

Découvertes de tracés inédits par imagerie hyperspectrale dans la grotte ornée paléolithique Mayenne-Sciences (France)

Romain LAHAYE, Frédéric DONZE,
Bernard SCHMITT & Romain PIGEAUD



DIRECTEURS DE LA PUBLICATION / PUBLICATION DIRECTORS :
Gilles Bloch, Président du Muséum national d'Histoire naturelle
Étienne Ghys, Secrétaire perpétuel de l'Académie des sciences

RÉDACTEURS EN CHEF / EDITORS-IN-CHIEF : Michel Laurin (CNRS), Philippe Taquet (Académie des sciences)

ASSISTANTE DE RÉDACTION / ASSISTANT EDITOR : Adenise Lopes (Académie des sciences ; cr-palevol@academie-sciences.fr)

MISE EN PAGE / PAGE LAYOUT : Audrina Neveu (Muséum national d'Histoire naturelle ; audrina.neveu@mnhn.fr)

RÉVISIONS LINGUISTIQUES DES TEXTES ANGLAIS / ENGLISH LANGUAGE REVISIONS : Kevin Padian (University of California at Berkeley)

RÉDACTEURS ASSOCIÉS / ASSOCIATE EDITORS (*, *took charge of the editorial process of the article/a pris en charge le suivi éditorial de l'article*) :

Micropaléontologie/*Micropalaeontology*
Lorenzo Consorti (Institute of Marine Sciences, Italian National Research Council, Trieste)

Paléobotanique/*Palaeobotany*
Cyrille Prestianni (Royal Belgian Institute of Natural Sciences, Brussels)
Anaïs Boura (Sorbonne Université, Paris)

Métazoaires/*Metazoa*
Annalisa Ferretti (Università di Modena e Reggio Emilia, Modena)

Paléoichthyologie/*Palaeoichthyology*
Philippe Janvier (Muséum national d'Histoire naturelle, Académie des sciences, Paris)

Amniotes du Mésozoïque/*Mesozoic amniotes*
Hans-Dieter Sues (Smithsonian National Museum of Natural History, Washington)

Tortues/*Turtles*
Walter Joyce (Universität Freiburg, Switzerland)

Lépidosauromorphes/*Lepidosauromorphs*
Hussam Zaher (Universidade de São Paulo)

Oiseaux/*Birds*
Jingmai O'Connor (Field Museum, Chicago)

Paléomammalogie (mammifères de moyenne et grande taille)/*Palaeomammalogy (large and mid-sized mammals)*
Grégoire Métais (CNRS, Muséum national d'Histoire naturelle, Sorbonne Université, Paris)

Paléomammalogie (petits mammifères sauf Euarchontoglires)/*Palaeomammalogy (small mammals except for Euarchontoglires)*
Robert Asher (Cambridge University, Cambridge)

Paléomammalogie (Euarchontoglires)/*Palaeomammalogy (Euarchontoglires)*
K. Christopher Beard (University of Kansas, Lawrence)

Paléoanthropologie/*Palaeoanthropology*
Aurélien Mounier (CNRS/Muséum national d'Histoire naturelle, Paris)

Archéologie préhistorique (Paléolithique et Mésolithique)/*Prehistoric archaeology (Palaeolithic and Mesolithic)*
Nicolas Teyssandier* (CNRS/Université de Toulouse, Toulouse)

Archéologie préhistorique (Néolithique et âge du bronze)/*Prehistoric archaeology (Neolithic and Bronze Age)*
Marc Vander Linden (Bournemouth University, Bournemouth)

RÉFÉRÉS / REVIEWERS : <https://sciencepress.mnhn.fr/fr/periodiques/comptes-rendus-palevol/referes-du-journal>

COUVERTURE / COVER :

Made from the Figures of the article.

Comptes Rendus Palevol est indexé dans / *Comptes Rendus Palevol is indexed by:*

- Cambridge Scientific Abstracts
- Current Contents® Physical
- Chemical, and Earth Sciences®
- ISI Alerting Services®
- Geoabstracts, Geobase, Georef, Inspec, Pascal
- Science Citation Index®, Science Citation Index Expanded®
- Scopus®.

Les articles ainsi que les nouveautés nomenclaturales publiés dans *Comptes Rendus Palevol* sont référencés par /
Articles and nomenclatural novelties published in Comptes Rendus Palevol are registered on:

- ZooBank® (<http://zoobank.org>)

Comptes Rendus Palevol est une revue en flux continu publiée par les Publications scientifiques du Muséum, Paris et l'Académie des sciences, Paris
Comptes Rendus Palevol is a fast track journal published by the Museum Science Press, Paris and the Académie des sciences, Paris

Les Publications scientifiques du Muséum publient aussi / *The Museum Science Press also publish:*

Adansonia, Geodiversitas, Zoosystema, Anthropolozologica, European Journal of Taxonomy, Naturae, Cryptogamie sous-sections *Algologie, Bryologie, Mycologie*.

L'Académie des sciences publie aussi / *The Académie des sciences also publishes:*

Comptes Rendus Mathématique, Comptes Rendus Physique, Comptes Rendus Mécanique, Comptes Rendus Chimie, Comptes Rendus Géoscience, Comptes Rendus Biologies.

Diffusion – Publications scientifiques Muséum national d'Histoire naturelle
CP 41 – 57 rue Cuvier F-75231 Paris cedex 05 (France)
Tél. : 33 (0)1 40 79 48 05 / Fax : 33 (0)1 40 79 38 40
diff.pub@mnhn.fr / <https://sciencepress.mnhn.fr>

Académie des sciences, Institut de France, 23 quai de Conti, 75006 Paris.

© This article is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)
ISSN (imprimé / *print*) : 1631-0683/ ISSN (électronique / *electronic*) : 1777-571X

Découvertes de tracés inédits par imagerie hyperspectrale dans la grotte ornée paléolithique Mayenne-Sciences (France)

Romain LAHAYE

Laboratoire d'Archéosciences et Sciences du Patrimoine (LASP),
Université de Sherbrooke, Campus principal, 2500, boulevard de l'Université,
Sherbrooke J1K 2R1 (Canada)
romain.lahaye@USherbrooke.ca (auteur correspondant)

Frédéric DONZE

Laboratoire de géosciences, Institut des Sciences de la Terre (ISTerre),
Université Grenoble Alpes, CS 40700, F-38058 Grenoble (France)
frederic.donze@univ-grenoble-alpes.fr

Bernard SCHMITT

CNRS, Institut de Planétologie et Astrophysique,
Université Grenoble Alpes, CS 40700, F-38058 Grenoble (France)
bernard.schmitt@univ-grenoble-alpes.fr

Romain PIGEAUD

Centre de Recherche en Archéologie, Archéosciences, Histoire (CReAAH),
Université de Rennes-1, Centre de recherches sur les arts et le langage (CRAL),
EHESS/CNRS, 54 boulevard Raspail, F-75006 Paris (France)
romain.pigeaud@ehess.fr

Soumis le 2 décembre 2024 | Accepté le 3 juillet 2025 | Publié le 3 décembre 2025

urn:lsid:zoobank.org:pub:B56B3F01-3174-4F96-9008-ABFDFFC8B53B

Lahaye R., Donze F., Schmitt B. & Pigeaud R. 2025. — Découvertes de tracés inédits par imagerie hyperspectrale dans la grotte ornée paléolithique Mayenne-Sciences (France). *Comptes Rendus Palevol* 24 (26) : 531-544. <https://doi.org/10.5852/cr-palevol2025v24a26>

RÉSUMÉ

L'étude de l'art rupestre bénéficie désormais des avancées technologiques en imagerie. Parmi ces technologies, l'imagerie hyperspectrale (HSI) se révèle être un outil puissant pour analyser les peintures anciennes en révélant des détails invisibles à l'œil nu. Les travaux de recherche présentés appliquent l'HSI à l'art rupestre paléolithique de la grotte ornée Mayenne-Sciences (Mayenne, France), dont les dessins et gravures datent du Gravettien. L'objectif principal était de déterminer quel type d'informations supplémentaires l'HSI peut apporter par rapport aux méthodes traditionnelles d'analyse d'art rupestre, en particulier dans le spectre visible et le très proche infrarouge. L'enjeu était également de tester l'application dans un contexte difficile : une obscurité totale nécessitant un

MOTS CLÉS
Imagerie hyperspectrale,
HSI,
grotte ornée,
art paléolithique,
archéologie.

éclairage adapté, une hygrométrie élevée et la présence de particules d'argile pouvant s'infiltrer dans les appareillages. Un imageur HSI Specim IQ a permis d'acquérir des images hyperspectrales sous éclairage artificiel de différentes figures pariétales, principalement tracées au pigment noir sur des concrétions calcaires. Des transformations mathématiques avancées réduisant la dimensionnalité des données ont permis d'extraire, de différencier les pigments utilisés et de révéler des tracés jusqu'alors inconnus. Un bison dessiné au charbon, très altéré, est apparu quasiment tel qu'il était lors de son tracé initial. Par ailleurs, deux chevaux semblent avoir été tracés en plusieurs fois. Nos résultats montrent que l'HSI est particulièrement efficace pour améliorer le contraste des pigments dans le visible, tout en apportant de nouvelles informations discriminantes dans la partie très proche infrarouge du spectre. Cette méthode non invasive a permis de révéler de nouvelles figures, de préciser la composition des pigments et d'apporter des éléments inédits sur les méthodes de création de ces œuvres d'art. Cette étude souligne l'importance de l'intégration des technologies d'imagerie avancées dans l'étude de l'art rupestre et ouvre des perspectives pour l'application de l'HSI à d'autres sites archéologiques.

ABSTRACT

New paintings and drawings in the Paleolithic cave of Mayenne-Sciences (France) revealed by hyperspectral imaging.

Rock art research requires precise redrawing, which began in the late 19th century to authenticate and disseminate Palaeolithic paintings and engravings. Currently, redrawing methods have evolved towards digital photography and computer-assisted analysis, revealing details invisible to the naked eye. However, accurate documentation still requires specific equipment and meticulous image processing. Image processing software is essential for enhancing the contrast of photographs and revealing subtle details, making it a crucial tool for the analysis of rock art. Rock art studies are now benefiting from technological advances in imaging. Among such technologies, hyperspectral imaging (HSI) has emerged as a powerful tool for the analysis of ancient paintings, disclosing details that remain invisible to the naked eye. This cutting-edge technology is particularly effective for complex applications, capturing hundreds of extended spectral bands. These bands, which are both contiguous and finely sampled, can extend well beyond the visible spectrum. HSI creates a detailed spectral signature for each pixel, forming a hypercube or three-dimensional data cube. This hypercube consists of a series of images, each image corresponding to a specific spectral band captured by the imager.

The research presented here applies HSI to Palaeolithic parietal art in the Mayenne-Sciences cave (Mayenne, France), whose drawings and engravings have been dated to the Gravettian period, between 25 800 and 27 700 calBP. The main objective was to determine what additional information HSI could provide over traditional rock art analysis methods, particularly in the visible and very near infrared spectrum. An additional challenge involved testing the application under difficult conditions: total darkness requiring appropriate lighting, high humidity (almost 99%) and the presence of clay particles that could infiltrate the equipment. Using an HSI Specim IQ imager, we acquired hyperspectral images under artificial lighting of various parietal figures, mainly drawn with black pigment on limestone concretions. This non-invasive method has enabled the discovery of new figures, clarification of pigment composition, and shed new light on the techniques used to create these works of art. The findings from the Mayenne-Sciences cave demonstrate the effectiveness of hyperspectral imaging (HSI) not only in complementing visible images but also in detecting previously unknown paintings and signs. Using advanced mathematical transformations to reduce the dimensionality of the data, we were able to extract and differentiate the pigments used, revealing previously unknown paintings and drawings. A charcoal-drawn bison, which had been heavily altered, appeared almost exactly as it had been drawn by the Palaeolithic artist. In addition, two horses appear to have been drawn several times, with analysis revealing at least two layers of different pigments. Finally, the discovery of a new triangular sign with rounded edges (a sign that was found in two caves nearby) is of particular importance. The results also indicate that HSI is highly effective in enhancing pigment contrast in the visible range and providing additional discriminating information in the near-infrared spectrum. The potential to re-evaluate and refine the interpretation of prehistoric artworks through the use of advanced imaging technologies such as HSI is therefore considerable.

The study emphasises the importance of integrating these technologies into the study of rock art and opens up prospects for their application to other archaeological sites. Regarding future prospects, this work emphasises the necessity for further exploration of HSI applications in other rock art sites, while considering the specific challenges associated with each environment. The ongoing improvement of hyperspectral imaging technologies and the adaptation of methodologies to varying field conditions could unveil new research opportunities in the study of prehistoric art. Moreover, the integration of SWIR (Short-Wave Infrared) HSI, or VNIR (Visible and Near Infrared) combined to SWIR point spectroscopy, alongside other in-situ analytical techniques such as X-ray microfluorescence and Raman spectrometry, has the potential to enrich our insight. Furthermore, when coupled with laboratory analytical techniques that necessitate sampling, such as “invasive” methods (mass

KEY WORDS
Hyperspectral imaging,
HSI,
rock art studies,
Palaeolithic art,
archaeology.

spectrometry and scanning electron microscopy), a more comprehensive understanding of pigments and painting techniques may be facilitated. Such an approach would not only refine our interpretation of these ancient practices but also illuminate artistic traditions in the Palaeolithic era. In addition to its scientific benefits, the hyperspectral imaging study of the Mayenne-Sciences cave enhances our perception of rock art as a crucial element of humanity's cultural heritage. This research reveals previously unseen details and provides new interpretations of prehistoric works of art, contributing to a better understanding of the history of art. It also underlines the importance of preserving these irreplaceable testimonies to human creativity.

INTRODUCTION

Dans le domaine de la recherche sur les arts rupestres, mobiliers et pariétaux, l'acte de relever les figurations est indispensable pour mener une étude approfondie. Cette pratique, amorcée à la fin du XIX^e siècle, avait pour objectif initial d'authentifier les dessins paléolithiques et de les rendre accessibles à un plus large public. Elle consistait à extraire ces représentations anthropiques de leur support naturel afin de les transmettre aux chercheurs ainsi qu'au grand public qui ne pouvait se rendre sur le site en personne.

Toutefois, la documentation précise de ces œuvres millénaires se heurte à une problématique fondamentale : comment révéler et analyser des tracés souvent altérés par des processus taphonomiques complexes, masqués sous des concrétions calcaires ou dont les pigments se sont dégradés au point de devenir invisibles à l'œil nu ?

L'évolution méthodologique de l'étude des peintures rupestres reflète cette quête constante d'amélioration documentaire. Les méthodes de relevés sont passées du dessin à main levée et du traçage direct à des approches plus sophistiquées comme la photographie numérique et l'analyse d'images assistée par ordinateur (Aujoulat & Perazio 2005 ; Lahaye 2023 ; Paillet 2023). Ces avancées technologiques ont non seulement amélioré la précision des relevés, mais ont également révélé l'existence de motifs jusqu'alors inconnus, mettant en lumière des peintures, des sous-dessins et des repentirs invisibles à l'œil nu. La photographie numérique, malgré sa facilité d'utilisation et son intégration avec des logiciels de traitement d'image comme DStretch®, reste néanmoins limitée au spectre visible et peine à discriminer des pigments de composition similaire ou à pénétrer les voiles de calcite qui recouvrent souvent les œuvres pariétales.

L'imagerie multispectrale a constitué une première réponse à ces limitations en ajoutant quelques canaux dans le proche infrarouge. Le projet Archéologie et Taphonomie de la Paroi Ornée à Cussac (ArTaPOC) a notamment démontré l'utilité de cette approche pour comprendre la taphonomie des parois ornées (Jaubert *et al.* 2020). Cependant, ces systèmes se limitent généralement à quelques filtres spectraux larges et spécifiques, ne permettant pas une caractérisation fine des signatures spectrales des pigments.

L'imagerie hyperspectrale (HSI) représente un saut qualitatif majeur dans cette évolution technologique. Issue des missions d'exploration spatiale dès la fin des années 1980, notamment avec l'instrument ISM français pour les missions Phobos (Hauber *et al.* 1991), cette technologie capture des centaines de bandes spectrales étendues, contiguës et finement échantillonnées. L'HSI crée pour chaque pixel une signature spectrale détaillée, formant un hypercube ou cube de données tridimensionnel où chaque image correspond à une bande spectrale spécifique (Jaiswal *et al.* 2023) (Fig. 1). Cette richesse d'information spectrale permet de reconnaître les signatures distinctives des pigments même présents en quantités infimes, en se basant sur leur composition chimique plutôt que sur des différences visibles de couleur.

Dans le contexte spécifique de l'art rupestre préhistorique, trois groupes de recherche ont été pionniers dans l'utilisation de l'HSI Visible-Near InfraRed (VNIR). Bayarri *et al.* (2015, 2019, 2021) ont appliqué cette technologie dans les grottes d'El Castillo et d'Altamira en Cantabrie, révélant jusqu'à 76 % de figures additionnelles dissimulées sous des couches de calcite. Leur approche, bien que novatrice, s'est principalement concentrée sur la détection de nouvelles figures sans explorer pleinement les capacités de discrimination des pigments. Schmitt *et al.* (2023) ont franchi une étape supplémentaire dans le Sahara central en démontrant comment l'HSI peut révéler des détails invisibles sur des parois de grès oxydés, mais surtout en établissant la supériorité de l'Analyse en Composantes Indépendantes (ACI) sur l'Analyse en Composantes Principales (ACP) pour séparer efficacement les pigments de la texture rocheuse (Fig. 2). Leur travail en lumière naturelle diffuse a cependant limité l'exploitation du proche infrarouge au-delà de 920 nm. Defrasne *et al.* (2023) ont confirmé ces découvertes à l'abri Otello en Provence, ajoutant l'utilisation combinée de mesures VNIR et Short-Wave InfraRed (SWIR) (1 000-2 500 nm) pour fournir des données sur la composition minéralogique des pigments.

Malgré ces avancées significatives, plusieurs lacunes méthodologiques et applicatives demeurent. Premièrement, l'application de l'HSI en milieu souterrain profond avec éclairage artificiel contrôlé reste peu documentée, alors que la majorité de l'art pariétal paléolithique se trouve dans de telles conditions. Deuxièmement, la discrimination fine entre

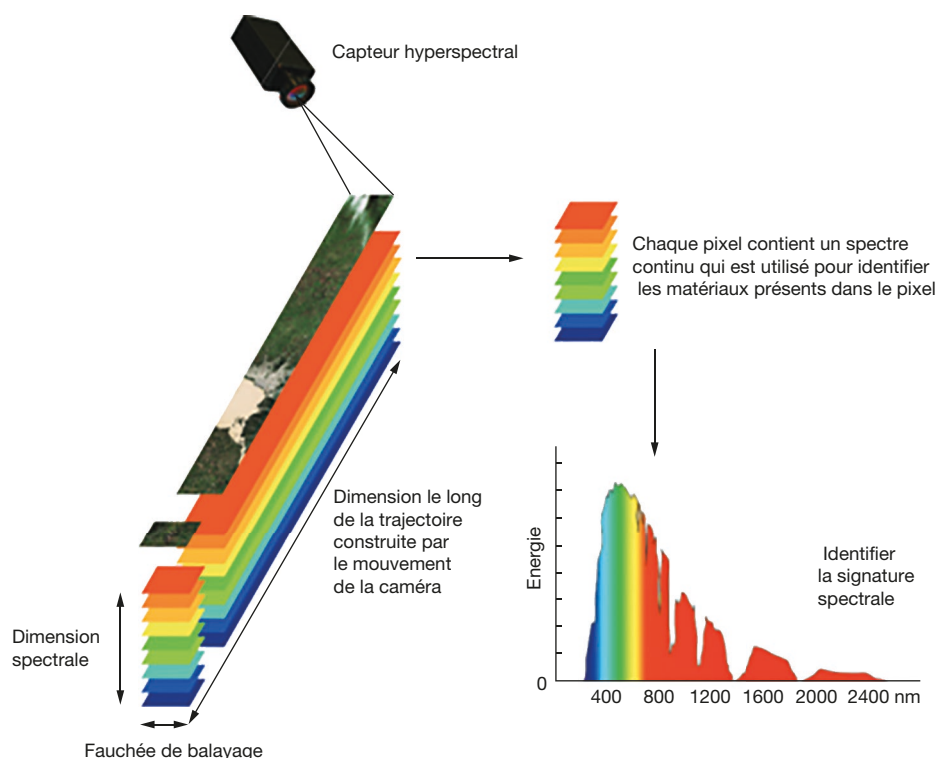


FIG. 1. — Principe de mesure de l'imagerie hyperspectrale et description des données acquises. Dans le mode *pushbroom* de l'imagerie hyperspectrale, l'imageur balaie la surface ligne par ligne et enregistre un spectre complet à chaque position de pixel. Une image à chaque longueur d'onde formant un cube de données 3D est obtenue (deux dimensions spatiales et une dimension spectrale). D'après Aiazzi *et al.* 2012.

pigments de même nature, mais potentiellement d'origines ou d'époques différentes, nécessite des protocoles analytiques plus sophistiqués que la simple détection. Troisièmement, l'intégration systématique de transformations mathématiques avancées comme l'ACI, la Minimum Noise Fraction (MNF) ou autres méthodes de réduction dimensionnelle pour extraire l'information pertinente des hypercubes reste sous-exploitée dans ce domaine.

La présente étude vise à combler ces lacunes en appliquant l'imagerie hyperspectrale VNIR (400-1 000 nm) aux peintures rupestres de la grotte ornée Mayenne-Sciences (Mayenne, France). Ce site, découvert en 1967 et daté du Gravettien ($26\,666 \pm 864$ à $27\,255 \pm 413$ calBP), représente l'une des douze grottes ou abris paléolithiques identifiés au nord de la Loire (Pigeaud *et al.* 2003; Pigeaud 2004). Les 59 unités graphiques recensées, principalement réalisées au charbon de bois, présentent des défis analytiques particuliers : forte altération par les écoulements de calcite, superpositions de tracés, et dégradation différentielle des pigments.

Notre approche méthodologique combine plusieurs éléments distinctifs. D'abord, nous avons développé un protocole d'acquisition optimisé pour l'environnement souterrain, utilisant un système d'éclairage halogène de 1 500W garantissant une illumination uniforme et un excellent rapport signal/bruit sur toute la gamme spectrale. Ensuite, nous appliquons systématiquement l'ACI pour extraire et concentrer l'information spectrale, suivant les recommandations de Schmitt *et al.* (2023), mais en l'adaptant aux spécificités des pigments noirs sur substrat

calcaire. Enfin, nous corrélons les signatures spectrales obtenues avec l'analyse stratigraphique des tracés pour proposer des interprétations sur les techniques de création et les phases d'exécution.

L'objectif de cette étude est triple : 1) démontrer la capacité de l'HSI à révéler des œuvres invisibles dans des conditions d'acquisition difficiles ; 2) établir des protocoles reproductibles pour l'analyse hyperspectrale en grotte ornée ; et 3) apporter de nouvelles données sur les techniques artistiques gravettiennes et leur évolution temporelle. Au-delà de l'apport scientifique immédiat pour la compréhension du site Mayenne-Sciences, cette recherche vise à établir l'HSI comme un outil incontournable pour l'étude non invasive de l'art rupestre, ouvrant des perspectives pour la réévaluation de sites déjà étudiés et la découverte de nouvelles œuvres dans ces patrimoines exceptionnels.

MATÉRIEL ET MÉTHODE

ACQUISITION DE DONNÉES

À L'AIDE DE L'IMAGEUR HSI SPECIM IQ

Notre étude repose sur l'utilisation de l'imageur SPECIM IQ opérant dans le VNIR, couvrant une gamme spectrale de 400 à 1 000 nm, avec un échantillonnage spectral de 3 nm et une résolution spectrale de 7 nm. Il délivre un cube de données de 512×512 pixels, avec une résolution spatiale comprise entre 0,4 et 0,8 mm selon une distance d'acquisition variant de 0,5 à 1 m. Cette configuration se compare favorablement

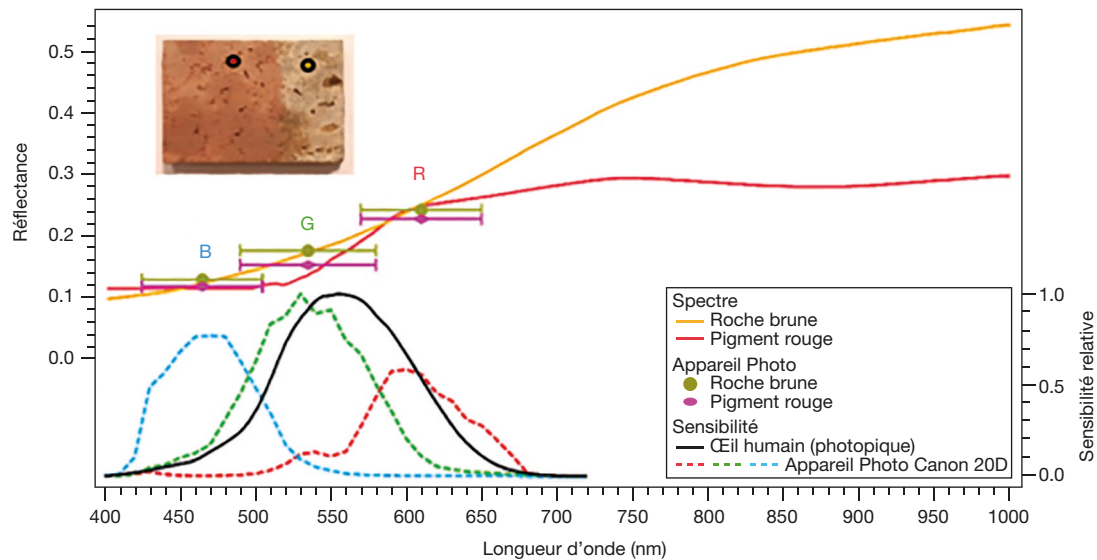


FIG. 2. — Comparaison entre les spectres de l'imagerie hyperspectrale VNIR et le signal d'un appareil photographique RVB classique pour des pigments de peinture rupestre typiques. Les spectres de réflectance à haute résolution mesurés sur une couche très mince de pigment rouge «Beauregard» (rouge) peint sur une roche carbonatée, et la roche non peinte elle-même (brune) sont tracés avec une ligne continue (échelle de gauche). Les points sont des simulations correspondant au signal RVB d'un appareil photo numérique (Canon 20D) extrait de ces spectres en les convoluant avec les bandes passantes de ses filtres (lignes pointillées en bas, échelle de droite) avec des «barres d'erreur» représentant la largeur à mi-hauteur des trois filtres. La courbe noire représente la sensibilité photopique totale de l'œil. D'après Schmitt *et al.* 2023.

à celles employées dans d'autres études récentes : par exemple, Bayarri *et al.* (2019, 2021) ont utilisé une gamme spectrale similaire à El Castillo, mais avec une résolution spatiale inférieure ; Schmitt *et al.* (2023) ont travaillé dans des conditions de lumière diffuse naturelle, limitant l'exploitation au-delà de 920 nm ; Defrasne *et al.* (2023) ont élargi leur analyse au SWIR (1 000-2 500 nm) pour une caractérisation minéralogique plus poussée.

Pour répondre aux exigences de l'imagerie hyperspectrale dans un environnement souterrain, nous avons opté pour un système d'éclairage artificiel à large spectre composé de deux projecteurs halogènes de 750 W chacun, positionnés latéralement à la scène. Ce dispositif assure une illumination homogène sur des zones allant de 50 × 50 cm à 1 × 1 m, avec une variation d'intensité inférieure à 15 %, et une stabilité temporelle remarquable (1 %) pendant les deux minutes d'acquisition. Contrairement aux LED, ces sources halogènes garantissent une couverture spectrale continue sur toute la plage d'acquisition du SPECIM IQ (Fig. 3), condition indispensable pour garantir un excellent rapport signal/bruit.

Voici quelques informations clés pour reproduire notre approche technique. Le processus de mesure comprend six étapes :

1. Mise au point : l'imageur hyperspectral est mis au point sur la cible à l'aide de la caméra viseur, c'est-à-dire un petit appareil photographique RVB situé juste au-dessus de l'imageur spectral, avec une direction de vue identique, mais un champ de vision plus large. La mise au point est effectuée manuellement en mettant en évidence les bords nets.

2. Image contextuelle : pour superposer les images de l'imageur spectral et de la caméra viseur, leur parallaxe est corrigée automatiquement ou manuellement.

3. Panneau de référence : après avoir sélectionné le champ de vision de l'imageur HSI, un panneau de référence spectralement blanc sur les gammes visibles et proche infrarouge (Spectralon® 99 %, 10 × 10 cm) est positionné à côté de la paroi peinte, proche du centre du champ de vision de l'instrument pour permettre de capturer les caractéristiques spectrales de l'éclairage. Après optimisation du temps d'intégration et mesure, une partie de la zone blanche de la cible de référence (typiquement 2 000 à 8 000 pixels selon la distance imageur-paroi) est sélectionnée par seuillage de l'intensité de l'image, suivi d'un algorithme de connectivité des pixels. Ces pixels sont moyennés pour fournir le spectre de référence.

4. Mesure de la scène : après ces étapes d'ajustement initiales et optimisations du temps d'intégration, le processus d'enregistrement de l'image est déclenché. Tout d'abord, une image de référence sombre représentant le signal de fond du capteur et le bruit de lecture, sans lumière incidente, est enregistrée automatiquement. Ensuite, le scanner de ligne démarre l'acquisition des données proprement dite.

5. Validation : une fois que l'image complète de 512 × 512 pixels est numérisée, la mise au point et d'éventuelles saturations ou sous-expositions sont vérifiées dans la vue de validation des données avec une image RVB synthétique dérivée du cube d'image hyperspectrale et des histogrammes de pixels d'intensité minimale et maximale.

6. Calibration : après avoir éliminé le fond sombre, le processus de calibration convertit le cube hyperspectral en unité de «facteur de réflectance» en divisant les spectres de tous les pixels par le spectre moyen de la zone sélectionnée de la référence Spectralon. Toutes les données sont automatiquement enregistrées : les cubes de données hyperspectrales brutes et calibrées, les spectres de référence sombre et blanc, un aperçu RVB des données HSI et l'image contextuelle RVB.



FIG. 3. — L'imageur hyperspectrale Specim IQ sur le terrain, devant le panneau principal de la grotte Mayenne-Sciences. La cible de référence se situe sous l'imageur. Crédits : photo de Romain Lahaye.

ANALYSE DES DONNÉES HYPERSPECTRALES

Un ensemble de données de réflectance hyperspectrale obtenues sur divers panneaux a été analysé en utilisant différents outils standard disponibles dans le logiciel d'imagerie hyperspectrale ENVI® (Version 5.5, L3HARRIS GEOSPATIALTM). Les résultats ont été comparés à l'image contextuelle RVB enregistrée simultanément (avec seulement 20 % de meilleure résolution spatiale, mais un éclairage et une géométrie de vision identiques) et analysée avec Dstretch®.

Principalement trois types de transformations mathématiques non supervisées – ACP, ACI, MNF – visant à extraire et à concentrer les informations contenues dans les cubes de données sont utilisées en imagerie hyperspectrale.

Elles sont appelées « rotations », car elles visent à changer la base sur laquelle l'ensemble de données est projeté afin de réduire la dimensionnalité des données utiles (initialement 204 plans d'information spectrale, un à chaque longueur d'onde) et de séparer le bruit dans les données. Leurs hypothèses de travail sur le contenu initial des données sont cependant différentes et l'ACI récemment développée est censée être la transformation la plus efficace pour séparer différentes couches

d'information, c'est-à-dire différents types de peintures ainsi que les variations de composition et de texture des roches. Cette transformation a été développée pour résoudre le problème de la « séparation aveugle des sources », sans information a priori sur le mélange. Contrairement à l'ACP, elle considère des sources d'information indépendantes non contraintes à avoir une distribution gaussienne, typique des ensembles de données hyperspectrales naturelles, et utilise des statistiques d'ordre élevé pour révéler des caractéristiques intéressantes, mais faibles ou ne couvrant qu'une petite partie de l'image.

Ces transformations sont fréquemment utilisées dans l'exploration spatiale et l'analyse de données de télédétection (Hyvarinen & Oja 2000) et plus récemment l'ACP a été introduite et couramment utilisée dans les études d'œuvres d'art (Domingo *et al.* 2015 ; Pronti *et al.* 2019 ; Cucci *et al.* 2020). Dans l'art rupestre, l'ACP a été utilisée pour l'analyse d'images de l'appareil photographique RVB et un groupe de chercheurs a utilisé tous ces algorithmes en parallèle sur des données hyperspectrales pour l'analyse de peintures rupestres, mais n'a pas discuté de leurs avantages relatifs (Vincent Garcia *et al.* 1996 ; Domingo *et al.* 2015 ; Rogerio-Candelera 2015 ;

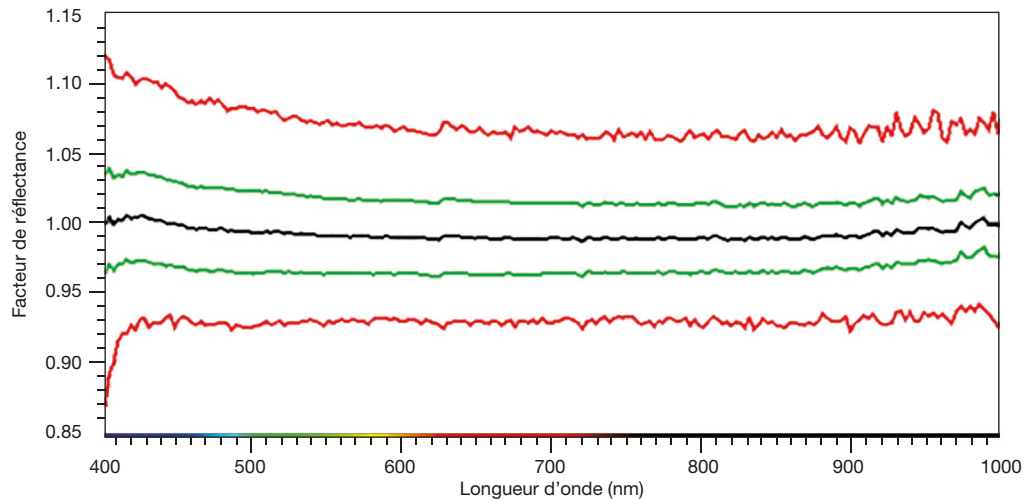


FIG. 4. — Statistiques sur les spectres de la cible de référence (c. 1900 pixels) avec la moyenne (noir), la moyenne +/- écart-type (vert), les valeurs minimum et maximum (rouge) montrant l'augmentation du bruit en dessous de 410 nm et au-dessus de 920 nm.

Bayarri 2020; Bayarri *et al.* 2021). Après une comparaison approfondie de l'ACP et de l'ACI sur des images RVB de peintures rupestres superposées (Cerrillo-Cuenca *et al.* 2021) concluant à une légère supériorité de l'ACI, Schmitt *et al.* (2023) ont montré que l'ACI est aussi la méthode d'analyse la plus efficace sur des données hyperspectrales VNIR pour extraire et différencier les pigments minéraux entre eux et par rapport à la paroi. Nous utiliserons donc cette transformation pour l'analyse des données de cette étude. Toutefois, avant d'exécuter la transformation, plusieurs analyses préliminaires du cube de données et quelques conversions sont nécessaires afin d'optimiser leurs résultats. Tout d'abord, le cube de données doit être pivoté de 90° dans le sens horaire pour revenir à la vue verticale originale. Enfin, à partir des statistiques locales sur les spectres très homogènes de la cible de référence (Fig. 4) couplées à une analyse d'une sélection de spectres individuels, nous pouvons sélectionner la plage spectrale dans laquelle le rapport signal/bruit est suffisamment grand tout en conservant assez de canaux pour préserver la plupart des informations utiles et exécuter efficacement la transformation ACI. Grâce à l'éclairage halogène, l'illumination est bonne à toutes les longueurs d'onde du VNIR, contrairement aux mesures effectuées précédemment en lumière diffuse naturelle (abris ombragés), très pauvres en rayonnement infrarouge au-dessus de 920 nm (Schmitt *et al.* 2023). Il est donc possible de conserver l'essentiel des canaux spectraux hormis les cinq premiers dans le bleu profond (< 410 nm), là où le détecteur est le moins sensible.

Bien que la méthode de transformation ne soit pas systématiquement indiquée dans les légendes des illustrations, toutes les figures de cette étude ont été produites à l'aide de la méthode ACI, qui a été privilégiée après comparaison avec l'ACP et la MNF, suivant les recommandations de Schmitt *et al.* (2023) et Cerrillo-Cuenca *et al.* (2021). Les performances relatives montrent en effet que l'ACI sépare plus efficacement les sources non-gaussiennes (pigments vs substrat). L'ACP, quant à elle, reste utile pour une première

exploration des données, tandis que la MNF optimise la séparation signal/bruit, mais peut masquer des détails subtils. Les futures publications devront inclure ces précisions directement dans les légendes des figures. Les cartographies de pigments ont été générées par transformation ACI, concentrant l'information spectrale dans deux à sept composantes selon la complexité de la scène. La validation des séparations spectrales s'appuie sur plusieurs éléments, comme l'extraction systématique des spectres sur les régions d'intérêt (ROI) identifiées, comme illustré (Fig. 5), la comparaison avec les signatures spectrales de référence des pigments connus (charbon, hématite), ainsi que la cohérence spatiale des cartographies avec l'organisation des tracés.

ANALYSES HYPERSPECTRALES DANS LA GROTTÉ MAYENNE-SCIENCES

PRÉSENTATION DU SITE

La grotte ornée Mayenne-Sciences, à Thorigné-en-Charnie, Mayenne, représente l'une des douze grottes ou abris paléolithiques identifiés au nord de la Loire. Découverte le 11 juin 1967 par une équipe de spéléologues sous la direction de Roger Bouillon, cette grotte a fait l'objet d'une analyse détaillée (Pigeaud 2004). Nichée dans le karst de Saulges, un phénomène géomorphologique créé par l'Erve, un tributaire de la Sarthe, qui a creusé le plateau calcaire de Saulges sur une distance d'environ 1,5 km, la grotte se présente comme une petite cavité en angle droit. Elle se compose de quatre salles alignées et s'ouvre sur le Porche de la Déroutine. Sa longueur totale, suivant le parcours spéléologique actuel, est d'environ 60 mètres, bien qu'elle ne mesure que 50 mètres en considérant l'entrée paléolithique la plus probable.

Depuis la Salle 0 (Fig. 6), le parcours principal s'étend à l'horizontale, en prenant comme référence le niveau de sol du porche. Actuellement, les recherches ont identifié 59 unités graphiques. Parmi celles-ci, on compte 16 figurations animales

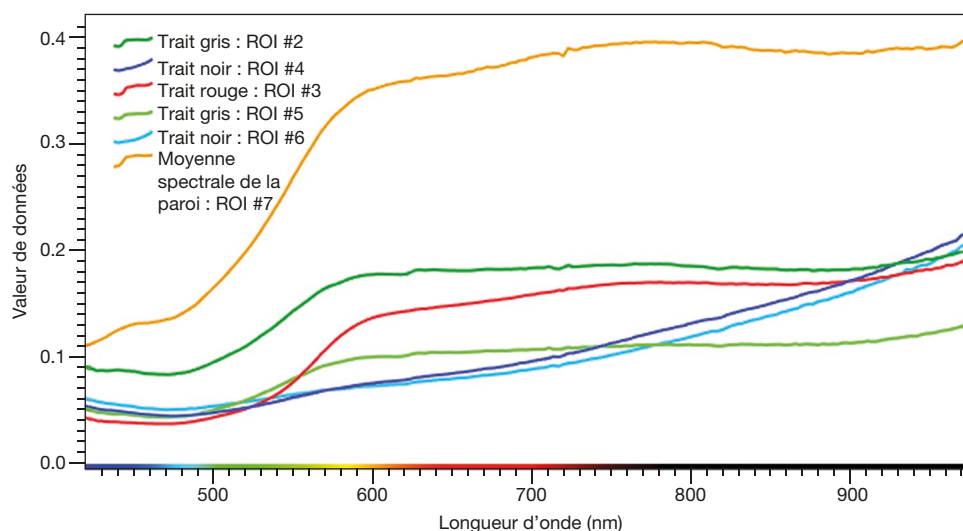


FIG. 5. — Spectres visible-proche infrarouge des pigments des ensembles n°s 12 et 13 et de la paroi. Pigments du trait « gris » : **vert clair** et **vert foncé** ; du trait « noir » : **bleu clair** et **bleu foncé** ; de la tache rouge : **trait rouge** ; paroi : **trait orange**.

(incluant neuf chevaux, deux mammoths, un bison, et quatre figurations animales non identifiées), 19 signes abstraits, 12 motifs indéterminés et 12 marques rouges apposées avec les doigts, comprenant trois digitations et neuf empreintes de paumes, de pouces ou de doigts jointifs. À cela s'ajoutent six cas incertains, dont l'origine anthropique ou paléolithique n'a pas été clairement établie. La majorité de ces dessins, réalisés avec du pigment noir (en majorité du charbon de bois), privilégie l'étude des lignes et de leurs contours à travers divers jeux et variations, plutôt que le rendu volumétrique ou coloré des corps. Ces œuvres présentent un style distinctif, avec des figures animales stylisées en simples silhouettes aux contours marqués, et des signes triangulaires aux bords arrondis (Figs 7 ; 8), similaires à ceux trouvés dans d'autres sites du sud de la France et de l'Espagne cantabrique (Pigeaud 2023), ainsi que des associations thématiques peu communes, telles que le duo cheval-mammoth.

Les analyses détaillées menées par Philippe Walter (C2RMF, Musée du Louvre), complétées par des prélèvements et études effectués par Éric Laval (C2RMF) et Michel Bouchard du Centre d'Analyses et de Recherche en Art et Archéologie (CARAA) utilisant la fluorescence X et la spectrométrie Raman, ont confirmé l'utilisation de charbon pour ces dessins. Deux échantillons prélevés sur l'un des chevaux, analysés par Hélène Valladas et son équipe (LSCE/IPSL - UMR CEA-CNRS-UVSQ, Gif-sur-Yvette), ont permis d'obtenir des datations radiocarbone de $26\,666 \pm 864$ calBP (Gif A 100 647) et $27\,255 \pm 413$ calBP (Gif A 100 645), attestant leur appartenance à la période du Gravettien (Pigeaud *et al.* 2003).

ANALYSES DES FIGURATIONS INÉDITES

La difficulté des conditions de travail dans la grotte Mayenne-Sciences a restreint notre étude aux panneaux principaux, d'accès plus aisé avec le matériel HSI. Dans la Salle I, des essais sur des dessins très altérés ont fourni des résultats très encourageants, qu'il faudra confirmer. Mais l'essentiel des observations s'est concentré dans la salle Roger Bouillon, ce

qui a permis, comme nous allons le voir, de reconstituer ou retrouver des dessins effacés par les écoulements de calcite ou dont le pigment a fini par disparaître.

Pour chaque nouvelle découverte figurative, nous commencerons par décrire brièvement le contexte environnant, suivi d'un résumé des interprétations actuelles/précédentes des motifs avant de procéder à l'analyse des mesures hyperspectrales. Enfin, nous présenterons les validations ou remises en question apportées par ces dernières et les nouvelles informations qu'elles révèlent.

Découverte d'un nouveau signe invisible à l'œil nu

Le Panneau XII se situe dans la salle Roger Bouillon (salle III), à 40 m de l'entrée préhistorique et 43 m de l'entrée spéléologique et forme, avec les panneaux X et XI, une structure en voûte qui encadre le panneau principal (IX) au couple cheval-mammoth. Ce panneau comprend plusieurs groupes de motifs (Fig. 7) : une série de tracés noirs (ensemble 12), parmi lesquels on distingue les vestiges d'un animal non identifié associé à deux traits gravés subparallèles (ensemble 12a) ; un enchevêtrement de traits noirs (ensemble 13) composé de deux signes abstraits : une parabole (13a) et un signe angulaire (13b) ; une empreinte de paume rouge (D7).

Apports de l'analyse hyperspectrale. Ces analyses révèlent trois ensembles de traits au fusain, dont l'un est représenté en rouge sur la photo 117 ICA 9-3-7, et une empreinte de paume rouge plus distincte. L'imagerie hyperspectrale rend les contours de cette empreinte plus visibles, élargissant le halo qui l'entoure et suggérant la possibilité d'une projection soufflée dont les contours auraient rétréci avec le temps. De plus, une seconde tache rouge pourrait exister au-dessus de la première au niveau du coin supérieur de l'ensemble 13, plus visible dans les interstices naturels de la paroi, évoquant des tracés évolués en tache.

L'extraction des spectres sur les tracés, à deux endroits de chacun des pigments (Fig. 5) permet d'obtenir quelques précisions : le pigment du trait « gris » en haut à gauche (ROI

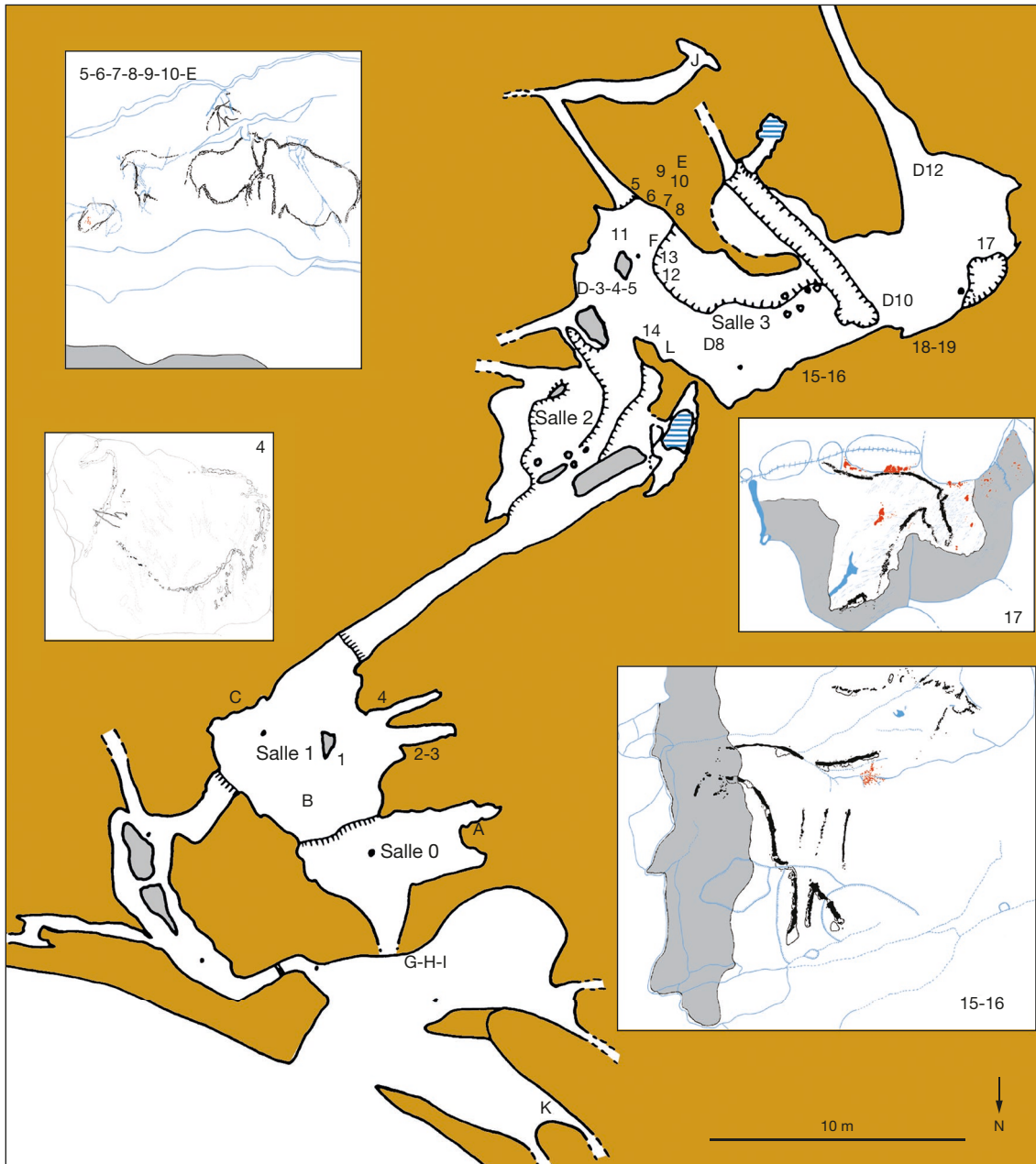


FIG. 6. — Plan de la grotte Mayenne-Sciences avec positionnement des représentations (chiffres et lettres). Les chiffres correspondent aux découvertes de Roger Bouillon et de l'équipe Mayenne-Sciences, les lettres correspondent aux découvertes de Romain Pigeaud. Crédits : DAO Romain Lahaye, d'après Pigeaud 2004.

et spectres verts) possède un spectre plus proche de celui de la tache rouge en bas à droite (ROI et spectre rouge) que du trait noir en haut à droite (ROI et spectres bleus). Il y a clairement de l'hématite dans les premiers et pas ou très peu dans le dernier, mais le spectre du trait noir n'est pas assez plat pour être seulement du carbone.

L'hématite que l'on retrouve dans un trait et peu ou pas dans l'autre (alors qu'ils semblent similaires en apparence) peut s'interpréter d'au moins deux manières :

1. soit le même artiste a changé de fusain ;
2. soit c'est un autre artiste (voire un autre groupe d'artistes) qui aurait rehaussé une ou plusieurs figurations existantes, avec potentiellement un saut temporel entre les deux événements.

Quoi qu'il en soit, une analyse plus approfondie, en particulier l'obtention de spectres proche infrarouge (1 000-2 500 nm) de chaque type de pigment, serait nécessaire pour fournir des informations plus précises. Lors de futures investigations, un spectromètre de terrain Vis-NIR permettrait de mesurer précisément les spectres (400-2 500 nm) de ces petits points de pigments avec une taille de spot de 2-4 mm.

L'élément le plus surprenant est la découverte d'un nouveau signe triangulaire aux bords arrondis entre les ensembles 12 et 13 (Figs 6; 7). Ce signe, désigné par la lettre M dans notre nomenclature, possède une base concave lui donnant une forme caractéristique, similaire à ceux trouvés dans Mayenne-Sciences, la grotte Margot et sur les plaquettes de

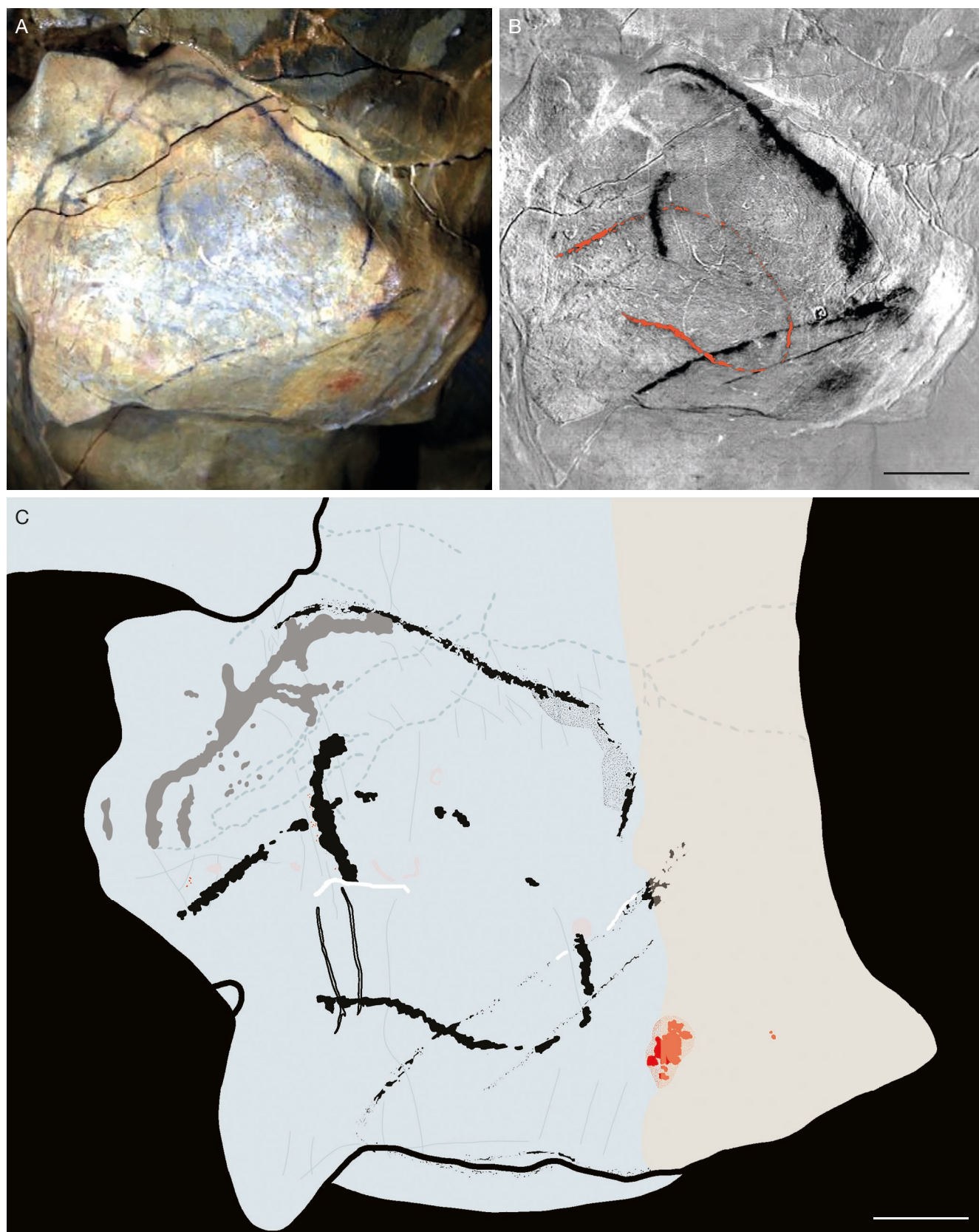


FIG. 7. — **A**, Photographie des ensembles n°s 12 et 13 dans la grotte paléolithique Mayenne-Sciences (France); **B**, photographie par imagerie hyperspectrale (HSI) montrant une nouvelle figure (en rouge); **C**, relevé effectué par Romain Pigeaud. Échelles : B, C, 10 cm. Crédits : DAO, Romain Lahaye, Romain Pigeaud; photos, Romain Lahaye, Bernard Schmitt, Frédéric Donze.

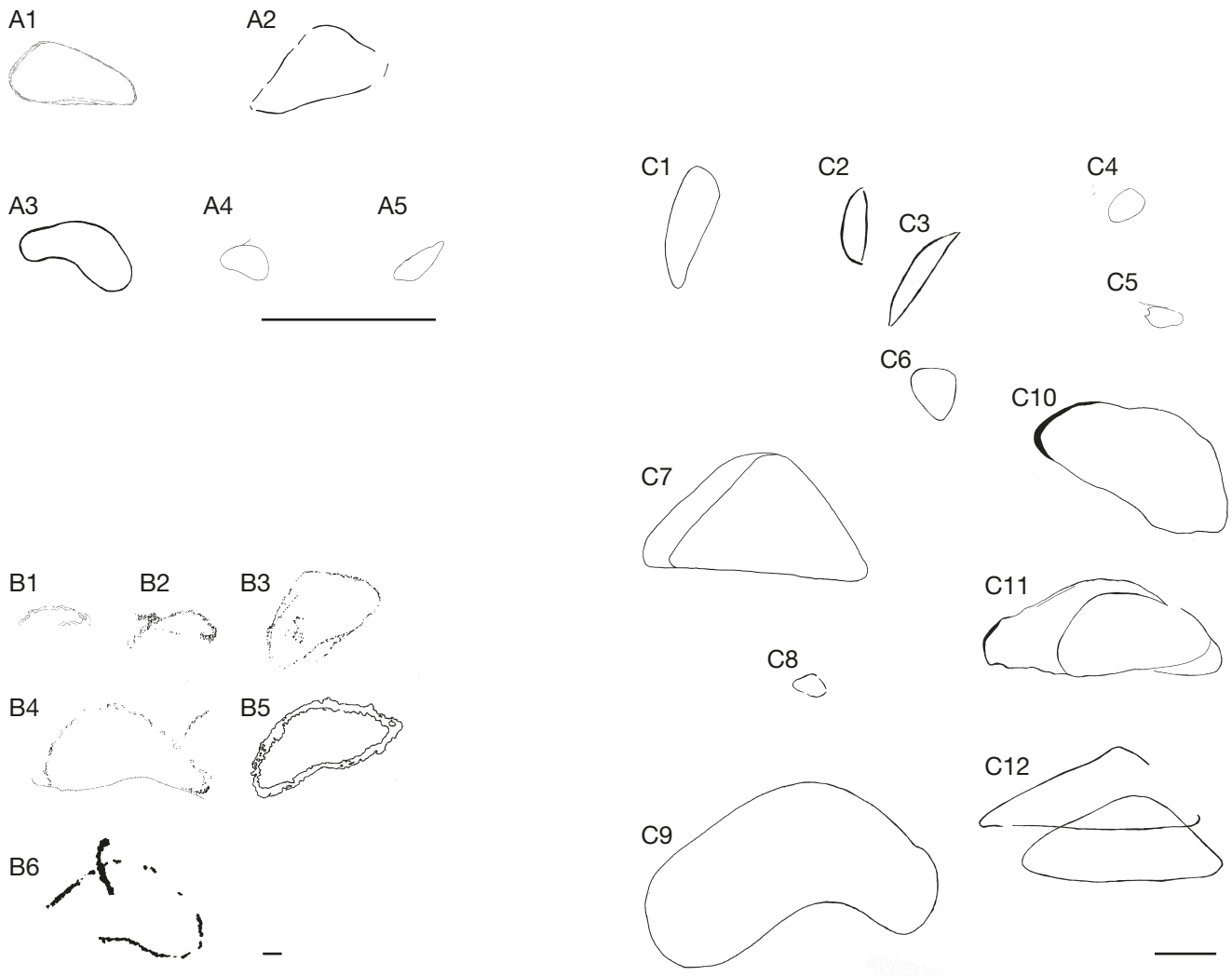


FIG. 8. — A-C, Ensemble des signes triangulaires aux bords arrondis des grottes Rochefort (A), Mayenne-Sciences (B), Margot (C): A1, 1315; A2, 1947; A3, 6634; A4, 4204; A5, 4048; B1, G; B2, 1a; B3, 5; B4, 11a; B5, 19; B5, M; C1, 1; C2, C3, 86b; C4, 3; C5, 158; C6, 16bis; C7, 115a; C8, 168a; C9, 69a; C10, 130b; C11, 108; C12, 123. Le nouveau signe M présente une base concave similaire aux autres signes de Mayenne-Sciences et à certains de ceux de la grotte Margot et des plaquettes de Rochefort. Il présente aussi un appendice que l'on retrouve sur un autre signe de Mayenne-Sciences (B2) et un signe de Rochefort (A4). Échelles : A, 10 cm ; B, C, 5 cm. Crédits : DAO Romain Lahaye et Romain Pigeaud.

la grotte Rochefort (Pigeaud 2023) ; le bord gauche arrondi est cependant manquant. Par ailleurs, le tracé courbe et vertical de la base de l'ensemble 12 s'insère dans ce signe et lui fournit une sorte d'appendice, que nous retrouvons sur deux autres signes de Mayenne-Sciences (signe 1a (Fig. 8B1) de la salle I et signe 11a (Fig. 8B4) du panneau X), ainsi qu'un autre signe (Fig. 8A4) de la grotte Rochefort (Fig. 8).

Découverte d'un bison remodelé

Le panneau XIII, situé en face du mammouth n° 8 du panneau principal IX, est affecté par une série de concrétions, les unes anciennes et sèches, les autres plus récentes et humides. Il présente deux dessins noirs. Nous identifions d'abord un bison (n° 14), orienté en profil gauche. Fortement dégradé, car tracé sur une paroi déjà aux trois-quarts recouverte de calcite, il fut ensuite recouvert secondairement par une seconde coulée, plus claire et transparente, sauf à quelques endroits : la tête et l'amorce de la patte avant, ce qui a dilué les pigments,

au point qu'il est impossible de savoir si la patte arrière était terminée ou si, comme pour les autres figures de la grotte, celle-ci était restée inachevée. Il est possible qu'une fissure concrétionnée ait été utilisée pour représenter la ligne de ventre. Dessous cet animal, se trouve un autre tracé (L) que l'un de nous (R.P.) propose d'interpréter comme le profil gauche d'un anthropomorphe cornu (ou d'un théranthrope).

Apports de l'analyse hyperspectrale. Tout d'abord, la jonction de la ligne de dos et de l'encolure du bison 14, qui était rendue invisible par une coulée de calcite, a été retrouvée : ce qui était inédit (Fig. 9). Il adopte cependant une forme originale : alors que le profil dorso-lombaire caractéristique du bison européen *Bison bonasus* est bien identifié (Poplin 1984), le tracé de la bosse dorsale présente une solution de continuité : une sorte d'échancrure qui en arrondit la partie postérieure et lui donne la forme d'une tête de mammouth, tandis que la partie antérieure, rectiligne, correspond bien au

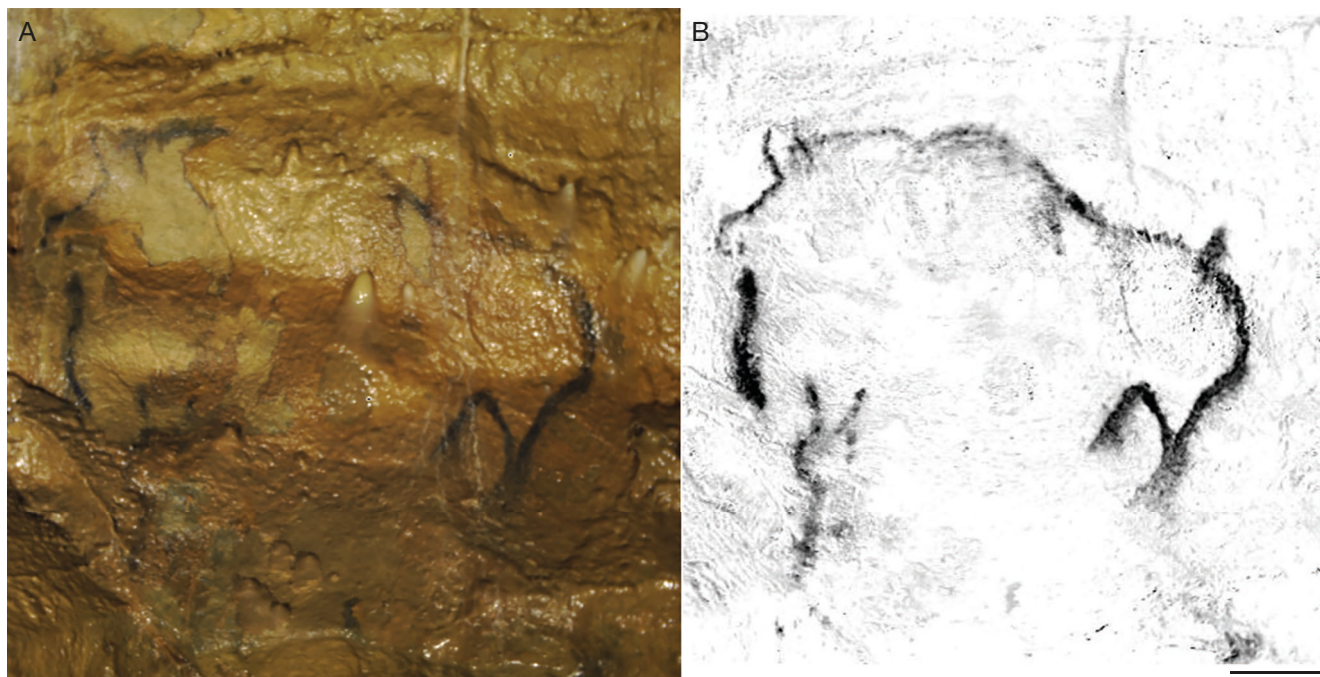


FIG. 9. — **A**, Photographie du bison n° 14 dans la grotte paléolithique Mayenne-Sciences (France) et du potentiel théranthrope L; **B**, photographie par imagerie hyperspectrale (HSI) laissant apparaître des tracés invisibles à l'œil nu. Le probable théranthrope L est beaucoup plus identifiable. Le dos du bison présente un bombement au niveau du garrot qui l'apparente aux représentations anciennes de « bisons-mammouths » de grottes périgourdines comme Font-de-Gaume. Échelle : 10 cm. Crédits : Frédéric Donze et Bernard Schmitt.

tracé de la crinière. Ce profil particulier n'est pas sans rappeler celui (plus accentué) des « bisons-mammouths » de certaines grottes périgourdines comme Font-de-Gaume (Paillet 1999). D'autres tracés ont également été révélés de manière beaucoup plus nette, et apparaissent plus épais : au niveau du poitrail et du dos notamment. La queue n'était quant à elle pas du tout visible (voir Pigeaud 2004 : 72, fig. 82).

En outre, l'imagerie hyperspectrale a permis de confirmer que l'hypothèse de l'anthropomorphe cornu (ou du théranthrope) était plausible. Les tracés révélés sont beaucoup plus nets à cet endroit et permettent au moins de rejeter l'éventualité d'une figuration incomplète.

Découverte de chevaux redessinés ?

Plus avant dans la salle Roger Bouillon, la salle dessine un coude. C'est à cet endroit, à 52 m de l'entrée spéléologique et 49 m de l'entrée préhistorique, que se trouve le panneau XVI. Il présente une composition équilibrée de deux équidés placés tête-bêche, cadrée sur le volume de la paroi et intégrant des éléments de son relief. Nous distinguerons d'abord le cheval n° 15, en profil gauche, traité en simple silhouette, dont la tête est masquée par un voile de calcite blanche peu épaisse, tombant depuis le plafond ; il est reconnaissable à son encolure en « col-de-cygne », son pli d'épaule et sa ganache. Son postérieur et sa ligne de ventre n'ont pas été dessinés. La tête du cheval a été recouverte par une coulée de calcite, ce qui a entraîné la diffusion de la matière colorante, si bien que l'on distingue mal ses contours. Sur son ventre sont tracés trois traits verticaux (ensemble 15a) et sur ses lombaires une empreinte de paume rouge (D9). C'est

sur le dos et le poitrail de ce cheval qu'ont été pratiqués les deux prélèvements qui fournirent deux datations radiocarbone (Pigeaud *et al.* 2003). Le cheval n° 16 est au-dessus du précédent, dont la ligne dorsale constitue la ligne de dos de celui-ci. En profil droit, il présente une crinière échevelée, la seule de toutes les représentations de la cavité.

Apports de l'analyse hyperspectrale. Là aussi, c'est une toute autre composition qui est apparue. Deux couleurs de tracés sont notables : une première d'aspect noirâtre, qui reprend le tracé du cheval n° 15 et l'ensemble 15a. Une seconde, brun foncé, dont est entièrement composé le cheval n° 16 et qui repasse par endroits les tracés du cheval n° 15. La première interprétation que nous pouvons proposer est que nous sommes en présence de deux phases de tracés successives : dans un premier temps, le cheval n° 15 et les tracés 15a ; puis, dans un second temps, avec une autre « recette », le même artiste ou un autre qui aurait travaillé après lui, a repassé les traits du cheval n° 15 et dessiné le cheval n° 16. Cette « restauration » des tracés a été observée dans d'autres grottes ornées d'époque gravettienne, comme Cougnac ou Pech-Merle (Lorblanchet 2018), à moins qu'il ne s'agisse d'une esquisse qui aurait ensuite été complétée, comme ce fut peut-être le cas à Niaux ou Font-de-Gaume (Clottes *et al.* 1992 ; Reiche *et al.* 2023), où cette fois ce sont des dessins au manganèse qui furent retracés sur des traits charbonneux précédents. Dans le cas de Mayenne-Sciences, ce sont deux couches de tracés au fusain qui se sont superposées, mais nous ne pouvons connaître l'intervalle de temps qui les a séparées. La faible quantité de pigment résiduel interdit pour le moment tout nouveau prélèvement en vue de datations plus fines.

DISCUSSION

L'évolution méthodologique dans l'étude de l'art rupestre a connu plusieurs phases significatives, depuis les relevés manuels du XIX^e siècle jusqu'aux technologies numériques actuelles. Cette étude comble plusieurs lacunes importantes : alors que les méthodes traditionnelles de relevé et même la photographie numérique RVB se limitent au spectre visible, notre application de l'HSI VNIR étend l'analyse jusqu'à 1 000 nm, permettant de révéler des tracés invisibles à l'œil nu. Cette capacité s'est avérée particulièrement cruciale pour les pigments altérés ou recouverts de calcite, comme démontré avec le bison n° 14. Ensuite, contrairement aux approches multispectrales limitées à quelques filtres larges, l'HSI capture 204 bandes spectrales contiguës, offrant une signature spectrale détaillée pour chaque pixel. Cette résolution spectrale fine permet de discriminer des pigments de composition similaire, mais d'origine potentiellement différente, comme observé sur le panneau XVI avec les deux phases de tracés au charbon. Enfin, l'utilisation de l'Analyse en Composantes Indépendantes (ACI) représente une avancée méthodologique par rapport à l'ACP traditionnellement utilisée. L'ACI s'avère plus efficace pour séparer les sources d'information non-gaussiennes typiques des données hyperspectrales d'art rupestre, permettant d'extraire des signaux faibles comme le nouveau signe triangulaire découvert.

Nos résultats sur la stratigraphie des motifs s'alignent avec les observations faites dans d'autres sites gravettiens. Les chevaux n° 15 et n° 16 révèlent deux phases de tracés successives, phénomène documenté à Cougnac et Pech-Merle (Lorblanchet 2018). Cependant, notre cas diffère par la nature des pigments : deux couches de charbon plutôt que la superposition manganèse/charbon observée à Niaux (Clottes *et al.* 1992) et Font-de-Gaume (Reiche *et al.* 2023). Les limites de l'HSI identifiées incluent la résolution spatiale inférieure aux appareils photographiques RVB haute résolution. Il est par ailleurs nécessaire de disposer d'un éclairage artificiel puissant qui couvre toute la gamme spectrale de l'IQ. Notons l'impossibilité de dater directement les différentes phases de tracés et la difficulté d'interprétation sans analyses complémentaires (spectroscopie Raman, XRF)

CONCLUSION

L'application de l'imagerie hyperspectrale (HSI) à l'étude des peintures rupestres paléolithiques dans la grotte ornée Mayenne-Sciences révèle l'ampleur et la complexité des informations que cette technologie peut apporter à l'archéologie et à l'étude des arts préhistoriques. Cette recherche pionnière met en lumière la capacité de l'HSI à révéler des œuvres invisibles à l'œil nu et à distinguer les différents pigments utilisés, offrant ainsi une nouvelle perspective sur les techniques et les matériaux employés par les artistes paléolithiques.

Les résultats obtenus pour la grotte Mayenne-Sciences démontrent l'efficacité de l'HSI non seulement pour compléter les images visibles, mais aussi pour détecter des peintures et

des signes jusqu'alors inconnus, enrichissant notre connaissance de l'art rupestre paléolithique. Les découvertes d'un nouveau signe triangulaire aux bords arrondis, ainsi que les analyses détaillées de figures, telles que le bison remodelé et les possibles chevaux redessinés, illustrent le potentiel de cette méthode pour réévaluer et approfondir les interprétations des œuvres d'art préhistoriques.

En ce qui concerne les perspectives, ces travaux soulignent la nécessité d'une exploration plus approfondie des applications de l'HSI à d'autres sites rupestres, en tenant compte des défis spécifiques liés à chaque environnement. L'amélioration continue des technologies d'imagerie hyperspectrale et l'adaptation des méthodologies à des conditions de terrain variées pourraient ouvrir de nouvelles voies dans l'étude de l'art préhistorique. En outre, l'ajout de l'HSI SWIR, ou plus simplement la spectroscopie ponctuelle VNIR + SWIR, à l'HSI VNIR, et son couplage avec d'autres techniques analytiques *in situ*, telles que la micro-fluorescence X et la spectrométrie Raman, ainsi qu'avec les techniques d'analyse en laboratoire nécessitant des prélèvements, donc des techniques « invasives », telles que la spectrométrie de masse ou la microscopie électronique à balayage, pourrait permettre une caractérisation plus détaillée des pigments et des techniques de peinture, offrant une vision plus complète des pratiques artistiques au Paléolithique.

Enfin, au-delà de l'apport scientifique, l'étude de la grotte Mayenne-Sciences via l'imagerie hyperspectrale enrichit notre appréciation de l'art rupestre en tant que composante clé du patrimoine culturel de l'humanité. En révélant des détails inédits et en fournissant de nouvelles interprétations des œuvres d'art préhistoriques, cette recherche contribue à une meilleure compréhension de l'histoire de l'art, tout en soulignant l'importance de préserver ces témoignages irremplaçables de la créativité humaine.

Remerciements

Nous remercions l'équipe éditoriale des *Comptes Rendus Palevol*, le rédacteur-en-chef, Michel Laurin, l'éditeur associé, Nicolas Teyssandier, ainsi que les référés pour leur accompagnement durant le processus éditorial.

RÉFÉRENCES

- AIAZZI B., ALPARONE L., BARONTI S., LASTRI C. & SELVA M. 2012. — Spectral distortion in lossy compression of hyperspectral data. *Journal of Electrical and Computer Engineering* 850637. <https://doi.org/10.1155/2012/850637>
- AUJOULAT N. & PERAZIO G. 2005. — Contribution de la saisie tridimensionnelle à l'étude de l'art pariétal et de son contexte physique, *in* GENESTE J.-M., FAGNART J.-P. & DELANNOY J.-J. (eds), La grotte Chauvet à Vallon-Pont-d'Arc : un bilan des recherches pluridisciplinaires. Actes de la séance de la Société préhistorique française, 11 et 12 octobre 2003, Lyon. *Bulletin de la Société Préhistorique Française* 102 (1): 189-197. https://www.persee.fr/doc/bspf_0249-7638_2005_num_102_1_13351

- BAYARRI V. 2020. — *Algoritmos de análisis de imágenes multiespectrales e hiperespectrales para la documentación e interpretación del arte rupestre*. Doctoral thesis, Universidad Nacional de Educación a Distancia (España), Escuela Internacional de Doctorado, 219 p. <https://hdl.handle.net/20.500.14468/18302>
- BAYARRI V., LATOVA J., CASTILLO E., LASHERAS J. A., DE LAS HERAS C. & PRADA A. 2015. — Nueva documentación y estudio del arte empleando técnicas hiperespectrales en la Cueva de Altamira, in COLLADO GIRALDO H. & GARCÍA ARRANZ J. J. (eds), *Proceedings of the XIX International Rock Art Conference IFRAO 2015 (Cáceres, Spain, 31 August - 4 September 2015)*, Tomar: 2293-2307.
- BAYARRI V., SEBASTIÁN M. A. & RIPOLL S. 2019. — Hyperspectral Imaging Techniques for the Study, Conservation and Management of Rock Art. *Applied Sciences* 9 (23): 5011. <https://doi.org/10.3390/app9235011>
- BAYARRI V., CASTILLO E., RIPOLL S. & SEBASTIÁN A. M. 2021. — Improved Application of Hyperspectral Analysis to Rock Art Panels from El Castillo Cave (Spain). *Applied Sciences* 11 (3): 1292 <https://doi.org/10.3390/app11031292>
- CERRILLO-CUENCA E., SEPÚLVEDA M. & GUERRERO-BUENO Z. 2021. — Independent component analysis (ICA): A statistical approach to the analysis of superimposed rock paintings. *Journal of Archaeological Science* 125: 105269.
- CLOTTES J., VALLADAS H. & CACHIER & ARNOLD M. 1992. — Des dates pour Niaux et Gargas. *Bulletin de la Société préhistorique française* 89 (9): 270-274. Réédition dans CLOTTES J. 2015. — *Une vie d'art préhistorique*. Éditions Jérôme Millon (coll. L'Homme des origines), Grenoble: 109-114.
- CUCCI C., PICOLLO M., CHIARANTINI L., UDA G., FIORI L., DE NIGRIS B. & OSANNA M. 2020. — Remote-sensing hyperspectral imaging for applications in archaeological areas: non-invasive investigations on wall paintings and on mural inscriptions in the Pompeii site. *Microchemical Journal* 158: 105082. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2020.105082>
- DEFRASNE C., MASSÉ M., GIRAUD M., SCHMITT B., FLIGIEL D., LE MOUÉLIC S. & CHALMIN E. 2023. — The contribution of VNIR and SWIR hyperspectral imaging to rock art studies: example of the Otello schematic rock art site (Saint-Rémy-de-Provence, Bouches-du-Rhône, France). *Archaeological and Anthropological Sciences* 15 (116). <https://doi.org/10.1007/s12520-023-01812-6>
- DOMINGO I., CARRIÓN B., BLANCO S. & LERMA J. L. 2015. — Evaluating conventional and advanced visible image enhancement solutions to produce digital tracings at el Carche rock art shelter. *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage* 2 (2-3): 79-88. <https://doi.org/10.1016/j.daach.2015.01.001>
- HAUBER E., REGNER P., SCHMIDT K., NEUKUM G. & SCHWARZ G. 1991. — Color decorrelation for the Phobos mission camera experiment, *Planetary and Space Science* 39 (1-2): 297-309.
- HYVARINEN A. & OJA E. 2000. — Independent component analysis: algorithms and applications. *Neural Networks* 13: 411-430.
- JAISWAL G., RANI R., MANGOTRA H. & SHARMA A. 2023. — Integration of hyperspectral imaging and autoencoders: benefits, applications, hyperparameter tuning and challenges. *Computer Science Review* 50: 100584. <https://doi.org/10.1016/j.cosrev.2023.100584>
- JAUBERT J., FERUGLIO V. & FOURMENT N. (eds) 2020. — *Grotte de Cussac. - 30 000*. Éditions Confluences, Bordeaux, 214 p.
- LAHAYE R. 2023. — *La mobilisation des données sud-africaines dans l'interprétation rituelle des arts rupestres San du Maloti-Drakensberg*. Thèse de doctorat non publiée, Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne, 416 p.
- LORBLANCHET M. 2018. — *Art pariétal. Grottes ornées du Quercy*. Éditions du Rouergue (1^{re} édition 2010), Arles-Rodez, 474 p.
- PAILLET P. 1999. — *Le Bison dans les arts magdaléniens du Périgord*. Éditions du CNRS (Gallia préhistoire ; Supplément 33), Paris, 475 p. https://www.persee.fr/doc/galip_0072-0100_1999_sup_33_1
- PAILLET P. 2023. — De l'usage et de l'utilité du virtuel dans l'étude des grottes ornées : un retour d'expérience sur deux exemples périgourds, in COQUEUGNIOT H., DUTOIR O., JAUBERT J. & PAILLET P. (eds), *Les sciences archéologiques à l'ère du virtuel*. Éditions du Comité des travaux historiques et scientifiques, Paris. <https://books.openedition.org/cths/17378>
- PIGEAUD R. 2004. — La grotte ornée Mayenne-Sciences (Thorigné-en-Charnie, Mayenne) : un exemple d'art pariétal d'époque gravettienne en France septentrionale. *Gallia Préhistoire* 46: 1-154.
- PIGEAUD R. 2023. — Si loin, si proche : l'art paléolithique des « grottes de Saulges », in NAUDINOT N. & MARCHAND G. (eds), *Préhistoire et Protohistoire de l'Ouest de la France. Nouvelles perspectives en hommage à Jean-Laurent Monnier. Revue Archéologique de l'Ouest* 12e supplément : 157-162.
- PIGEAUD R., VALLADAS H., ARNOLD M. & CACHIER H. 2003. — Deux dates carbone 14 en spectrométrie de masse par accélérateur (SMA) pour une représentation pariétale de la grotte ornée Mayenne-Sciences (Thorigné-en-Charnie, Mayenne) : émergence d'un art gravettien en France septentrionale? *Comptes Rendus Palevol* 2 (2): 161-168. [https://doi.org/10.1016/S1631-0683\(03\)00014-9](https://doi.org/10.1016/S1631-0683(03)00014-9)
- PIGEAUD R., PLAGNES V., BOUCHARD M., BAHAIN J.-J., CAUSSE CHR., DEMAILLY S., LABORDE-TISNERAT N., FALGUÈRES CH., NOËL F., RODET J., VALLADAS H. & WALTER PH. 2010. — Analyses archéométriques dans la grotte ornée Mayenne-Sciences (Thorigné-en-Charnie, Mayenne), avec la collaboration de BONIC P., CHAUT J.-J., COLINART S., LAVAL E. & RENAULT G., de la Société française pour l'Étude et la Protection des Mammifères. *L'Anthropologie* 114 (1): 97-112. <https://doi.org/10.1016/j.anthro.2010.01.004>
- POPLIN F. 1984. — Sur le profil dorso-lombaire des bisons dans la nature et dans l'art pariétal, in BANDI H.-G., HUBER W., SAUTER M.-R. & SITTER B. (eds), *La contribution de l'éthologie et de la zoologie à l'interprétation de l'art des peuples chasseurs préhistoriques*. Troisième colloque de la Société Suisse des Sciences Humaines, Sigriswil, 1979, Fribourg: 217-242.
- PRONTI L., ROMANI M., VERONA-RINATI G., TARQUINI O., COLAO F., COLAPIETRO M., PIFFERI A., CESTELLI-GUIDI M. & MARINELLI M. 2019. — Post-processing of VIS, NIR, and SWIR multispectral images of paintings. New discovery on the *The Drunkenness of Noah*, painted by Andrea Sacchi, stored at Palazzo Chigi (Ariccia, Rome). *Heritage* 2 (3): 2275-2286. <https://doi.org/10.3390/heritage2030139>
- REICHE I., COQUINOT Y., TROSSEAU A. & MAIGRET A. 2023. — First discovery of charcoal-based prehistoric cave art in Dordogne. *Scientific Reports* 13: 22235. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-47652-1>
- ROGERIO-CANDELERA M. 2015. — Digital image analysis based study, recording, and protection of painted rock art. Some Iberian experiences. *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage* 2: 68-78.
- SCHMITT B., SOUIDI Z., DUQUESNOY F. & DONZÉ F.-V. 2023. — From RGB camera to Hyperspectral imaging: a breakthrough in Neolithic Rock Painting analysis. *Heritage Science* 11: 91. <https://doi.org/10.1186/s40494-023-00940-5>
- VICENT GARCIA J. M., MONTERO RUÍZ I., RODRÍGUEZ ALCALDE Á. L., NAVARRETE I. & CHAPA BRUNET T. 1996. — Aplicación de la imagen multiespectral al estudio y conservación del arte rupestre postpaleolítico. *Trabajos de Prehistoria* 53 (2): 19-35. <https://doi.org/10.33989/tp.1996.v53.i2.390>

Soumis le 2 décembre 2024;
accepté le 3 juillet 2025;
publié le 3 décembre 2025.