



Numérisation 3D de la grotte ornée des Fraux (Dordogne) : apport à l'archéologie et à la cartographie du champ magnétique

■ Pierre GRUSSENMEYER - Albane BURENS - Laurent CAROZZA - François LÉVÊQUE - Samuel GUILLEMIN - Vivien MATHÉ

La grotte ornée des Fraux (Saint-Martin-de-Fressengeas, Dordogne) est un vaste réseau de galeries au sein desquelles ont été mis au jour de nombreux aménagements domestiques, des dépôts de mobilier ainsi que des manifestations pariétales, tous datés de l'âge du Bronze. L'étude du site est réalisée dans le cadre d'un Site d'Etude en Ecologie Globale (SEEG) de l'Institut Ecologie et Environnement du CNRS. Dans cet observatoire sont testées, de manière interdisciplinaire, de nouvelles méthodes d'acquisition de données. Dans ce cadre, un partenariat mis en place depuis 2008 entre archéologues, géophysiciens et topographes a permis de conduire la numérisation 3D de la volumétrie totale du réseau souterrain, l'acquisition en haute définition des panneaux ornés et du mobilier, ainsi que le développement d'un protocole de prospection magnétique adapté au milieu souterrain.

L'objet de l'article est de présenter les instruments et les méthodes topographiques mis en œuvre pour la numérisation 3D du site et les résultats de la documentation détaillée adaptée aux besoins des partenaires de l'équipe de recherche.

MOTS-CLÉS

Relevé du patrimoine, topographie, géoréférencement, lasergrammétrie terrestre, photogrammétrie, scanner à bras, PDF-3D, archéologie, prospection magnétique, géophysique, grotte, Age du Bronze.

Introduction

Cet article présente les travaux topographiques entrepris depuis 2008 pour numériser le site de la grotte des Fraux (Saint-Martin-de-Fressengeas, Dordogne). La méthodologie de numérisation 3D de ce réseau souterrain anthropisé durant l'âge du Bronze est basée sur des mesures sans contact (lasergrammétrie, photogrammétrie) afin d'acquérir une documentation 3D complète sans endommager le réseau souterrain. Le but est de présenter des expériences effectuées dans le cadre d'une approche interdisciplinaire et multi-échelle, ainsi qu'une sélection des résultats obtenus lors du relevé de la grotte. Ces travaux, à l'interface entre sciences sociales, sciences de l'environnement et sciences de l'ingénieur, constituent un enjeu essentiel, aussi bien dans le traitement, la gestion et la publication des données que dans le développement d'outils de simulation. L'article présente tout d'abord le contexte archéologique et scientifique du projet avant de détailler les différentes étapes des relevés topographiques, lasergrammétiques et

photogrammétiques mises en œuvre. La dernière partie est consacrée à une application originale de cartographie 3D de la déformation locale du champ magnétique en milieu souterrain s'appuyant sur les modèles 3D calculés par les topographes.

Contexte archéologique

La grotte ornée des Fraux est localisée en Dordogne, au cœur du Parc Naturel Régional du "Périgord-Limousin", sur la commune de Saint-Martin-de-Fressengeas (*figure 1*). Elle constitue pour la France le seul cas connu de grotte de l'âge du Bronze rassemblant en un même lieu des témoignages d'activités domestiques, symboliques et artistiques, en l'absence de toute sépulture humaine. La grotte, découverte en 1989, forme un vaste réseau souterrain de galeries étroites, se développant sur plus d'un kilomètre de long. Surnommée "Le Lascaux de l'âge du Bronze" par les médias au moment de sa découverte, la grotte des Fraux est caractérisée par l'exceptionnelle richesse des vestiges archéologiques

qui y ont été mis au jour. Elle a été inscrite dès 1995 aux Monuments Historiques.

A la fin de l'âge du Bronze, le brusque effondrement de l'entrée de la cavité a permis de préserver intacts les représentations pariétales, les nombreux dépôts de mobiliers céramique et métallique jonchant les galeries, mais aussi les témoignages d'occupations domestiques.

Sur la base de datations radiocarbone et des données issues des travaux archéologiques conduits sur le site, il apparaît que la grotte n'aurait été fréquentée que durant un court intervalle de trois siècles 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. Au vu des premiers résultats, il semble que le réseau ait fait l'objet de courtes fréquentations, répétées de façon continue dans le temps, au cours de ces 3 siècles. On précisera par ailleurs que de multiples indices de la fréquentation d'ours des cavernes (antérieure à la fréquentation





de la grotte par l'homme) ont été décelés dans la grotte : griffades, bauges à ours...

Des traces d'occupations anthropiques ont pu être inventoriées sur près de 70 % du réseau : sols archéologiques parfaitement conservés, aménagements domestiques (tels des marches d'escalier creusées dans l'argile, des trous de torche aménagés dans des parois, des trous de piquet). On a pu inventorier une soixantaine de foyers, principalement utilisés pour l'éclairage et la cuisson. Les étroites galeries de la grotte ont également livré plus de trente dépôts de mobilier céramique et métallique, disséminés dans différents secteurs. Les céramiques (complètes ou fragmentées) constituant ces dépôts portent toutes d'évidentes traces d'usure et d'utilisation. Le bord et la panse de certaines d'entre elles sont recouverts de résidus carbonisés de matière grasse d'origine animale. Les analyses conduites par M. Regert et A. Mazuy (CEPAM, UMR 7264, inédit) révèlent que ces ustensiles ont été utilisés dans le cadre de la préparation de plats à base de viande et de graisse animale.

Dix-huit dépôts de mobilier ont été déposés dans la grotte de façon visible, voire ostentatoire, le long des galeries où au croisement de diverticules. Quatorze autres ont en revanche été intentionnellement cachés au regard des visiteurs, et positionnés derrière des blocs effondrés. Un nombre suffisamment significatif de dépôts a été retrouvé étroitement associé à des panneaux ornés pour dire qu'il s'agit, là aussi, d'un acte délibéré.

De nombreux motifs ont été tracés dans l'argile meuble recouvrant les parois et le plafond de la grotte. Parfaitement préservés, ces tracés schématiques et géométriques n'offrent qu'une faible variété stylistique et technique. La plupart correspondent à des tracés digités ou 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). Dans certains cas les tracés sont organisés en panneaux, dans d'autres cas on observe une distribution des motifs géométriques apparemment aléatoire et quasi continue le long de certaines galeries.

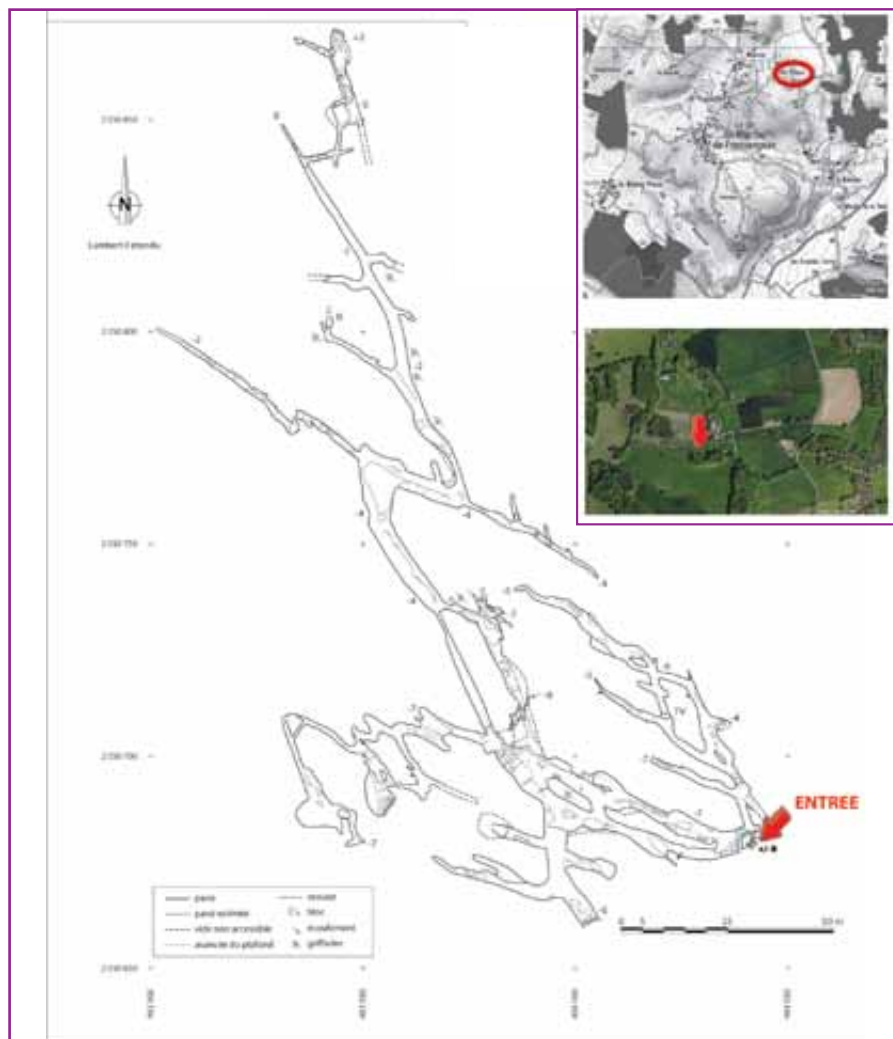


Figure 1. Localisation de la grotte des Fraux (Saint-Martin-de-Fressengeas, Dordogne, France) et plan du réseau souterrain (relevé : Y. Billaud 2013).

Les premiers indices tendent à montrer que les expressions pariétales dateraient 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 14C). Pour l'heure, toute interprétation de ces tracés schématiques nous paraît purement spéculative (expression artistique, support de narration, pratiques fétichistes ou religieuses, proto-pictogrammes, fonction utilitaire)... 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 (vocation funéraire évidente / absence de représentations pariétales...).

Toute la difficulté de l'étude de ce site réside dans la compréhension de son

statut (domestique vs symbolique ou rituel) au fil des occupations. L'une des clés pourrait résider dans la mise en œuvre d'une démarche intégrée et interdisciplinaire, promouvant l'usage de techniques non invasives 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 4 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 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-environnementalistes (...).

Contexte scientifique

Dans le but de préserver l'intégrité de ce site exceptionnel, les méthodes d'acquisition de données mises en œuvre dans la grotte sont non destructives et favorisent le recours à des techniques d'enregistrement et de prise de mesures sans contact. Dans ce contexte, chaque relevé 3D est géoréférencé et constitue logiquement le support d'échange et de communication scientifique commun à l'ensemble des partenaires du projet.

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. Depuis 2008, les travaux dans la grotte des Fraux impliquent différentes techniques basées sur une variété de scanners à balayage et d'appareils photos terrestres (de type réflex numérique) ainsi que d'autres systèmes d'imagerie spatiale. Le modèle 3D géométrique et photoréaliste 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 (figure 2). Les principaux objets archéologiques (représentations pariétales, dépôts) sont également géoréférencés et numérisés pour être associés au modèle global. Les modèles sont ainsi conçus comme des outils de recherche

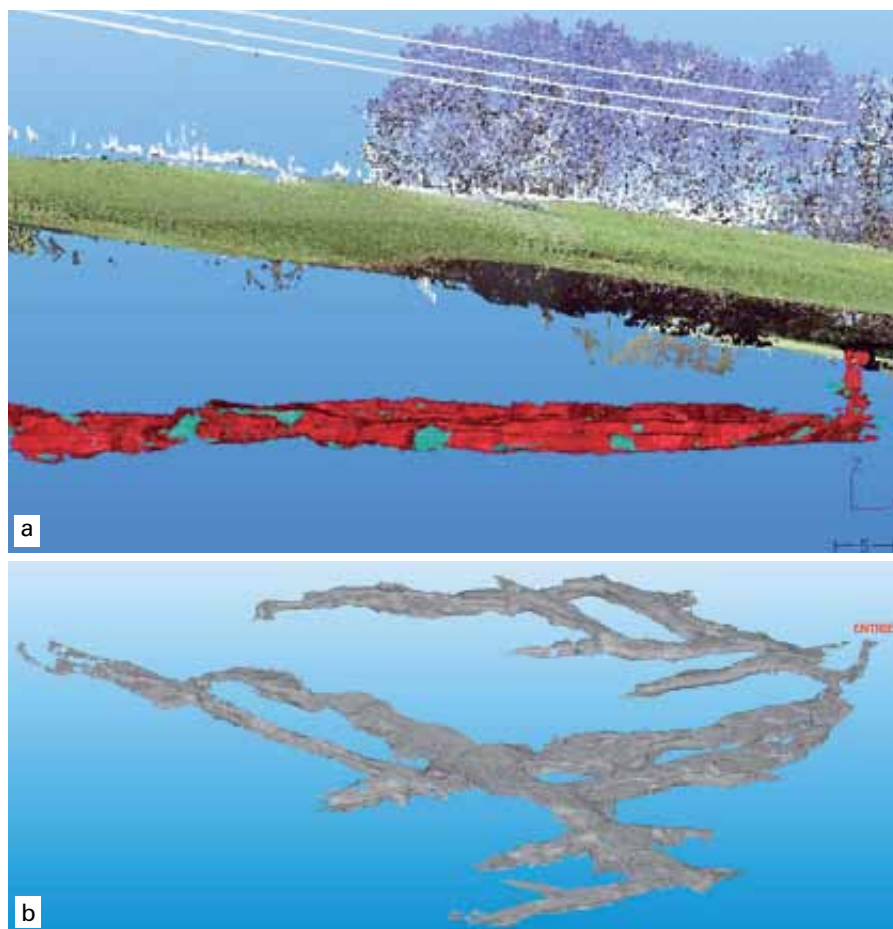


Figure 2. a) Section Ouest > Est situant le réseau souterrain par rapport au terrain naturel ; b) vue en perspective du réseau souterrain modélisé en 2013.

communs, utilisables par tous les partenaires de l'équipe scientifique et multidisciplinaire, et servent d'outil de documentation et de visualisation.

Méthodologie du relevé

Différents types de relevés topographiques (figure 3) ont été déployés depuis 2008 :

- en surface, un réseau de points de canevas d'une précision centimétrique déterminé par GNSS différentiel a permis le rattachement du site au système de référence national. Le canevas polygonal en XYZ mis en place dans le réseau souterrain est relié aux points géodésiques situés à l'entrée de la grotte ;
- un relevé lasergrammétrique terrestre d'une dizaine de stations en surface est destiné au calcul d'un modèle numérique de terrain ;
- des relevés lasergrammétriques de la volumétrie du réseau souterrain (600 m numérisés à ce jour) ;

- des relevés photogrammétriques pour le calcul de nuages de points denses et pour le texturage d'une sélection de modèles 3D ;
- des panoramas réalisés à l'aide de rotules panoramiques.

■ Volumétrie globale de la grotte

L'acquisition des données lasergrammétriques nécessaires à l'établissement du modèle 3D général de la cavité 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). Le processus d'acquisition débute par le positionnement de sphères et cibles de référence sur des points spécifiques déterminés par leur bonne visibilité depuis les différentes stations. L'ensemble des sphères est géoréférencé à l'aide d'une station totale. Un minimum de 3 sphères communes à 2 stations du scanner est nécessaire pour relier entre eux les nuages de



Figure 3. Relevés topographiques sur le site de la grotte des Fraux : a) Levé GNSS ; b) Scanner laser Faro X330 ; c) d) Mise en station dans la grotte ; e) Scanner laser Faro Photon ; f) Scanner laser Photon équipé d'un kit couleur ; g) Scanner laser Faro Focus 3D.

Nous avons opéré un premier test d'acquisition simultanée du modèle 3D couplé aux prises de vues numériques automatiquement géoréférencées par la station totale Trimble VX équipée d'une caméra interne. Suite aux verrous méthodologiques propres à cette technique (résolution insuffisante des clichés à 3,2 mégapixels), nous avons réalisé l'acquisition automatique de photographies des parois ornées par le scanner laser Photon 120 (FARO) équipé d'un kit couleur. Ce matériel permet le couplage du scanner à un appareil photo numérique de qualité (Nikon D200). Là encore, nous nous sommes heurtés à un problème méthodologique lié cette fois à l'impossibilité d'exploiter les clichés générés automatiquement par le scanner : le pilotage automatique interdisant tout réglage de l'appareil photo (et donc une mise au point adaptée à chaque prise de vue) une fois le scanner lancé. L'appareil photo était placé dans la même configuration spatiale que le scanner. En 2010, nous avons poursuivi nos travaux en réalisant une série de prises de vues numériques à très haute

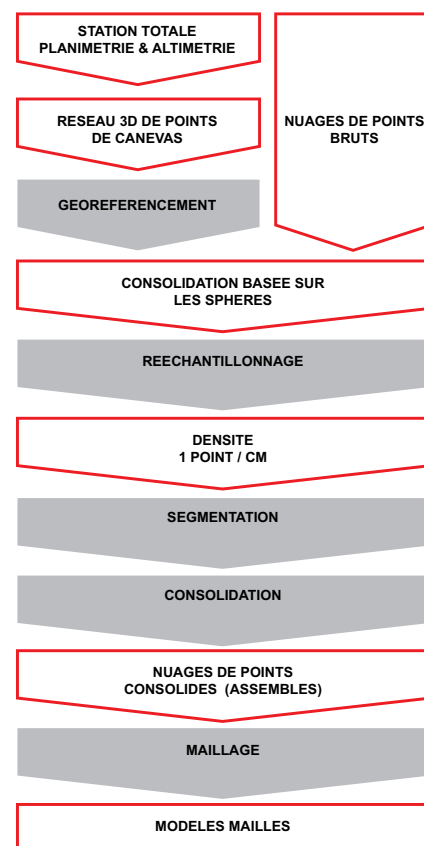


Figure 4. Chaîne de traitement des modèles 3D à partir des nuages de points bruts.

points (Landes *et al.*, 2011). L'acquisition des nuages de points par le scanner 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. La durée d'une station est d'environ 7 minutes. L'acquisition de photos n'est pas réalisable car les conditions d'éclairage en milieu souterrain sont insuffisantes. À ce jour, ce travail de numérisation nous permet de disposer d'un nuage de points à haute densité sur 600 m de galeries (soit environ 130 stations de mesure). Le travail de traitement post-acquisition (*figure 4*) des nuages de points (rééchantillonnage, segmentation, consolidation), leur assemblage sur la base d'un cheminement polygonal, le maillage et les opérations de lissage améliorant le rendu visuel (*figure 5*) 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 des données laser-grammétriques 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).

■ Texturage des modèles

La question du traitement d'images à très haute définition est rapidement apparue primordiale à l'étude des panneaux ornés de la grotte (Fryer *et al.*, 2005). L'acquisition d'images a été possible ponctuellement par l'apport de lumière artificielle (adjonction de lumières froides de type LED). La nécessité de travailler en très haute définition nous a conduits à travailler à 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.

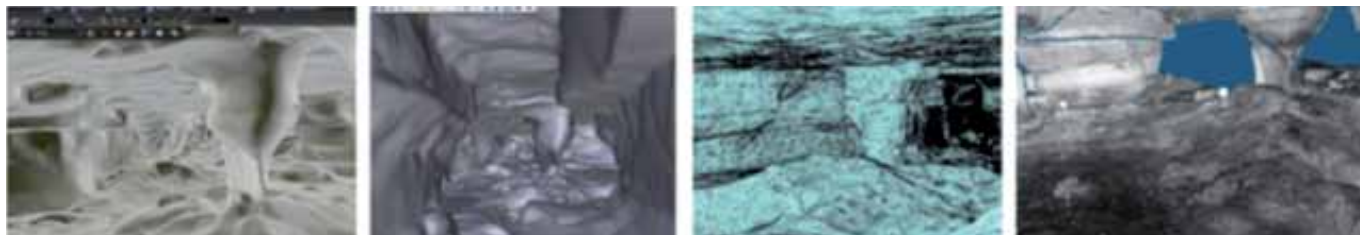


Figure 5. Les Fraux (secteur 13). De gauche à droite : modèle au format PDF3D pour la visualisation dans Acrobat Reader, mode de rendu solide, mode de rendu maillé, nuage de points avec intensité codée en niveaux de gris.

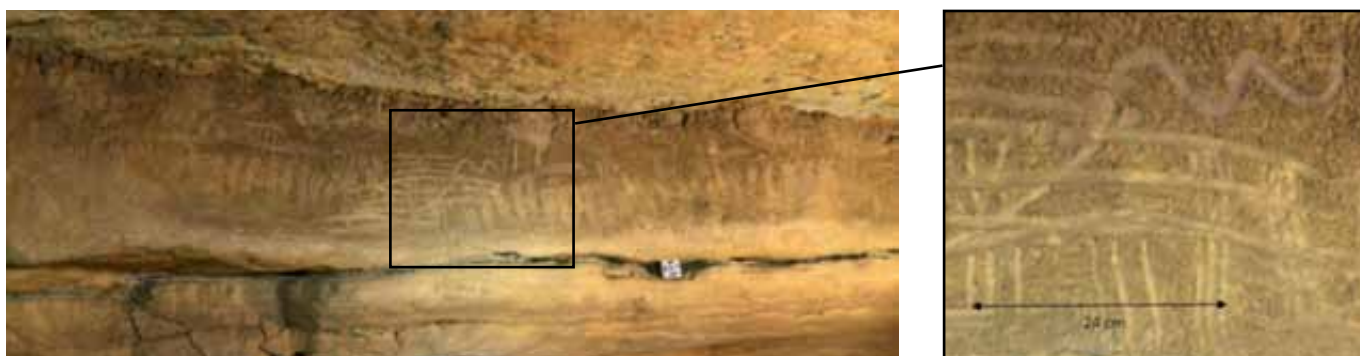


Figure 6. Exemple d'image panoramique du grand panneau orné de la salle du pilier (secteur 13), avec agrandissement d'une partie du panneau, orné de tracés digités.

résolution (avec des temps de pose de plusieurs secondes) d'un grand panneau orné du secteur 13, indépendamment de la lasergrammétrie. 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 (*figure 6*).

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. Les points d'appui (cibles ou codes-barres circulaires) sont soit relevés par la station totale, soit directement dans le nuage de points (*figure 7*). Les images orientées permettent ensuite de coloriser automatiquement le nuage de points préalablement géoréférencé, ou de texturer un modèle maillé (*figure 8*).

■ Numérisation des panneaux ornés

La précision de mesure des scanners laser terrestres est insuffisante pour numériser les tracés schématiques les plus complexes de la grotte. En 2010, 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 $35\ \mu\text{m}$ (19 200 pts/s). L'exceptionnelle qualité d'acquisition de la tête laser est ici accentuée par la présence d'un bras articulé référencé 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. Cette technologie nous a permis d'acquérir des nuages de points d'une qualité exceptionnelle (*figure 9*). Cet équipement permet, par la visualisation en temps réel du nuage de points sur un écran de contrôle via une connection USB, 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. 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.

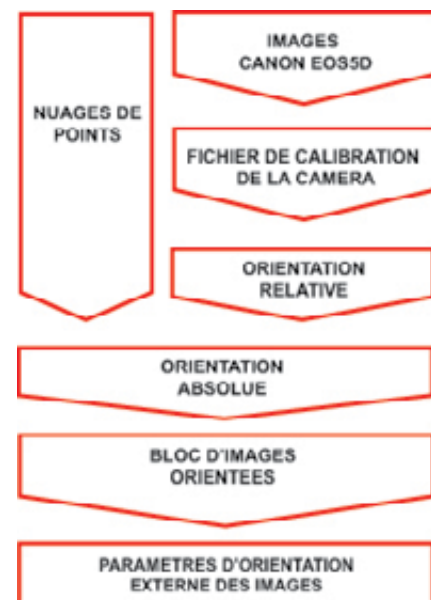


Figure 7. Procédure de calcul de l'orientation externe des images par voie photogrammétrique.

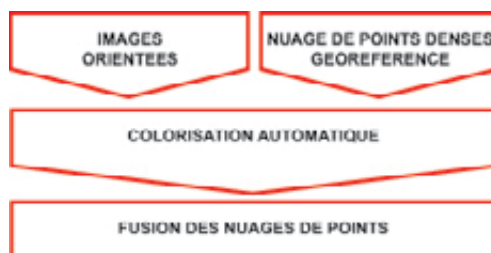


Figure 8. Calcul des nuages de points colorisés à partir des images géoréférencées et orientées.



Figure 9. Numérisation d'un panneau orné du secteur 13 avec le scanner laser ScanArm de Faro ; a) Mise en place du scanner laser ScanArm ; b) numérisation du grand panneau orné du secteur 13 ; c) visualisation en temps réel des nuages de points.

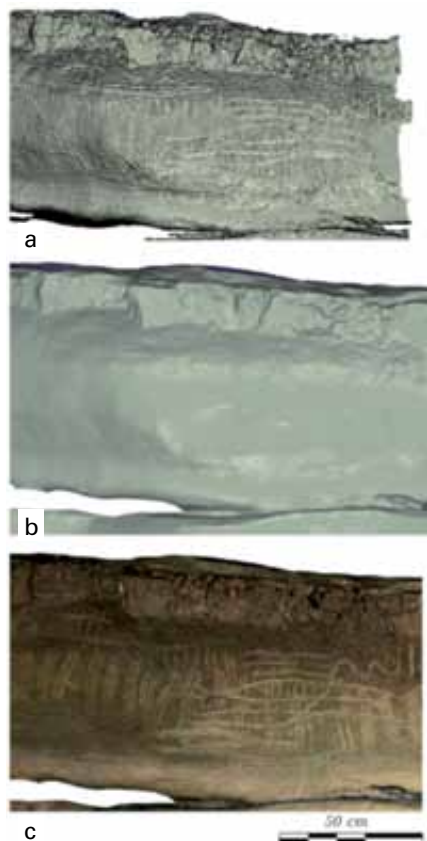


Figure 10. Modèles 3D d'un panneau orné du secteur 13 de la grotte des Fraux : a) modèle numérique du panneau (maillage fin) sans texture issu du scanner ScanArm ; b) modèle numérique simplifié du panneau issu du scanner Photon 80 ; c) modèle 3D texturé calculé à l'aide du modèle simplifié et d'images Canon EOS 5D.

La qualité des nuages issus des scanners Photon ou Focus (moins volumineux) est suffisante pour réaliser le calcul des modèles texturés des panneaux ornés (figure 10). La qualité du rendu dépend en effet des qualités géométriques et radiométriques des images numérisées.

■ Numérisation du mobilier de la grotte

Suite aux recommandations du Service Régional d'Archéologie (SRA) d'Aquitaine invitant l'équipe scientifique à éviter tout contact avec les dépôts de mobilier céramique et métallique jalonnant 14 secteurs de la grotte, l'équipe a numérisé plusieurs dépôts à l'aide du scanner Faro Focus 3D équipé d'une caméra intégrée permettant la colorisation automatique des nuages de points. (Figure 11). Les dépôts ont été géoréférencés en les raccordant au cheminement polygonal de la grotte. Différents types de contraintes limitent, voire interdisent la numérisation 3D de certains dépôts :

- difficultés de mise en station en raison des contraintes topographiques ;
- instabilité des chaos rocheux sur (ou sous) lesquels certains dépôts étaient déposés ;

- inaccessibilité de certains dépôts ;
- distance entre le scanner et les objets inférieure à la distance minimale ;
- existence de vibrations interdisant toute station du scanner sur les passerelles de circulation.

Un minimum de 2 stations par dépôt a été fixé, mais certains d'entre eux, particulièrement volumineux, ont nécessité jusqu'à 6 stations.

Cartographie 3D du champ magnétique

La volonté de l'équipe des archéologues, responsable de l'étude de la grotte des Fraux, de faire de ce site un atelier pour entreprendre des développements méthodologiques, a permis la rencontre de géophysiciens et de topographes. Le fruit de cette rencontre est le développement d'un protocole de prospection magnétique adapté au milieu souterrain (Lévêque *et al.*, 2010), faisant appel à la 3D (programme AIR, CPER Université de la Rochelle).

Le recours aux méthodes magnétiques a été motivé par la forte sensibilité de cette méthode pour détecter et localiser des matériaux naturels ayant chauffé, tels que les sols des multiples foyers présents dans cette grotte. Sur

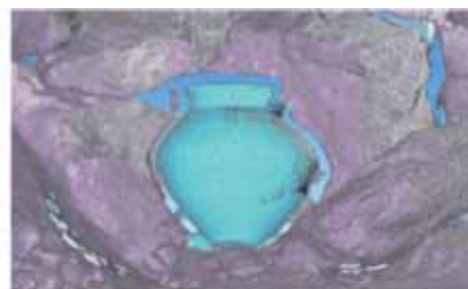
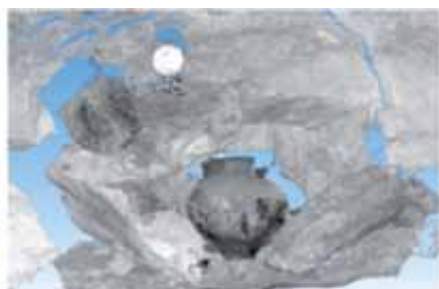


Figure 11. Numérisation d'une jarre de l'âge du Bronze *in situ* à l'aide d'un scanner laser Faro Focus 3D. Visualisation du nuage de points (milieu et droite).

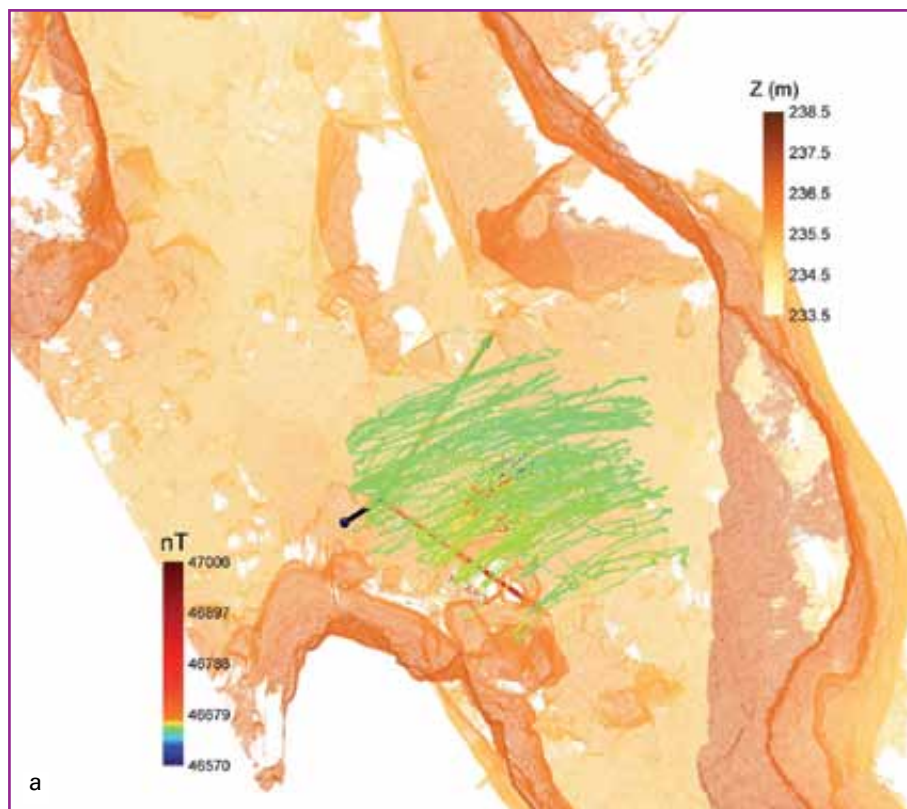


Figure 12. Grotte des Fraux, secteur 13. Nuages de points de l'intensité du champ magnétique en nT au-dessus du foyer F4 et de la surface des parois avec l'altitude Z en échelle de couleur. Le toit de la cavité est tronqué afin de pouvoir visualiser le nuage de mesures de l'intensité du champ magnétique. La partie haute de ce dernier apparaît homogène dans des teintes de vert. La base du nuage apparaît avec des couleurs beaucoup plus contrastées (bleu et rouge) montrant une déformation dipolaire du champ magnétique. Cette déformation résulte de la présence d'une sole de cuisson (aménagée sur le sol) et d'un grand vase de terre cuite (déposée à proximité de la sole). La densité des mesures magnétiques reste modeste à ce stade, mais permet d'appréhender le volume de l'information à travers le nuage.

moyenne de 1 cm. Les deux nuages de points sont représentés en voxels à l'aide du logiciel VOXLER (Golden Software).

Lors des campagnes suivantes sur le terrain, nous avons utilisé des stations totales plus performantes du point de vue de leur cadence de mesure. Nous avons ainsi pu tester les stations LEICA TPS1200+ et TRIMBLE S8 qui, en théorie, permettent des enregistrements à des cadences respectives de 10 et 20 Hz. Dans la pratique, 90 % des mesures sont réalisées avec des cadences respectives de 0.21 et 0.09 s (*tableau 1*).

Plus la cadence de mesure de la position du prisme est élevée, plus l'opérateur peut avoir un mouvement rapide. Du point de vue de l'information géophysique, compte tenu de la

les sites archéologiques de plein air, la démarche consiste à réaliser une cartographie de la déformation locale du champ magnétique à partir d'un carroyage ou avec une géolocalisation par GPS. L'utilisation d'un magnétomètre en mesure continue permet alors d'obtenir une densité de mesure élevée, qui constitue l'un des atouts de cette méthode. Pour ne pas perdre cet atout, il était nécessaire de pouvoir mettre en œuvre des acquisitions à cadence élevée (de l'ordre de 10 Hz). Le verrou est alors la spatialisation de la mesure.

L'objectif est de mettre en œuvre un dispositif de spatialisation ne créant pas de pollution magnétique au niveau des capteurs de la mesure du champ magnétique. Des premiers tests ont été réalisés en 2009 dans la grotte des Fraux en fixant un prisme à 360°, dépol-

lué de ses parties métalliques ferreuses, au capteur mobile (magnétomètre G858 Geometrics). Un second capteur est laissé en position statique afin d'enregistrer la variation temporelle du champ magnétique permettant de la retrancher de l'enregistrement du capteur mobile. Le prisme du capteur mobile est alors relevé en temps réel (*tracking*) par une station totale TRIMBLE VX apportant une géolocalisation à une cadence supérieure à 1s. Cette faible cadence, au regard des capacités de l'instrumentation magnétique, nécessite un déplacement lent, réalisé par l'opérateur portant le capteur.

La *figure 12a* réunit dans une même représentation 3D l'information magnétique, en échelle de couleur, et la volumétrie de la grotte obtenue par lasergrammétrie à une résolution

Année	Référence station	Fréquence de mesure potentielle	Précision du temps	Cadence de mesure effective	
				médian (50%)	décile sup. (90%)
2009	TRIMBLE VX	1 Hz	1 s	> 1 s	
2010	LEICA TPS1200+	10 Hz	0.01 s	0.13 s	0.21 s
2011	TRIMBLE S8	20 Hz	0.01 s	0.05 s	0.09 s

Tableau 1. Caractéristiques des stations totales utilisées pour la cartographie 3D du champ magnétique dans la grotte des Fraux.



géométrie complexe du milieu souterrain, il est nécessaire d'acquérir une information permettant une identification des sources de déformation du champ magnétique à la fois au sol, mais aussi latéralement et au plafond. Il est donc nécessaire de générer une couverture 3D de la variation spatiale du champ magnétique. Il s'avère qu'un déplacement manuel balayant l'espace ne permet pas d'obtenir une couverture spatiale homogène.

L'acquisition d'un nouveau magnétomètre à câbles rallongés (5 m) permet de disposer les capteurs à l'extrémité d'une canne télescopique, elle-même fixée à un trépied à l'aide d'un bras articulé. L'ensemble de ce dispositif est constitué de matériaux non magnétiques. L'extension progressive de la canne permet de contrôler l'espace balayé. Le prisme est alors positionné entre les deux capteurs. La variation temporelle du champ magnétique est enregistrée par le second magnétomètre, placé en "base" dans la grotte.

La figure 13 montre le résultat d'une telle acquisition, permettant à la fois d'accroître la densité de mesures et la régularité de leur répartition. Avec ce dispositif, le temps d'acquisition des mesures est de l'ordre d'une heure pour 2 m² au sol avec une résolution spatiale de l'ordre de 20 cm² au sol et décroissante jusqu'à 1 m au-dessus du sol. La fusion des données nécessite quelques heures de traitement du fait de l'absence de possibilité de synchronisation des instruments actuels. Les améliorations majeures à attendre résident d'une part dans les capacités de traitement et de représentation des résultats (actuellement limitées par les capacités de calcul) avec des nuages de point volumineux et d'autre part dans le développement de nouveaux outils d'analyses de cette information 3D novatrice.

Conclusion

Au cours de ce projet, nous avons cherché à intégrer l'ensemble des données acquises à différentes échelles et à différentes résolutions dans un modèle 3D global géoréférencé. Le couplage entre les modèles numériques de surface et

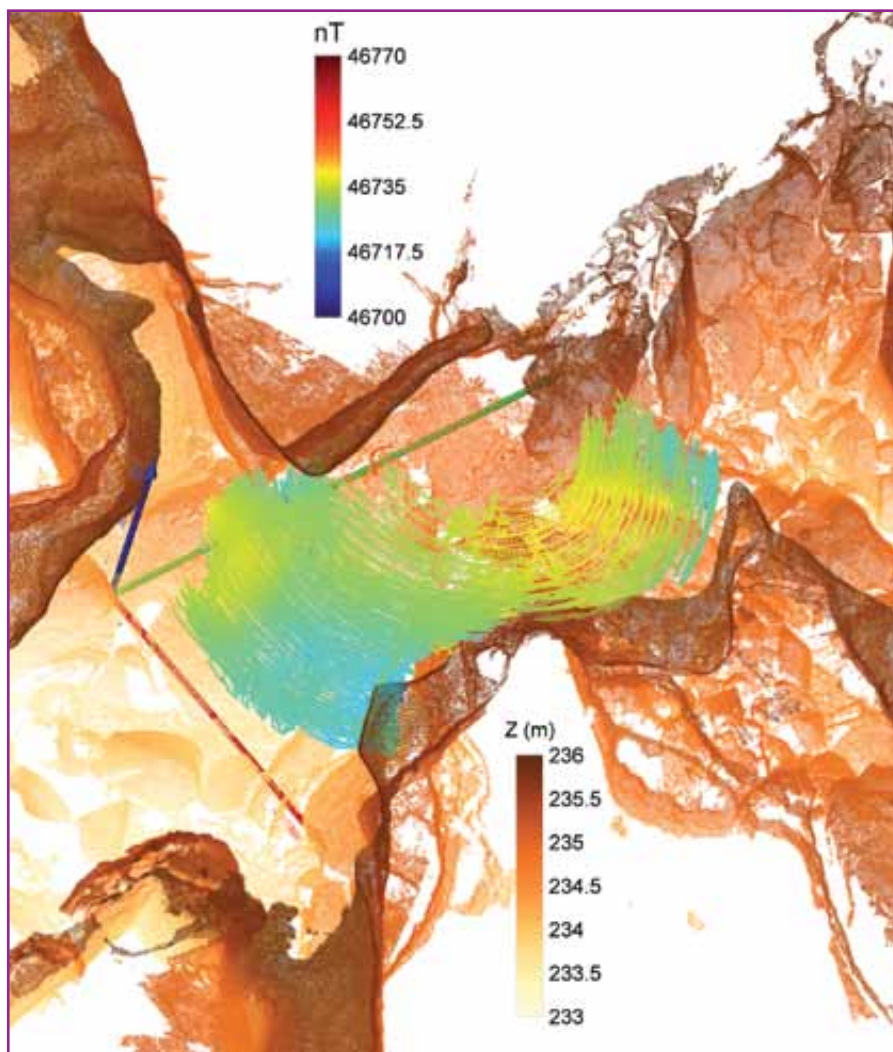


Figure 13 (secteur 40). Nuage de points de l'intensité du champ magnétique en nT et de la surface des parois avec l'altitude Z en échelle de couleur. Le toit de la cavité est tronqué afin de pouvoir visualiser le nuage des mesures de l'intensité du champ magnétique. La densité spatiale des mesures ne permet plus de voir à travers le nuage, excepté dans la partie droite où, pour des raisons de temps d'acquisition l'espacement horizontal et vers le haut ont été réduits. Notez la structuration en arc de cercle induite par l'axe pivot du système d'acquisition.

du réseau souterrain permet de mieux visualiser la morphologie de la cavité. La numérisation de la volumétrie des principales galeries concernées par la présence de structures archéologiques ou des traces de fréquentations anthropiques, se terminera en 2014. Les principaux panneaux ornés de la grotte ont été numérisés en haute définition en 3D à l'aide du bras de mesure ScanArm et texturés par l'ajout de données photogrammétriques. La numérisation des dépôts et des sols a été réalisée par les archéologues, qui se sont appropriés les techniques de mise en œuvre du scanner Faro Focus 3D. Le dispositif de prospection magné-

tique, basé sur une spatialisation de la mesure, permet une représentation originale en 3D de l'information magnétique dans les galeries. L'exploitation et la mise en forme des données 3D devraient également permettre de proposer, en 2014, une version interprétée de l'évolution du dispositif d'entrée de la grotte des Fraux. ●

Remerciements

Les recherches menées 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. Légli et E. Moisan pour leurs contributions dans le cadre de leur projet de fin d'études à l'INSA, et à Edmond (†) et Marcelle Goineaud, propriétaires de la grotte des Fraux, pour l'autorisation de publier les images produites dans la grotte.

Contacts

Pierre GRUSSENMEYER et Samuel GUILLEMIN
INSA de Strasbourg, Spécialité Topographie
Laboratoire ICube, Equipe TRIO, UMR 7357,
Strasbourg, France
pierre.grussenmeyer@insa-strasbourg.fr
samuel.guillemmin@insa-strasbourg.fr

Albane BURENS et Laurent CAROZZA
Laboratoire de Géographie
Environnementale, CNRS,
UMR 5602 GEODE Toulouse, France
albane.burens@univ-tlse2.fr
laurent.carozza@univ-tlse2.fr

François LÉVÊQUE et Vivien MATHÉ
UMR 7266 LIENSs, CNRS, Université de La
Rochelle
fleveque@univ-lr.fr
vmathe@univ-lr.fr

Bibliographie

Burens, A., Grussenmeyer, P., Guillemmin, S., Carozza, L., Lévêque, F., Mathé, V. (2013). *Methodological developments in 3D scanning and modelling of archaeological French Heritage Site: the Bronze Age painted cave of "Les Fraux", Dordogne (France)*. 24e Symposium du CIPA, Strasbourg, 2-6 septembre 2013. Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., XL-5/W2, 131-135, 2013. doi:10.5194/isprsarchives-XL-5-W2-131-2013.

Burens, A., Grussenmeyer, P., Guillemmin, S., Carozza, L., Bourrillon, R., Petrognani, S. (2011). *Numérisation 3D de la grotte ornée des Fraux (Saint Martin-de-Fressengeas, Dordogne, France : approche multiscalaire)*. Ecole thématique "Images et modèles 3D en milieux naturels", Collection EDYTEM, n° 12, année 2011, ISSN 1762-4304, ISBN : 978-2-918435-04-4, EAN : 9782918435044, pp.183-190.

Carozza, L., Burens, A., Billaud, Y., Ferrulo, O., Bourrillon, R., Petrognani, S., Fritz, C., Tosello, G., Goineaud, E., Goineaud, 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 Guilaïne. Archives d'Ecologie Préhistorique Toulouse, 2009, 159-172.

Fryer, J.G., Chandler, J.H., El-Hakim, S.F. (2005). *Recording and modelling an aboriginal cave painting: with or without laser scanning*. In: 1st 3 D-ARCH International Symposium, Mestre-Venice, Italy. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Systems, XXXVI-5/W17, 2005, 8.

Gonzales-Aguilera, D., Munoz-Nieto, A., Gomez-Lahoz, J., Herrero-Pascual, J., Guitierrez-Alonso, G. (2009). *3D Digital surveying and modelling of cave geometry: Application to Paleolithic Rock art*. Sensors, 9, 2009, 1108-1127.

Gonzalez-Aguilera, D., Muñoz-Nieto, A., Rodriguez-Gonzalez, P., Menéndez, M. *New tools for rock art modelling: automated sensor integration in Pindal Cave*. Journal of Archaeological Science 2011, 38, 120-128.

Grussenmeyer, P., Burens, A., Moisan, E., Guillemmin, S., Carozza, L., Bourrillon, R., Petrognani, S. (2012). *3D Multi-scale Scanning of the Archaeological Cave "Les Fraux" in Dordogne (France)*. In M; Ionnadis et al. (Eds): EuroMed 2012; Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics) 7616, pp. 388-395, 2012.

Grussenmeyer, P., Cazalet, B., Carozza, L., Burens, A. (2010a). *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, 2010, ISBN 978-3-902719-69-0, pp. 411-421.

Grussenmeyer, P., Landes, T., Alby, E., Carozza, L. (2010b). *High Resolution 3D Recording and Modelling of the Bronze Age Cave "les Fraux" in Périgord (France)*. ISPRS Comm. V Symposium, Newcastle upon Tyne, June 22-24, UK. Int. Arch. of Photogrammetry and Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XXXVIII, 5, 2010, 262-267. <http://www.isprs.org/proceedings/XXXVIII/part5/papers/221.pdf>

Landes, T., Grussenmeyer, P., 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 trimestre 2011, pp. 25-38.

Landes, T., 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 trimestre 2011, pp. 37-49.

Lerma, J.L., Navarro, S., Cabrelles, M., Villaverde, 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 2010, 37, 499-507.

Lévêque, F., Mathé, V., Brodard, A., Guibert, P., Carozza, L., Burens, A., Grussenmeyer, P., Guillemmin, S. (2010). *See the hearths in the prehistorical caves: 3D magnetic field mapping*. 12th Castle Meeting on New trend in geomagnetism, Paleo, Rock and Environmental Magnetism, August 29 - September 10, 2010, Castle of Nové Hrády, Czech Republic. Travaux géophysiques XXXIX, 2010, 45.

Web : Blog de la grotte des Fraux : <http://champslibres.hypotheses.org/>

ABSTRACT

The archaeological cave "Les Fraux" (Saint-Martin-de-Fressengeas, Dordogne) forms a great network of galleries dated from the Bronze Age where several domestic fireplaces, ceramic and metal deposits, as well as fingerprints incised in the clayey-walls have been discovered. The study of this site is supported by the Institute of Ecology and Environment of the French Council of Scientific Research. Several data recording methods have been tested in this so-called observatory of global ecology, according to an interdisciplinary way. A partnership among archaeologists, geophysicists and surveyors has been working since 2008 on the 3D recording of the global volume of the cave, the high resolution digitizing of the parietal engravings and fingerings, ceramics and finds, as well as on the development of a protocol suitable for the underground magnetic survey. The aim of this paper is to present the 3D recording methods and their instruments and the resulting detailed documentation available to the partners of the research team.