés schématiques les plus complexes de la grotte (fines gravures et tracés digités dont l'enfoncement dans l'argile meuble des parois est particulièrement ténu) [Landes et al., 2011].

Pour remédier à cette contrainte technique, et dans l'objectif de produire

des modèles 3D permettant une analyse poussée des représentations pariétales hors site (chronologie, typologie des tracés, discrimination d'ensemble de figures, détermination, via une approche tracéologique de la forme et la nature des éventuels outils employés...), nous avons expérimenté, pour la première fois en milieu souterrain et en contexte archéologique un scanner laser à bras, le Scan Arm FARO équipé de la tête laser V3 dont la précision atteint 35 µm (19 200 pts / s). Les scanners laser à bras fonctionnent sur un principe très proche des scanners à triangulation mais permettent un déplacement plus flexible autour de l'objet. Ce sont des scanners mobiles qui se repèrent dans l'espace selon deux méthodes principales : soit un bras mécanique, soit un système électromagnétique. À l'exceptionnelle qualité d'acquisition de la tête laser de ce scanner s'ajoute le bénéfice d'un bras articulé (référéncé localement) permettant de placer la tête laser à une distance très réduite de la paroi (quelques centimètres), et ce quelles que soient les conditions d'accès (figure 7). Cette technologie nous a permis d'acquérir

des nuages de points d'une qualité exceptionnelle. Cet équipement permet, par la visualisation en temps réel du nuage de points sur un écran de contrôle, de pallier le phénomène des zones d'ombres (manques jusqu'alors inévitables durant les phases d'acquisition) en scannant la même zone à plusieurs reprises, selon des angles différents. Par ailleurs, le référencement des nuages de points par le bras articulé facilite leur corrélation au modèle 3D de la volumétrie de la grotte. Cette dernière génération de scanner constitue indéniablement une avancée méthodologique importante, bien qu'adaptée à de petits objets ou à des surfaces réduites (un panneau orné par exemple). La souplesse du ScanArm a permis de scanner le fond des tracés et les gravures les plus fines (y compris obliques) et ainsi d'obtenir des modèles géométriques denses, précis, d'une qualité exceptionnelle mais particulièrement volumineux.

La qualité des nuages issus des scanners Photon ou Focus (moins volumineux) est suffisante pour réaliser le calcul des modèles texturés des panneaux ornés. La qualité du rendu dépend

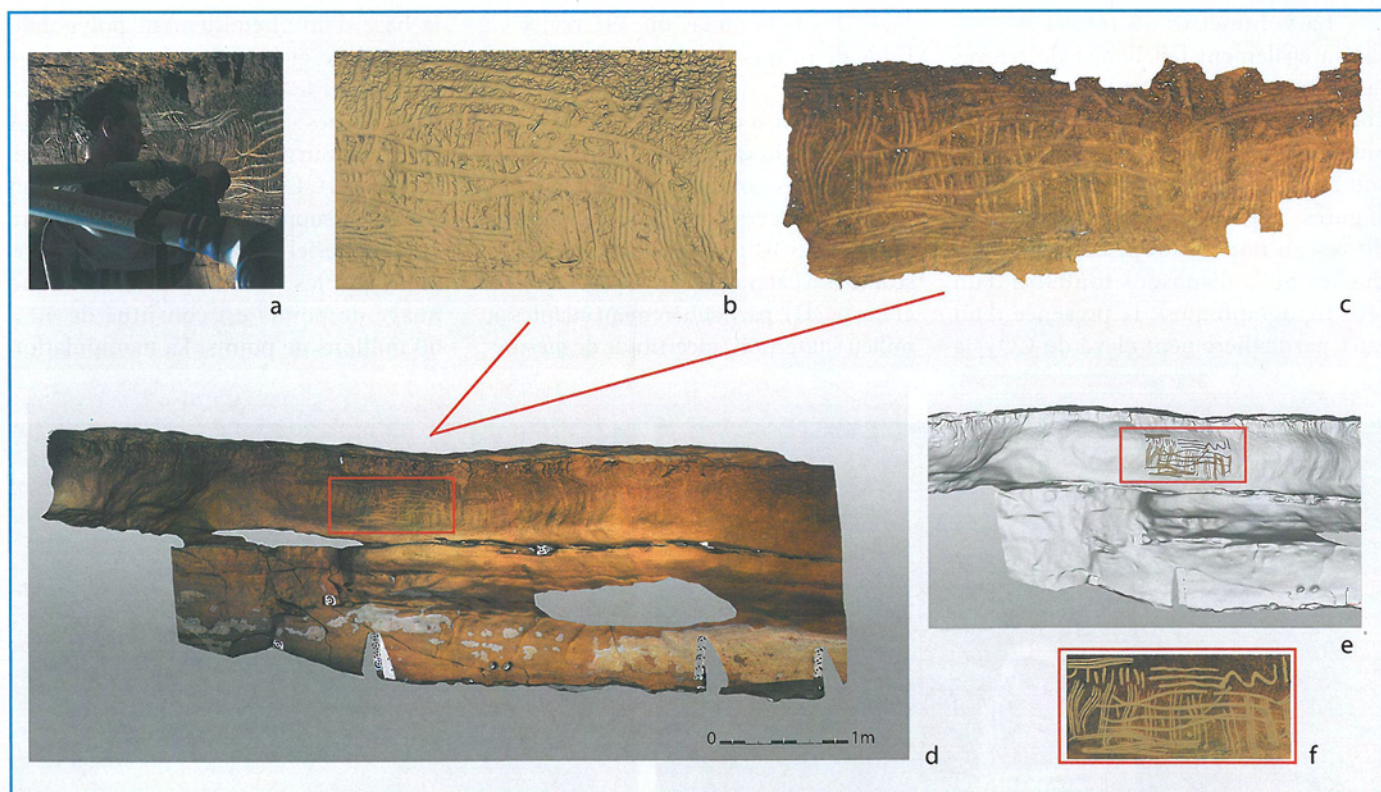


Figure 7 : Numérisation 3D d'un panneau orné de tracés digités du secteur 13. a : numérisation 3D à l'aide du ScanArm Faro ; b : vue du nuage de points haute densité enregistrée par le ScanArm ; c : extrait du panneau orné ; d : modèle 3D texturé ; e : projection des tracés digités sur le modèle 3D ; f : détail du relevé numérique établi à partir de l'orthophotographie extraite du modèle 3D. *3D-recording of Bronze Age fingerings in the clay-wall of the main panel from the sector 13 of the cave. a: recording test with the Faro ScanArm ; b: view of the high density point cloud recording using ScanArm; c: digital surface of a selected piece of the panel; d: textured 3D-model; e: projection of drawn fingerings on the 3D-model; f: detail of the digital drawing from the orthophoto extracted from the 3D-model.*

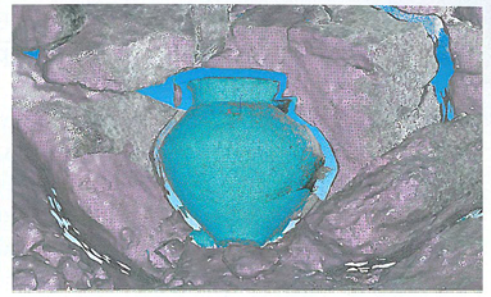
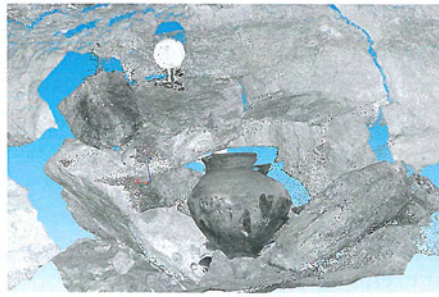


Figure 8 : Numérisation 3D d'une jarre de l'âge du Bronze à l'aide du scanner laser à différence de phase FARO Focus 3D (à gauche) et visualisation du nuage de points (au milieu et à droite). *3D-recording of a Bronze Age ceramic deposit from the cave using the FARO Focus 3D (on the left) and visualization of the deposit from the point cloud (in the middle and on the right).*

effet des qualités géométriques et radiométriques des images numériques.

La question du traitement d'images à très haute définition est rapidement apparue primordiale à l'étude des panneaux ornés de la grotte [El Hakim *et al.*, 2004 ; Fryer *et al.*, 2005]. L'acquisition d'images a été possible par apport de lumière artificielle (adjonction de lumières froides de type LED). La nécessité de travailler en très haute définition sur des tracés digités dont l'épaisseur est extrêmement tenue nous a conduits à sélectionner une échelle différente de celle retenue pour la volumétrie du réseau.

L'équipe a expérimenté diverses alternatives au problème d'acquisition et de corrélation de photographies numériques de très haute résolution des panneaux ornés au modèle 3D de la volumétrie du réseau. Nous avons opéré une série de tests, depuis l'acquisition simultanée du modèle 3D couplé aux prises de vues numériques automatiquement géo-référencées par la station totale Trimble VX équipée d'une caméra interne, jusqu'à la prise de vues numériques à très haute résolution (pixel-objet de l'ordre de 0,3 mm, pour une focale de 105 mm et une prise de vue à 5 m de l'objet ; avec des temps de pose de plusieurs secondes) de façon totalement indépendante de la lasergrammétrie [pour de plus amples informations, voir Grussenmeyer *et al.*, 2014 ; Burens *et al.*, 2014].

Ce travail a été effectué à partir de plusieurs stations à l'aide d'un boîtier Canon EOS 5D et d'un objectif de 85 mm sur rotule panoramique ; il a également permis la réalisation de vues panoramiques. Le calcul de l'orientation externe des images (position et orientation dans le référentiel de la grotte) est issu d'un calcul en bloc à l'aide d'un logiciel de photogrammétrie (PhotoModeler). Les points d'appui (cibles ou codes-barres circulaires) ont été relevés soit à la station

totale, soit directement dans le nuage de points. Les images orientées ont permis de coloriser automatiquement le nuage de points préalablement géo-référencé, ou de texturer un modèle maillé.

D. Numérisation des dépôts de mobilier archéologique

Suite aux recommandations du Service régional d'Archéologie d'Aquitaine, invitant à éviter tout déplacement des dépôts de mobilier céramique et métallique jalonnant 14 des 48 secteurs de la grotte, l'équipe a décidé de numériser en 3D les dépôts « accessibles » à l'aide du scanner Faro Focus 3D (avec un pas de balayage de 3 mm à 10 m). L'objectif était de permettre l'étude du mobilier sans contact, sur la base des modèles 3D. La caméra intégrée du Focus a permis la colorisation automatique des nuages de points (figure 8). Les dépôts ont été géo-référencés en les raccordant au cheminement polygonal de la grotte. Une couverture photographique de ces dépôts, assurée dans de bonnes conditions d'éclairage, permettra de texturer les nuages de points sous le logiciel 3DReshaper pour un meilleur rendu photo-réaliste.

III. Identification des verrous méthodologiques et technologiques rencontrés

La numérisation et la modélisation 3D associées au développement d'outils informatiques de traitement et de rendu des données 3D permettent aujourd'hui l'enregistrement complet et en haute résolution de sites complexes, notamment souterrains, tout en réduisant considérablement le temps d'acquisition des données *in situ*. Le regroupement des outils d'enregistrement et de mesure concomitamment à la simplification de leur mise en œuvre marque une étape dans la collecte de données, toujours plus nombreuses et plus détaillées. La production de modèles 3D géométriques

et photo-réalistes, basés sur la combinaison de nuages de points et d'images photogrammétriques, s'avère particulièrement adaptée à la production de modèles orientés vers la visualisation et la constitution d'une documentation de qualité des sites archéologiques (mobilier, structures domestiques, expressions pariétales...) en milieu souterrain (morphologie endokarstique).

Cependant, au-delà des questions de coût que génère le recours à ce type de techniques d'enregistrement (matériel, maintenance, multiplication des suites logicielles, mises à jour, jours-hommes...), les étapes d'acquisition et de post-traitement des données ne sont pas sans poser de difficultés techniques aux répercussions directes sur les problématiques de recherche développées.

A. Les procédures d'acquisition

Les procédures d'acquisition de nuages de points par lasergrammétrie terrestre soulèvent plusieurs problèmes : limites du matériel en fonction des conditions environnementales, réponse altérée du laser sur certains matériaux ou dans certains types de configuration (superposition d'objets aux caractéristiques colorimétriques proches, difficulté de créer des conditions d'éclairage homogènes sur l'ensemble d'une station de numérisation).

À la grotte des Fraux, les principales contraintes auxquelles nous avons été confrontés au cours de ces sept années ne sont pas tant liées à l'enregistrement de la volumétrie du réseau, qu'à celui des vestiges archéologiques et des expressions pariétales. La numérisation 3D des dépôts de mobilier céramique reste en effet à ce jour limitée aux ensembles d'objets placés de façon clairement visible dans des espaces relativement accessibles de la grotte (distance aux parois). Si la miniaturisation des scanners laser permet la numérisation de boyaux et

diverticules étroits, certaines contraintes techniques liées au matériel empêchent l'enregistrement d'une documentation suffisamment précise au regard de l'exigence des archéologues. Le respect d'une distance minimum entre le scanner et l'objet numérisé, la génération de points aberrants à l'intérieur de la scène (effets de bords, problèmes de réflexion...), l'impossibilité pour la caméra interne du scanner de fonctionner en deçà d'une certaine distance de l'objet peuvent ponctuellement altérer la qualité du rendu des céramiques sous toutes les faces ou constituer des limites à de simples opérations telle que l'extraction des profils des récipients.

Autant de contraintes qui limitent les possibilités de numérisation optimales des dépôts placés dans certaines conditions topographiques (absence de recul principalement). La solution envisagée pour contourner ces limites reste le recours à la photogrammétrie.

La nécessité d'enregistrer, à une échelle de détail très fine, les principaux panneaux ornés de la grotte des Fraux a été résolue par l'utilisation du Scan Arm FARO équipé de la tête laser V3 (précision de 35 μm ; acquisition : 19 200 pts / s). Parfaitement adapté aux salles et galeries les plus larges, ce modèle de scanner à bras s'est en revanche avéré impossible à installer dans de petits boyaux et diverticules en raison de la forte emprise au sol de l'embase. Sur cette question, une solution a été trouvée en interne via la fabrication d'une embase à emprise au sol réduite. L'ultime contrainte liée à ce type de matériel étant le temps d'acquisition, augmenté par la multiplication des passages de la tête laser sur certaines zones nécessitant un enregistrement complet (base des gravures et incisions obliques notamment).

Les contraintes techniques liées à l'utilisation de la photogrammétrie en milieu souterrain sont mieux connues. Nous ne citerons ici que brièvement les limites techniques de la station totale Trimble VX équipée d'une caméra interne, lors de l'acquisition simultanée d'un modèle 3D couplé à des prises de vues numériques automatiquement géo-référencées (résolution insuffisante des clichés à 3,2 mégapixels) ou sur l'impossibilité d'exploiter des clichés générés automatiquement par le photon 120 équipé d'un kit couleur et renverrons le lecteur à de précédentes publications [Grussenmeyer et al., 2011 et 2014].

B. Les procédures de post-traitement des données

Les principaux points de blocage se situent lors de l'étape de traitement des données 3D, notamment dans la lourdeur et la lenteur de traitement des données à haute résolution (modèles 3D des panneaux ornés acquis par le ScanArm par exemple).

Si l'automatisation partielle et l'accélération des procédures de traitement et de rendu des données ont fortement contribué à la démocratisation du traitement des nuages de points bruts (depuis les étapes d'assemblage, de segmentation, de consolidation, de filtrage (...) jusqu'au maillage, ré-échantillonnage et lissage des nuages), les possibilités de traitement des modèles surfaciques par les logiciels de rétro-ingénierie demeurent bien souvent chronophages et encore éloignées des besoins des archéologues, notamment en termes de topographie (mise à l'échelle, exportation de plan avec échelle, production d'isocartes à pas déterminés...). Certains logiciels, véritables boîtes noires pour l'utilisateur, limitent, de par leur conception, les possibilités de traitement des données par l'utilisateur.

La multiplication des échelles d'enregistrement des données en milieu souterrain (volumétrie, variations du champ magnétique, expressions pariétales...) implique la maîtrise de plusieurs suites logicielles et soulève la question de la gestion de sommes énormes de données 3D très hétérogènes et acquises à différentes résolutions, et de leur intégration dans un système de représentation 3D commun.

La difficulté de restituer graphiquement les données issues de l'imagerie 3D du champ magnétique (exemple d'application présenté ci-après) avait incité l'un d'entre nous à recourir à une technique de rendu volumique direct, permettant la représentation de caractéristiques continues en 3D. Le voxel (volumetric pixel), qui correspond à la plus petite unité-subdivision d'un domaine volumétrique, permet en effet de stocker une information colorimétrique, ses coordonnées spatiales en 3D et divers autres types d'informations (valeur numérique, matière, clé vers une table externe contenant des attributs...). Cette technique est peu exploitée : le stockage et le rendu des voxels nécessitent énormément de ressources (malgré le recours à des algorithmes de compression) et les modes de rendus restent à optimiser.

IV. L'imagerie 3D du champ magnétique : un exemple d'application innovant tirant parti de la 3D

La présence de nombreux foyers dans la grotte des Fraux (cendres, matériaux rubéfiés...) nous a conduits à rechercher de nouvelles méthodes d'investigation non invasive, susceptibles de détecter et de délimiter des structures de combustion, y compris lorsqu'elles sont invisibles à l'œil car recouvertes par un dépôt sédimentaire. L'un des objectifs des mesures effectuées était de discriminer les foyers avérés de simples accumulations de matériaux chauffés remaniés, issus de la combustion et de la cuisson à l'intérieur d'un foyer. Les méthodes magnétiques ont été privilégiées car elles sont connues pour leurs fortes capacités à mettre en évidence des matériaux naturels chauffés. De plus, la fossilisation du champ magnétique au cours du dernier refroidissement desdits matériaux constitue une source d'information permettant de déterminer si le matériau a conservé sa position, donc son intégrité, depuis sa dernière chauffe.

En effet, la cuisson de matériaux argileux issus de processus supergènes (processus conduisant à l'altération de la roche par les agents météoriques, à la surface de la Terre ; le fer se retrouve alors sous des formes pouvant être transformées par effet thermique en minéraux magnétiques telle que la magnétite) engendre la formation de minéraux magnétiques [Brodard et al., 2012 ; Jrad et al., 2014]. Bien en deçà de 700°C, au cours de la phase de refroidissement (ou de leur création), ces matériaux argileux acquièrent une aimantation thermorémanente (ou cristalline). L'augmentation de la teneur en minéraux magnétiques peut être quantifiée par des capteurs de contact mesurant la susceptibilité magnétique. Cette augmentation de susceptibilité magnétique et l'aimantation thermorémanente (ou cristalline) sont à la source d'une déformation locale du champ magnétique qui s'atténue spatialement sur des échelles métriques à infra-métrique. Cette déformation peut être mise en évidence par des mesures de la variation spatiale du champ magnétique. Cette dernière approche est classiquement mise en œuvre sur les sites archéologiques de plein air. La cartographie de la déformation locale du champ magnétique permet alors de localiser des fours et des foyers, mais aussi des structures fossoyées ou de vestiges

d'habitats¹. Le recours à cette méthode en milieu souterrain était jusqu'alors anecdotique, à l'appui de moyens technologiques limités et aux résultats peu concluants pour un non-géophysicien du fait d'une résolution spatiale insuffisante de l'imagerie cartographique [Itkis et al., 1999 ; Itkis 2011 ; Jrad et al., 2014].

La mise au point d'un protocole d'acquisition 3D à haute résolution spatiale, fruit de la collaboration entre topographes et géophysiciens, a permis d'adapter ce mode de prospection au milieu souterrain (programme AIR, CPER Université de la Rochelle).

La configuration topographique très complexe du milieu souterrain, limitant très fortement les déplacements, interdit la mise en œuvre des protocoles conventionnels de plein air. Ceux-ci sont réalisés à l'aide d'un instrument (enregistrant de l'ordre de 10 mesures par seconde), couvrant la surface du sol selon une maille la plus régulière possible. Le déplacement s'effectue selon un carroyage (le long de lignes parallèles proches). Le positionnement de chaque mesure est déterminé par le temps compris entre le début et la fin de ligne, en supposant que le déplacement est effectué à vitesse constante. L'intérêt des méthodes magnétiques, en partie fondées sur cette cadence de mesure élevée, est donc annihilé par l'impossibilité d'implanter un tel repère en milieu souterrain (permettant un déplacement régulier dans l'espace) qui aurait autorisé un transfert temps/position. L'alternative à un déplacement régulier est la réalisation d'une séquence de mesures ponctuelles, sur des points géo-référencés. Cette solution est fastidieuse et, de ce fait, ne permet pas d'obtenir, dans un temps raisonnable, une image de résolution suffisante pour être pertinente.

De surcroît, à la nécessité d'une haute résolution spatiale de l'information magnétique – imposée par la complexité topographique du milieu souterrain – la présence d'un toit et de parois induit l'acquisition d'une information non plus réduite à la surface du sol, comme cela est réalisé en plein air, mais relative à l'intégralité du volume de la cavité explorée, du fait du comportement du champ magnétique vis-à-vis de la matière.

En effet, toutes les roches interagissent avec le champ magnétique

terrestre ambiant, de manière plus ou moins notable, selon leur nature et leur histoire thermique (pour ne citer que le facteur concernant cette étude). En plein air, cette influence décroît en s'éloignant du sol, c'est-à-dire vers le haut. En milieu souterrain, la cavité génère une déformation locale à l'échelle de la grotte, généralement métrique, dont l'intensité dépend des propriétés magnétiques de la roche, fortement dépendantes de sa nature. Cette déformation du champ magnétique s'amenuise en s'éloignant de la paroi. De manière additionnelle, la microtopographie, correspondant à la rugosité des parois, ou la présence de blocs au sol, génère des déformations locales du champ magnétique à des échelles déci- à centimétriques. Par ailleurs, le contraste des propriétés magnétiques de matériaux juxtaposés (par exemple l'argile et le calcaire – ce dernier étant moins magnétique) constitue aussi une source de déformation du champ magnétique local.

L'interprétation d'une variation locale du champ magnétique, si elle reste modeste, nécessite donc *a minima* de disposer de la géométrie des lieux. Une déformation plus intense du champ magnétique sur un volume restreint trahit la présence de matériaux aux propriétés magnétiques intenses. À la grotte des Fraux (cavité exempte de métaux ferreux et de roche magnétique), une telle déformation du champ magnétique traduit la présence de matériaux ayant chauffé.

En effet, les matériaux argileux chauffés ici à des températures supérieures à 250°C [Brodard et al., 2012] génèrent de nouveaux minéraux magnétiques et acquièrent une aimantation associée à la fossilisation du champ ambiant au moment de leur dernier refroidissement. L'aimantation fossile et l'interaction entre le champ magnétique et l'augmentation des propriétés magnétiques constituent la source de cette déformation intense locale du champ magnétique (aussi appelée anomalie). Cette dernière se traduit par un couple composé d'une baisse d'intensité du champ magnétique juxtaposé à un pic positif (appelé dipôle). L'interprétation des mesures d'intensité de champ magnétique nécessite la confrontation entre les variations spatiales d'intensité du champ magnétique à l'intérieur de la cavité d'une part et la géométrie des

volumes de la grotte d'autre part. Dans ce but, les données topographiques obtenues par lasergrammétrie terrestre, définissant un modèle de surface des parois de la cavité, sont associées aux nuages de points des mesures d'intensité du champ magnétique. Ces informations sont représentées dans un modèle d'espace divisé en cubes élémentaires (voxels) ; chaque point de mesure topographique ou magnétique occupe un cube élémentaire. Les variations d'intensité du champ magnétique sont représentées par une échelle de couleur.

Conservé une cadence de mesure élevée et réaliser une exploration 3D nécessite un protocole permettant de réaliser de manière concomitante la mesure de champ magnétique et son géo-positionnement. Pour cela, un réflecteur laser (prisme 360°) est accolé au(x) capteur(s) magnétique(s). La poursuite automatique du réflecteur en mouvement par une station totale permet d'obtenir un enregistrement en continu de ses coordonnées spatiales. Ainsi, le géo-positionnement des mesures magnétiques est déterminé par interpolation des coordonnées du réflecteur (en utilisant l'heure de chaque mesure magnétique) par rapport à celles des mesures de la station totale. Le décalage spatial existant entre le réflecteur et le(s) capteur(s) magnétique(s) est pris en compte dans le calcul. La précision du géo-positionnement des mesures magnétiques est inférieure au centimètre.

D'un point de vue expérimental, les mesures d'intensité du champ sont réalisées en continu à l'aide d'un magnétomètre à doubles-capteurs (G858 Geometrics), d'une cadence de 10 Hz. En prospection magnétique, il est nécessaire de tenir compte de l'existence d'une variation temporelle permanente de l'intensité du champ magnétique (variation dite diurne). Déterminer la variation spatiale nécessite de retrancher cette variation temporelle aux mesures réalisées en balayant l'espace. L'idéal est donc de disposer de deux magnétomètres, l'un restant en base, n'enregistrant que la variation temporelle, l'autre mobile, enregistrant à la fois les variations spatiale et temporelle. Lors des premiers tests, nous ne disposions que d'un seul magnétomètre ; nous avons en conséquence réalisé une première

1. Le lecteur pourra se référer à des ouvrages généraux sur les méthodes du magnétisme environnemental et de la prospection géophysique tel que Maher & Thompson 1999 ; Evans & Heller, 2003 ; Aspinall et al. 2008.

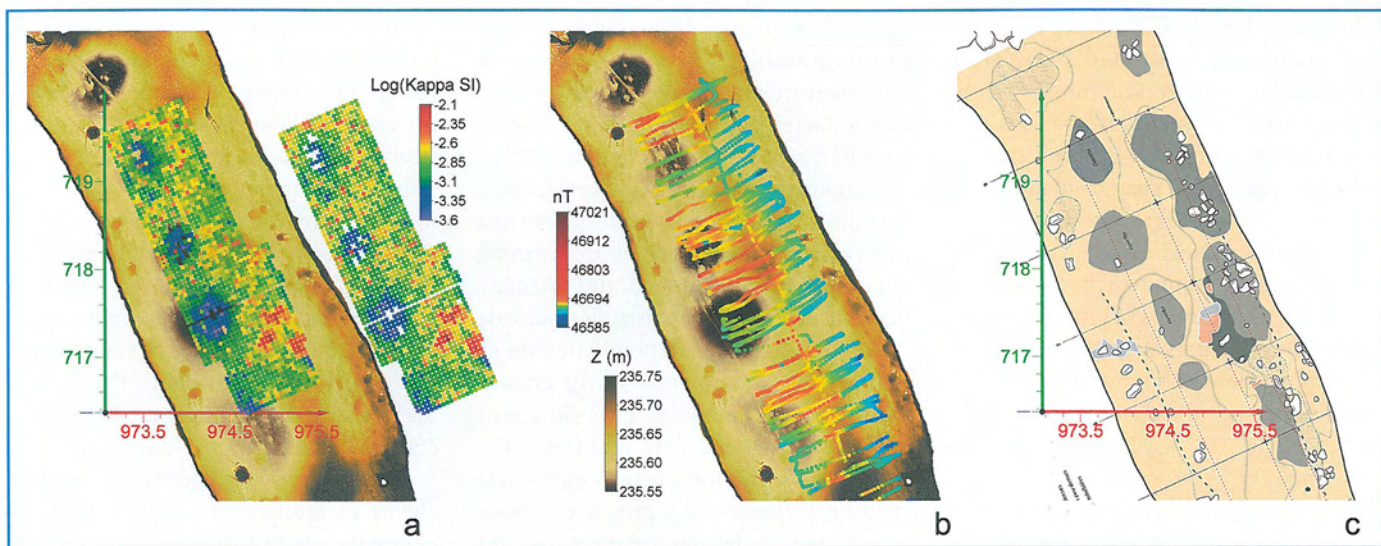


Figure 9 : Confrontation des cartographies de susceptibilité magnétique (a), d'intensité du champ magnétique (b) et du relevé archéologique (c) de la galerie 18 dite « des foyers ». Vue verticale par-dessus ; axes en unité métrique. Le fond topographique du plancher de la grotte (obtenu par lasergrammétrie) est représenté avec l'altitude (Z) en échelle de couleur. La susceptibilité est mesurée avec un capteur de contact de 6 cm de diamètre (KT9, Exploranium), selon une maille de 5 cm de côté. Le relevé d'intensité du champ magnétique correspond aux profils proches du sol (un capteur fixe, l'autre mobile). Le relevé archéologique montre des dépôts de cendre (en gris clair), de charbons de bois (en gris moyen et foncé en fonction de la densité des charbons de bois) et des surfaces argileuses rubéfiées (en ocre). *Magnetic susceptibility map (a), Earth magnetic field intensity survey (b) and archaeological ground plan confrontation of gallery 18. Vertical top view, axes with metric unit. The topographic map, obtained by laser scanning, is represented in a color scale and corresponds to height (Z). The magnetic susceptibility is measured with a contact sensor of 6 cm diameter (KT9, Exploranium) with a mesh of 5 cm. The magnetic field intensity survey corresponds to the profiles close to the ground (with one mobile sensor, the second one remains fixed). The archaeological plan presents ash deposits (in light gray), charcoal deposits (medium to dark gray, according to the density of charcoal) and reddish clay surfaces (ocher).*

campagne au cours de laquelle nous avons conservé un capteur fixe, le second étant mobile.

Constatant que la variation temporelle restait modeste au regard des anomalies générées par les foyers, nous avons décidé de la négliger au profit d'un accroissement de la résolution spatiale. Nous avons alors superposé verticalement les deux capteurs en intercalant le prisme entre eux. À un instant donné, deux mesures sont donc effectuées simultanément par les 2 capteurs, placés à une distance d'environ 20 cm l'un de l'autre. L'acquisition d'un second magnétomètre (CPER Université de La Rochelle) nous a permis d'enregistrer la variation diurne du champ magnétique (en un point fixe) et ainsi de la corriger *a posteriori*.

Concernant la géolocalisation des mesures magnétiques, la cadence de mesure de la station totale au cours de la poursuite du prisme constitue un facteur essentiel de la précision de la spatialisation des mesures. Lors des premiers relevés 3D de champ magnétique, nous avons utilisé des stations totales TRIMBLE VX puis LEICA TPS1200+ avec des cadences de mesure théoriques respectives de 1 et 10 mesures par seconde. Nous disposons actuellement d'une station totale TRIMBLE S8 (CPER Université de La Rochelle) permettant d'atteindre en condition optimum une cadence de 20 mesures par seconde. Quelle que soit la station totale considérée, les cadences constatées lors de nos acquisitions sont inférieures aux cadences théoriques (cadence divisée par deux pour le décile supérieur).

Lors des premières campagnes d'acquisition de mesures, nous avons cherché à confronter des objets archéologiques avérés (foyers) aux imageries magnétiques produites. Le travail réalisé sur une sole foyère (dénommée F4) nous a permis de confirmer l'aptitude d'une cartographie de susceptibilité magnétique, réalisé avec un KT9 (Exploranium),

et d'une imagerie 3D de l'intensité du champ magnétique, à localiser l'objet repéré. Cette étape de validation réalisée, nous avons abordé des objets plus complexes. La galerie 18 dite « des foyers » présente de multiples dépressions caractérisées par la présence de restes de cendres, de charbons de bois et des surfaces argileuses rubéfiées (figure 9). La carte de susceptibilité magnétique produite à partir des mesures de contact (KT9) qui ne concernent globalement que les 2 premiers centimètres de matière [par analogie au KT5, Lecoanet et al., 1999] met en exergue, en rouge sur l'échelle de couleur, les zones rubéfiées identifiées sur le relevé archéologique. En revanche, de nombreuses anomalies magnétiques situées sur le pourtour des dépressions révèlent des zones chauffées, non détectées. Cette première campagne démontre la suprématie de l'imagerie 3D du champ magnétique sur la cartographie de susceptibilité magnétique tant dans sa capacité à explorer l'épaisseur de la stratigraphie des couches archéologiques que dans sa rapidité de mise en œuvre. Elle montre également les besoins d'accroître la densité de mesures afin d'augmenter la résolution spatiale de l'information.

Les cadences plus élevées des stations totales utilisées lors des campagnes suivantes autorisent un déplacement plus rapide, permettant une meilleure couverture de l'espace dans une même durée de prospection. La superposition des deux capteurs permet aussi de doubler le nombre de mesures et d'augmenter le volume exploré. L'opérateur porte les capteurs solidarisés au prisme et balaie, dans les limites du possible, l'intégralité de l'espace (figures 10a et 11). La couverture spatiale s'avère d'une homogénéité très inégale du fait de la difficulté de l'opérateur à couvrir l'espace de manière régulière et homogène, en mémorisant la trajectoire déjà réalisée au cours de la prospection.



a

b

Figure 10 : Protocole de la prospection magnétique 3D utilisé à la grotte des Fraux. En 2011 (a) : les capteurs (cylindres blancs) sont déplacés manuellement par l'opérateur de manière à couvrir l'espace aussi bien que possible. Le prisme 360°, intercalé entre les deux capteurs, permet la géolocalisation des mesures par un système de poursuite du réflecteur par une station totale (présente en arrière-plan sur la photographie). En 2012 (b) : les capteurs sont suspendus au bout d'une perche télescopique fixée à l'aide d'une rotule articulée sur un trépied. Ce dispositif permet une couverture spatiale plus régulière. *Protocol of 3D magnetic prospection in the cave of Les Fraux. a: in 2011, sensors (white cylinders) were moved by the hand of the operator. The 360° prism reflector (located between the both sensors) allowed us to obtain a geolocalization of the measurements by the tracking method of the total station (in the back of the picture). b: In 2012, a better control of the space covered was obtained thanks to a device made-up with a telescopic pole fixed on a tripod.*

Dans le but d'améliorer la régularité de la couverture 3D, nous avons mis en œuvre le contrôle mécanique du déplacement des capteurs à l'aide d'une perche télescopique. Les capteurs, aux câbles rallongés, sont désormais suspendus à l'extrémité de la perche. L'ensemble est solidarisé à un trépied à l'aide d'une rotule. L'opérateur peut ainsi contrôler le mouvement des capteurs. En déplaçant le manche de la perche de gauche à droite (et vice-versa) et en déployant progressivement la canne à chaque passage, les capteurs suivent une trajectoire en arcs de cercles concentriques, jusqu'à une distance de 5 mètres de l'axe du trépied (figure 10b).

Ce dispositif permet de traiter des surfaces au relief accidenté, qu'un opérateur n'aurait pu couvrir au cours de la prospection. Il permet également de prospecter, jusqu'à une distance de 5 m, des surfaces dont l'accès est interdit à l'opérateur en raison de mesures de protection (figure 12).

Ce protocole permet de couvrir une surface de plus de 2 m² par heure pour un volume de l'ordre de 2 m³, avec une résolution spatiale au sol de l'ordre de 20 cm². Les premiers résultats sont accessibles après quelques heures employées au géo-positionnement des mesures.

Les développements futurs à atteindre tendent vers l'optimisation des outils d'analyses plus que vers l'amélioration du système d'acquisition des données. De ce côté-là, sans un changement drastique des composants

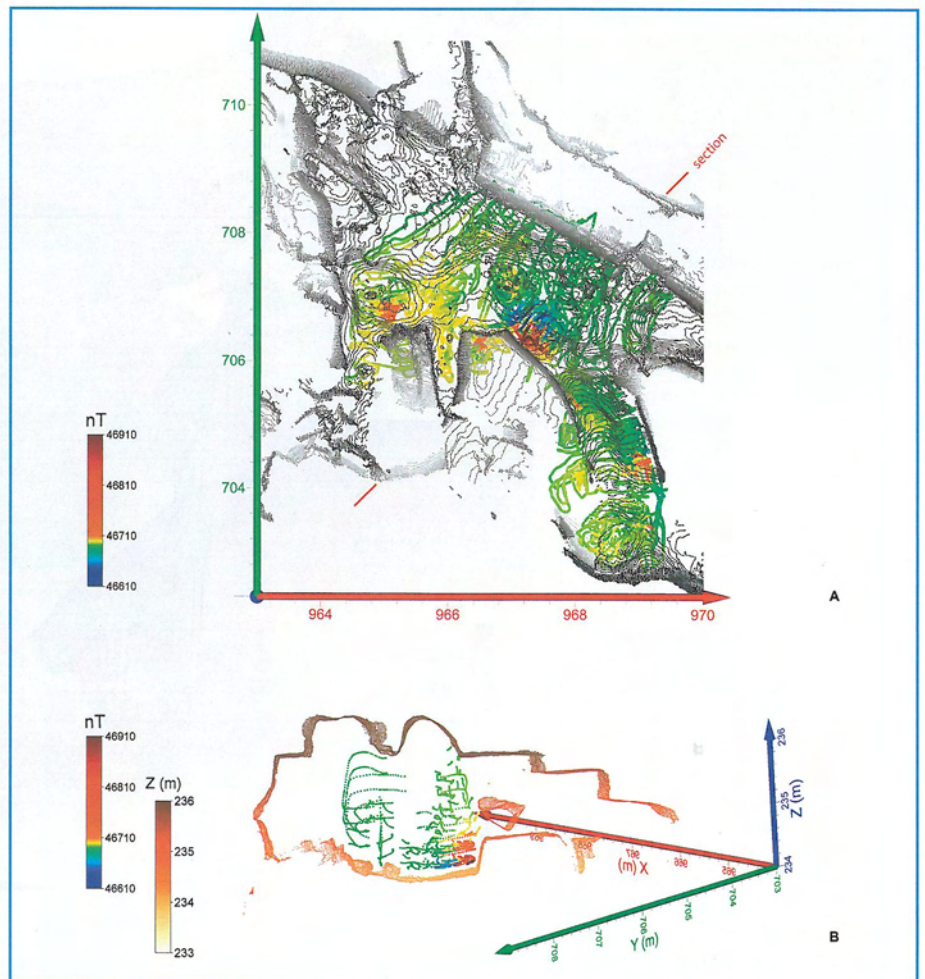


Figure 11 : Imagerie 3D du champ magnétique du secteur 29 (géoréférencée en Lambert 2). La prospection est réalisée à l'aide de deux capteurs superposés. La cadence de mesure de la station totale est analogue à celle du magnétomètre. La vue a présente l'intégralité du nuage magnétique en vue verticale, par-dessous. La topographie est représentée en courbes de niveaux ; seule la partie inférieure est représentée. La vue b correspond à une coupe NE-SW de 20 cm d'épaisseur. *Sector 29: 3D mapping of magnetic field (georeferenced in Lambert 2). Survey is realized with the both sensors put on top of each other. Time measurement of total station is comparable to magnetometer measure rate. Bottom view (a) displays the magnetic field intensity point cloud with ground topographic information (shown in level curve). Picture b presents vertical section of 20 cm thickness (b) oriented NE-SW.*

du dispositif (mode de mesure du champ magnétique et du géo-positionnement) aucune amélioration notable n'est à attendre. En revanche, le traitement de l'information n'en est encore qu'au stade de la représentation et de l'analyse visuelle.

La représentation des données magnétiques et topographiques dans un même objet 3D permet une confrontation de la répartition spatiale des anomalies magnétiques par rapport à la géométrie des lieux, confrontation déjà très fructueuse. Toutefois, cette donnée 3D, d'appréhension complexe, reste peu accessible à l'utilisateur final. Il est nécessaire de transcrire cette information sous une forme plus accessible, telle qu'une carte en 2D, de la localisation des sources des anomalies.

Pour autant, les modèles développés pour l'analyse des prospections réalisées en plein air ne sont pas applicables aux données acquises

en cavité. En effet, ces premiers sont fondés sur une simplification reposant sur le fait que les sources magnétiques sont situées sous le plan des mesures. De fait, cette condition n'est pas valide en grotte. Même si des adaptations à des volumes simples sont possibles, la prise en compte de la micro-topographie rend la démarche non réaliste. L'obtention de modèles physiques applicables aux grottes (cavité et rugosité) constitue un préalable à une intégration simplificatrice des données qui permettra une représentation plus simple des résultats par la localisation des sources.

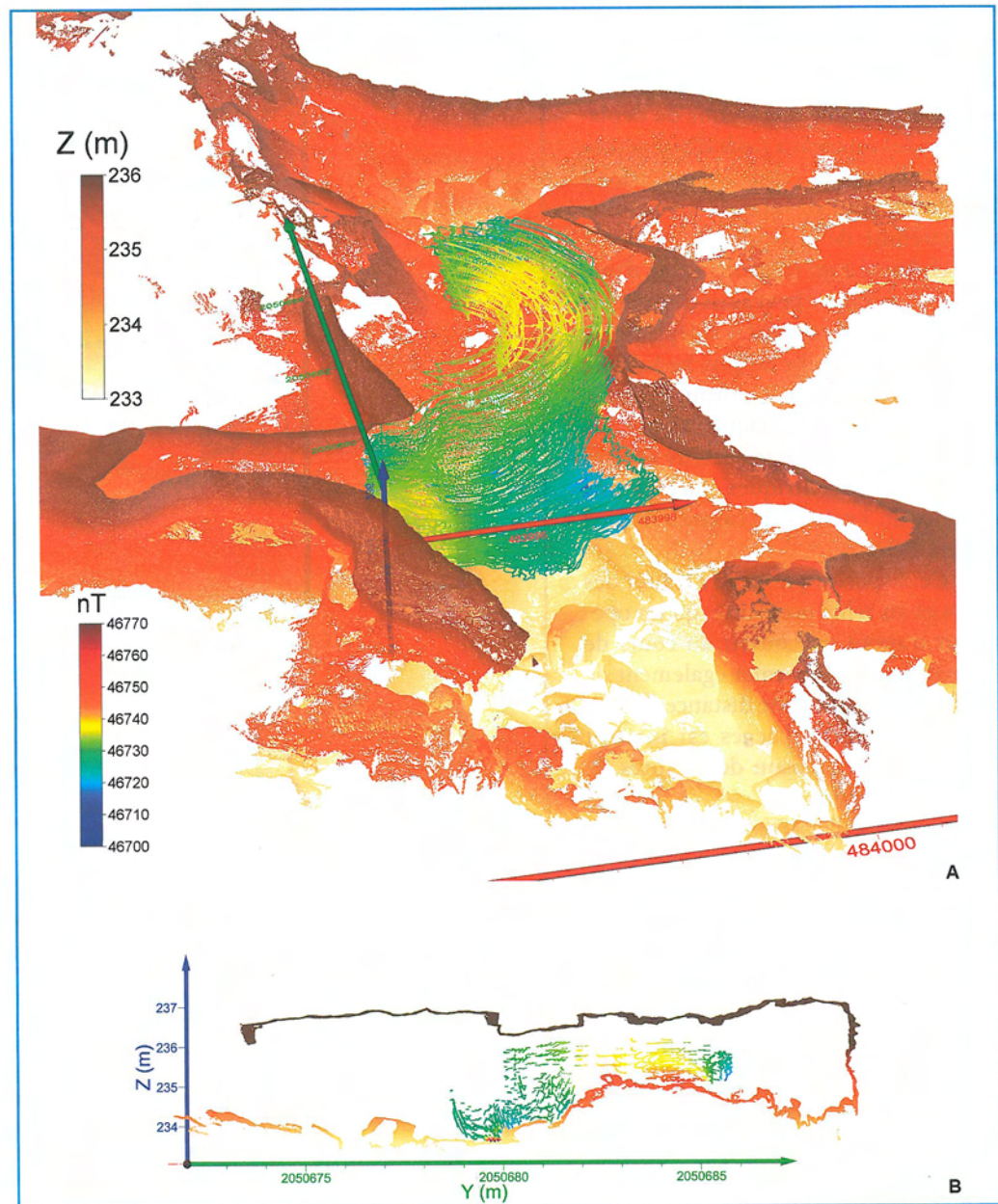
V. Discussion

Dans le domaine de la 3D appliquée aux sites archéologiques, les développements méthodologiques et technologiques restent, aujourd'hui encore, souvent centrés sur les questions de visualisation et de navigation en

Figure 12 : Imagerie 3D du champ magnétique du secteur 40 (géoréférencée en Lambert 2). La prospection est réalisée à l'aide d'une perche fixée sur un trépied à l'aide d'un pivot articulé. Les deux capteurs superposés sont positionnés à l'extrémité de la perche. La vue a montré le nuage de mesures magnétiques dans le volume de la cavité dont le toit est tronqué.

Un second magnétomètre placé à proximité enregistre la variation temporelle du champ magnétique dans le but de corriger cette variation *a posteriori*. La vue b correspond à une coupe NNE-SSW de 20 cm d'épaisseur.

Sector 40: 3D mapping of magnetic field (georeferenced in Lambert 2). The magnetic survey is realized with a telescopic boom pole fixed on a tripod. The both sensors are superposed and hanging at the end of the pole. The clouds points of both intensity of the magnetic field and walls surface is shown on picture a (the top of the cave is truncated). Thanks to a second magnetometer, the diurnal variation of the local earth magnetic field is corrected. The picture b displays a vertical section of 20 cm thickness.



local ou online (avec les limites que l'on connaît liées au maniement de données volumineuses, nécessairement ré-échantillonnées), au détriment d'analyses (notamment spatiales) et d'applications dédiées à la recherche. Les outils « de recherche » se limitent couramment à l'usage d'outils de mesure, de calcul des volumes, de changement de texture et de conditions d'éclairage ou d'extraction de sections, dans la droite ligne des usages traditionnels, fondés sur des représentations graphiques en 2D. Comme le souligne S. Campana, les archéologues rencontrent des difficultés à extraire l'information archéologique originale autrement qu'en 2D, qu'il s'agisse d'objets, de sites, de contextes, de paysages [Campana, 2014].

À la grotte des Fraux, l'étape d'acquisition du modèle 3D global de la cavité a touché à sa fin en 2014. L'équipe dispose désormais d'un modèle 3D global de l'ensemble des secteurs de la cavité occupés au cours de l'âge du Bronze et travaille sur la finalisation d'un outil de centralisation des données 2D et 3D : un SIG 3D. Le modèle géométrique 3D constitue le support privilégié aux reconstitutions et modélisations tridimensionnelles issues de l'étude interdisciplinaire du réseau. Tout l'enjeu de l'étude du site réside à présent dans la modélisation des différents *scenarii* dans ce système de représentation 3D commun, et dans sa capacité à intégrer des données hétérogènes issues de multiples disciplines (géomorphologie, climatologie, mécanique des fluides, géophysique, archéologie, art...).

L'étude géomorphologique et karstologique récemment engagée aux Fraux par S. Jaillot (EDYTEM) et Y. Billaud (EDYTEM, MCC DRASSM) a renouvelé notre perception de l'évolution du réseau, par la mise en œuvre d'analyses paysagères souterraines, la reconnaissance de la chronologie relative des événements et, plus récemment, par une campagne de datations des concrétions par la méthode géochimique U/Th [Jaillet et al., 2012 et 2013]. L'accent a été mis sur la question de la dynamique d'évolution et de fermeture des zones de paléo-entrées potentielles au réseau. Cette étude chrono-géomorphologique a permis de proposer différentes hypothèses relatives à l'existence d'une ou plusieurs entrées actives à la fin de l'âge du Bronze et de formaliser une première

vision de la chronologie de la fermeture des galeries de la grotte. Il est dorénavant possible de proposer des reconstitutions valides à l'échelle du site et d'ouvrir les premières pistes de compréhension des pénétrations humaines et animales dans la grotte (pénétrations contrôlées par l'évolution naturelle des zones d'entrée vs. l'expression de choix humains). À présent que le modèle volumétrique tridimensionnel global du réseau est achevé, la priorité porte sur la restitution de ces paysages dans une géométrie 3D, dans l'objectif de proposer une analyse géomorphologique tridimensionnelle, à l'intérieur de la grotte comme dans les zones extérieures, et de restituer la paléo-topographie des dispositifs d'entrée dans la cavité. Supporté par la 3D, ce type de reconstitution devra associer analyse des formes et des dépôts, géométrie fine 3D et un contrôle chronologique par les dates [Jaillet et al., 2013].

Le suivi climatique de la cavité a été initié début 2012 par D. Lacanette (I2M) par la pose de capteurs autonomes qui ont enregistré depuis lors les variations de température en divers points du réseau. Les informations collectées ont montré une importante communication entre l'extérieur et la zone d'entrée de la cavité. Dans le réseau, l'influence des variations climatiques extérieures – via l'entrée de la grotte – est perceptible jusqu'à une cinquantaine de mètres. Les variations extérieures sont transmises par transfert de chaleur au travers de l'épikarst. Les amplitudes de température sur un cycle annuel sont plus importantes dans le réseau droit, moins profond que le réseau gauche. Par ailleurs il a été vérifié que le climat extérieur correspond bien à la station de météo France située à Saint-Martin-de-Fressengeas et pour laquelle nous avons accès à un enregistrement depuis plusieurs décennies. Une fois les températures dans la grotte des Fraux validées par les données acquises durant ces deux dernières années, il sera possible de remonter à des périodes plus anciennes à partir des données extérieures. Tout l'enjeu de cette étude climatique réside dans la simulation de paléo-dynamiques sur la base de l'existence d'une ou plusieurs paléo-entrées potentielles (telles que définies par l'étude chrono-géomorphologique). Ce travail de simulation numérique s'appuiera sur le couplage entre le modèle tridimensionnel

de la cavité et les données climatiques extérieures. Cette méthodologie a été développée et validée dans la grotte de Lascaux [Lacanette et al., 2007 et 2009]. Elle permet de visualiser en 3D les écoulements thermoaérauliques dans un milieu souterrain à partir du climat extérieur, en résolvant les équations de la mécanique des fluides en tout point de ce milieu. Les simulations sont basées sur un code de recherche en simulation numérique en mécanique des fluides². Seul le recours à la simulation permet de résoudre les équations de la mécanique des fluides avec la notion d'espace en complément des approches analytiques unidimensionnelles utilisées à ce jour pour les études hydrogéologiques et climatiques dans les milieux souterrains.

Parallèlement, nous engageons un travail de simulation tridimensionnelle de conduction de la chaleur dans les sols et dans l'air en milieu confiné (correspondant aux conditions de feu en milieu souterrain). En effet, de nombreuses interrogations demeurent sur la manière dont ces feux ont été conduits dans des environnements très contraignants (boyaux étroits et petits diverticules) et dans des secteurs parfois très éloignés des zones d'entrée. Sur la base de la morphologie 3D et à partir de codes open source comme FDS ou FireFoam, il sera possible de restituer les feux aux endroits des structures de combustion archéologiques afin de déterminer la circulation des fumées et de savoir dans quelle mesure il était possible de se tenir à proximité de ces feux. On pourra envisager de suivre le trajet des fumées produites par les foyers et de proposer différentes hypothèses archéologiques. Les volumes plus ou moins grands des différentes salles jouent un rôle dans la dispersion de ces fumées, les températures extérieures également.

Conclusion

Le développement de nouveaux outils 3D dédiés à la recherche appliquée à l'étude de sites archéologiques complexes, à l'image de la grotte des Fraux, associant des données multi-scalaires et différents niveaux de détail tant dans la géométrie que dans la texture, passera nécessairement par une collaboration accrue entre usagers « non experts » de la 3D (archéologues, géologues, informaticiens, géophysiciens, ingénieurs...) et

2. <http://thetis.enscbp.fr>

par la mise en commun des expériences. Il nécessitera la mise au point de procédures d'automatisation et la création de solutions logicielles plus intuitives, capables d'intégrer davantage de capteurs et de données hétérogènes [Guidi, 2014] ainsi qu'une adaptation des standards permettant notamment de comparer les performances des outils d'enregistrement et de mesure 3D. Le cadre de ces recherches sera probablement celui de projets interdisciplinaires mettant en œuvre des outils et des méthodologies d'horizons disciplinaires variés.

Sur le site des Fraux, l'année 2014 a marqué la fin de la phase d'acquisition des données sur le terrain. L'étape d'analyse

de cette masse documentaire énorme, réalisée au fil des 7 années de fouille programmée, se poursuit aujourd'hui dans le cadre du site d'étude en écologie globale (SEEG), cadre du développement de projets ayant débouché sur de premières innovations technologiques et méthodologiques. Depuis 2010, la 3D constitue le pivot du projet et le support commun à l'ensemble des études menées sur le site. C'est pourquoi la question de l'intégration de données hétérogènes au sein d'un modèle 3D commun dans le but d'analyser et de simuler le fonctionnement de cet écosystème constitue à nos yeux l'enjeu essentiel pour les années à venir.

Remerciements

Les recherches conduites sur le site des Fraux bénéficient du soutien du Service régional de l'Archéologie (DRAC Aquitaine) ainsi que de l'Institut en Ecologie et en Environnement du CNRS. Nos remerciements vont aux sociétés FARO et GéoTopo pour la mise à disposition d'instruments de mesure, à B. Cazalet, V. Léglise et E. Moisan pour leurs contributions dans le cadre de leur projet de fins d'études à l'INSA, et à la famille Goineaud, propriétaire de la grotte des Fraux, pour l'autorisation de publier les images produites dans la grotte. Nous remercions également la commune de Saint-Martin-de-Fressengeas et la Communauté de communes du Pays thibérien pour leur soutien.

Bibliographie

- ASPINALL A., GAFFNEY C. AND SCHMIDT A., 2008** - *Magnetometry for archaeologists*. Altamira press, 208 p.
- BARRIÈRE C., 1983** - *L'art pariétal de Rouffignac*. Fondation Singer-Polignac, Picard éd., Paris. 250 p., 500 fig., 8 pl. couleur.
- BURENS A., GRUSSENMEYER P., GUILLEMIN S., CAROZZA L., BOURILLON R. et PETROGNANI S., 2011** - Numérisation 3D de la grotte ornée des Fraux - Saint-Martin-de-Fressengeas, Dordogne, France : Approche multiscalaire. In : Jaillet S., Ployon E., Villemin T., Images et modèles 3D en milieux naturels, *Collection Edytem*, n°12, p. 183-189.
- BRODARD A., GUIBERT P., LÉVÊQUE F., MATHÉ V., BURENS A. and CAROZZA L., 2012** - Thermal characterization of ancient hearths from the cave of Les Fraux (Dordogne, France) by thermoluminescence and magnetic susceptibility measurements. *Quaternary Geochronology*, doi:10.1016/j.quageo.2012.04.013.
- BURENS A., GRUSSENMEYER P., CAROZZA L., LÉVÊQUE F., GUILLEMIN S. and MATHÉ V., 2014** - Benefits of an accurate 3D Documentation in Understanding the Status of the Bronze Age Heritage Cave « Les Fraux » (France). *International Journal of Heritage in the Digital Era*, volume 3, number 1, p. 179-195.
- CAMPANA S., 2014** - 3D Recording in Archaeology and Cultural Heritage – Theory and best practice. In : F. Remondino, S. Campana ed.: *3D Recording and Modelling in Archaeology and Cultural Heritage – Theory and best practices*. BAR International Series 2598, p. 7-12.
- CAROZZA L., BURENS A., BILLAUD Y., FERRULO O., BOURILLON R., PETROGNANI S., FRITZ C., TOSELLO G. et GOINEAUD E. et M., 2009** - L'horizontal et le vertical - L'âge du Bronze de la grotte des Fraux (Saint-Martin-de-Fressengeas - Dordogne). In : *De Méditerranée et d'ailleurs...* Mélanges offerts à Jean Guilaîne. Archives d'Ecologie Préhistorique Toulouse, p.159-172.
- EL-HAKIM S.F., FRYER J.G. and PICARD M., 2004** - Modelling and visualization of aboriginal rock art in the Baiame cave. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 35, 5, p. 990-995.
- EVANS M.E. and HELLER F., 2003** - *Environmental magnetism. Principles and applications of environmental magnetism*. Academic press, 293 p.
- FRITZ C., TOSELLO G., PERAZIO G., PERAL J. et GUICHARD L., 2010** - Technologie 3D et relevé d'art pariétal : une application dans la grotte de Marsoulas. *In Situ, Revue des patrimoines*, 13.
- FRYER J.G., CHANDLER J.H. and EL-HAKIM S.F., 2005** - Recording and modelling an aboriginal cave painting: with or without laser scanning. In: 1st 3D-ARCH International Symposium, Mestre-Venice, Italy. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Systems*, XXXVI-5/W17, 8.
- GRUSSENMEYER P., LANDES T., ALBY E. and CAROZZA L., 2010** - High Resolution 3D Recording and Modelling of the Bronze Age Cave « Les Fraux » in Périgord (France). In: *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXVIII, Part 5, Commission V Symposium, Newcastle upon Tyne, UK, ISSN 1682-1777, pp. 262-267.
- GRUSSENMEYER P., CAZALET B., CAROZZA L. and BURENS A., 2010** - Close Range Terrestrial Laser Scanning and Photogrammetry for the 3D-Documentation of the Bronze Age Cave Les Fraux in Périgord (France). *Proceedings for the 1st Mining in European History-Conference of the SFB-HIMAT*, 12.15. November 2009, Innsbruck university press, ISBN 978-3-902719-69-0, p. 411-421.
- GRUSSENMEYER P., ALBY E., ASSALI P., POITEVIN V., HULLO and J.-F., SMIGIEL E., 2011** - Accurate Documentation in Cultural Heritage by merging TLS and high resolution photogrammetric data. *SPIE Optical Metrology 2011*, Munich 23-26 May, Videometrics, Range Imaging, and Applications XI, Proc. of SPIE Vol. 8085, 808508 © SPIE CCC code: 0277-786X/11/\$18 doi: 10.1117/12.890087, 13 p.
- GRUSSENMEYER P., BURENS A., MOISAN E., GUILLEMIN S., CAROZZA L., BOURILLON R. and PETROGNANI S., 2012** - 3D Multi-scale Scanning of the Archaeological Cave « Les Fraux » in Dordogne (France). In M; Ionadis et al. (Eds): *EuroMed; Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)* Springer ed., 7616, p. 388-395.
- GRUSSENMEYER P., BURENS A., CAROZZA L., LÉVÊQUE F., GUILLEMIN S. et MATHÉ V., 2014** - Numérisation 3D de la grotte ornée des Fraux (Dordogne) : apport à l'archéologie et à la cartographie du champ magnétique. *Revue XYZ*, n°138, p. 33-41.
- GONZALES-AGUILERA D., MUNOZ-NIETO A., GOMEZ-LAHOZ J., HERRERO-PASCUAL J. and GUITIRREZ-ALONSO G., 2009** - 3D Digital surveying and modelling of cave geometry: Application to Paleolithic Rock art. *Sensors*, 9, p. 1108-1127.
- GUIDI G., 2014** - Terrestrial optical active sensor – theory and applications, In *BAR International Series* 2598, 37-60 p.
- ITKIS S.E. and EPELBAUM L.V., 1999** - First results of magnetic prospecting application at Prehistoric sites of Israel. *Journal of the Israel Prehistoric Society*, 28, 177-187.
- ITKIS S.E., 2011** - Magnetic survey at Ramat Bet Shemesh. In: Dagan Y. (editor). *The Ramat Bet Shemesh Regional Project: Landscapes of Settlement from the Paleolithic to the Ottoman Period*, IAA Reports, n° 47, Israel Antiquities Authority, Jerusalem, p. 95-104.
- JAILLET S. et BILLAUD Y., 2012** - Observations géomorphologiques et karstologiques préliminaires sur la grotte des Fraux. In Carozza 2013 « L'âge du Bronze de la grotte des Fraux, Saint-Martin-de-Fressengeas (Dordogne) ». Rapport de fouille 2012, Ministère de la Culture, DRAC Aquitaine, p.17-26.
- JAILLET S., BILLAUD Y. et PONS BRANCO E., 2013** - Analyses endo-karstiques sur les paléo-zones d'entrée de la grotte des Fraux. In Carozza 2013 « L'âge du Bronze de la grotte des Fraux, Saint-Martin-de-Fressengeas (Dordogne) ». Rapport de fouille 2013, Ministère de la Culture, DRAC Aquitaine, p.17-34.
- JRAD A., QUESNEL Y., ROCHETTE P., JALLAOUI C., KHATIB S., BOUKBIDA H. and DEMORY F., 2014** - Magnetic Investigations of Buried Palaeohearths Inside a Palaeolithic Cave (Lazaret, Nice, France). *Archaeological Prospection*, 21, p. 87-101. DOI:10.1002/arp.1469.
- LACANETTE D., MALAURENT P., CALTAGIRONE J.P. et BRUNET J., 2007** - Étude des transferts de masse et de chaleur dans la grotte de Lascaux : le suivi climatique et le simulateur. *Karstologia*, 50, 19-30.
- LACANETTE D., VINCENT S., SARTHOU A., MALAURENT P. and CALTAGIRONE J.P., 2009** - An Eulerian/Lagrangian method for the numerical simulation of incompressible flows interacting with complex obstacles: application to the natural convection in the cave of Lascaux. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52, 2528-2542.
- LANDES T. et GRUSSENMEYER P., 2011** - Les principes fondamentaux de la lasergrammétrie terrestre : systèmes et caractéristiques. *Revue de l'Association Française de Topographie*, n°128, ISSN 0290-9057, 3^e trim., p. 37-49.
- LANDES T., GRUSSENMEYER P. et BOULAASSAL H., 2011** - Les principes fondamentaux de la lasergrammétrie terrestre : acquisition, traitement des données et applications. *Revue de l'Association Française de Topographie*, n°129, ISSN 0290-9057, 4^e trim., p. 25-38.
- LASHERAS CORRUCHAGA J. A. et DE LAS HERAS C., 2010** - Un fac-similé, le choix pour Altamira, *In Situ, Revue des patrimoines*, 13.
- LECOANET H., LEVEQUE F. and SEGURA S., 1999** - Magnetic susceptibility in environmental applications: comparison of field probes, *Phys. Earth Planet. Inter.* 115, p. 191-204.
- LERMA J.L., NAVARRO S., CABRELLES M. and VILLAVARDE V., 2010** - Terrestrial laser scanning and close range photogrammetry for 3D archaeological documentation: the Upper Palaeolithic Cave of Parpalló as a case study. *Journal of Archaeological Science*, 37, 499-507.
- MAHER B.A. and THOMPSON R., 1999** - *QUATERNARY CLIMATES, ENVIRONMENTS, and MAGNETISM*. Edit, Cambridge university press, 390 p.
- PETROGNANI S., BOURILLON R., BURENS A. et CAROZZA L., 2014** - À la poursuite du temps court : les expressions pariétales de l'âge du Bronze de la grotte des Fraux (Dordogne, France). In : P. Paillet (dir.) *Les arts de la Préhistoire : micro-analyses, mises en contexte et conservation*. Actes du colloque « Micro-analyses et datations de l'art préhistorique dans son contexte archéologique » MADAPCA - Paris 16-18 nov. 2011, PALEO, numéro spécial, p. 163-169
- PINÇON G., FUENTES O., BARRÉ R., AUBER O. et HAMON G., 2010** - De la frise magdalénienne in situ ... au centre d'interprétation du Roc-aux-Sorciers : l'usage de la 3D, *In Situ, Revue des patrimoines*, 13.