



HAL
open science

Étude des vermiculations par caractérisation morphologique, chromatique et chimique. L'exemple des grottes de Rouffignac et de Font-de-Gaume (Dordogne, France)

Stéphane Konik, Dominique Lafon-Pham, Joëlle Riss, Norbert Aujoulat, Catherine Ferrier, Bertrand Kervazo, Frédéric Plassard, Ina Reiche

► To cite this version:

Stéphane Konik, Dominique Lafon-Pham, Joëlle Riss, Norbert Aujoulat, Catherine Ferrier, et al.. Étude des vermiculations par caractérisation morphologique, chromatique et chimique. L'exemple des grottes de Rouffignac et de Font-de-Gaume (Dordogne, France). PALEO : Revue d'Archéologie Préhistorique, 2014, n° spécial, " Micro-analyses et datations de l'art préhistorique dans son contexte archéologique ". hal-01842720

HAL Id: hal-01842720

<https://hal.science/hal-01842720v1>

Submitted on 28 Aug 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire HAL, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

Étude des vermiculations par caractérisations morphologique, chromatique et chimique. L'exemple des grottes de Rouffignac et de Font-de-Gaume (Dordogne, France)

Stéphane KONIK^(1,2), Dominique LAFON-PHAM⁽³⁾, Joëlle RISS⁽⁴⁾,
Norbert AUJOULAT^(†), Catherine FERRIER⁽²⁾, Bertrand KERVAZO^(1,2),
Frédéric PLASSARD^(5,2), Ina REICHE⁽⁶⁾

Résumé : Communément observées sur les parois de grottes, les vermiculations sont de petits agrégats, millimétriques à pluricentimétriques, parfois à l'aspect de vers comme le suggère leur nom. Bien qu'il s'agisse d'un phénomène important puisqu'il est notamment susceptible de remobiliser les pigments, son origine reste mal connue, même si le rôle de l'eau apparaît établi. Notre étude a porté sur l'entrée de la grotte de Rouffignac et sur la Galerie principale de Font-de-Gaume (Dordogne). Après la description et la cartographie, nous avons analysé des microprélèvements selon différentes méthodes : microscopie électronique à balayage avec système d'analyse X, microdiffraction de rayons X, spectroscopie d'émission de rayons X et gamma induits par un faisceau de protons (micro-PIXE/PIGE). Un protocole de mesure et d'enregistrement colorimétrique non invasif, sans contact, a aussi été développé. Il nous a permis de caractériser les agrégats et les halos qui parfois les entourent, puis de les comparer au support et aux différentes sources de matériaux mobilisables à proximité. À partir d'une approche colorimétrique et morphologique par imagerie, une typologie des réseaux de vermiculations est en cours de définition. Ce protocole jette les bases d'une méthode de suivi de l'évolution de l'aspect des parois des grottes à des fins de conservation.

Mots-clés : grottes, art pariétal, Rouffignac, Font-de-Gaume, vermiculations, taphonomie des parois de grottes, colorimétrie, analyse d'image, microanalyses.

Abstract: The study of cave vermiculations by morphological, colorimetric and chemical characterization. The case of Rouffignac and Font-de-Gaume caves (Dordogne, France). Commonly observed on the walls of caves, the vermiculations are small aggregates of millimeter to centimeter sized particules, having sometimes the appearance of worms as their name suggests. Although it is an important phenomenon since it is particularly likely to remobilize pigments, its origin remains unclear, although the role of water seems established. Our study focused on the entrance of the Rouffignac Cave and on the Main Gallery of the Font-de-Gaume Cave. After the description and mapping, we analyzed micro-samples using different methods: SEM analysis sized particules with X-ray microdiffraction, X-ray emission spectroscopy and gamma-induced proton beam (micro-PIXE/PIGE). A non-invasive, contactless, protocol for measuring and recording color has also been developed. It allowed the characterization of the aggregates and halos that sometimes surround them.

(1) Centre National de Préhistoire, Sous-Direction de l'Archéologie, Ministère de la Culture et de la Communication, 38 rue du 26^{ème} R.I., FR-24000 Périgueux - stephane.konik@culture.gouv.fr

(2) Univ. Bordeaux, PACEA, UMR 5199 CNRS, Bât. 18, Avenue des Facultés, FR-33405 Talence cedex

(3) École des Mines d'Alès, C2MA, Hélioparc, 2 avenue P. Angot, FR-64053 Pau cedex

(4) Univ. Bordeaux, UMR 5295, I2M GCE, PAC Talence, allée Geoffroy Saint-Hilaire, CS 50023, FR-33615 Talence cedex

(5) SARL Grotte de Rouffignac, FR-24580 Rouffignac-Saint-Cernin

(6) UPMC, Univ. Paris 06, UMR 8220, Laboratoire d'archéologie moléculaire et structurale, LAMS, FR-75005 Paris

Then they were compared to the substrate and to the nearby sources of fine materials. A typology of networks vermiculations based on a colorimetric and morphological imaging approach has been defined. This protocol represents the basis for a method of monitoring changes in the appearance of the walls of caves for conservation purposes.

Key-words: Caves, Rock art, Rouffignac, Font-de-Gaume, Vermiculations, Caves walls alteration, Colorimetry, Image analysis, Microanalysis.

Introduction

Communément trouvées sur les parois des grottes, les vermiculations sont des agrégats irréguliers et discontinus de matériaux fins, sans grande cohésion, allant de ponctuations millimétriques à des formes pluricentimétriques variées, parfois anastomosées ou à l'aspect de vers comme le suggère leur nom (Hill et Forti 1997 - p. 221). Les processus d'agrégation de matière pulvérulente dont elles sont la manifestation restent mal connus, bien que le rôle de l'eau apparaisse établi (Bini *et al.* 1978). Leur étude est importante pour la conservation des grottes ornées car elles mobilisent, sur les parois, des matériaux naturels (argiles, sables) mais parfois aussi des pigments appliqués par l'homme (charbons, oxydes minéraux).

Afin de mieux caractériser ces formations et leur impact sur la conservation des œuvres pariétales, nous avons entrepris une étude pluridisciplinaire dans les grottes ornées de Rouffignac et de Font-de-Gaume (Dordogne). Si plusieurs techniques classiques ont été employées (descriptions, observations microscopiques, analyses physico-chimiques), l'originalité de notre approche réside dans le développement d'une méthodologie quantitative de suivi de l'aspect des parois et des œuvres, sans contact, non invasive et qu'il a fallu adapter au milieu souterrain. Basée sur la mesure de la couleur, elle fait appel aux techniques de la spectroradiométrie dans le domaine visible et de la colorimétrie. L'utilisation couplée d'outils d'analyse d'image permet une étude quantitative qui, appliquée aux agrégats vermiculés, autorise la caractérisation :

- de leur forme, leur taille, leur répartition ;
- de la distribution spatiale des couleurs sur eux-mêmes et dans leur entourage.

Cette approche quantitative est notamment destinée à fournir les données nécessaires à la compréhension des phénomènes de mobilisation des matériaux dans une perspective de conservation.

Soulignons que cette analyse permet un suivi des manifestations des phénomènes de remobilisation de matière dans le temps : la technique d'acquisition de données couleur développée autorise la comparaison métrologique d'images enregistrées à des moments différents.

1 - Caractéristiques et implications des vermiculations

1.1 - Caractéristiques morphologiques

De formes et de dimensions variables, les agrégats vermiculés se caractérisent :

- par un contraste plus ou moins net de couleur avec le support et, dans certains cas, par un halo décoloré qui les entoure (Camassa et Febroriello 2003) (fig. 5.6) ;

- par leur morphométrie et leur relation de voisinage qui diffèrent d'un endroit à l'autre : depuis des éléments punctiformes, isolés, millimétriques, jusqu'à des rubans pluricentimétriques tortueux, connectés (décrits dans la littérature sous les termes de « dendrites, peau de léopard ou hiéroglyphes », par exemple – *ibid.* ; Bini *et al.* 1978), aux densités très variables.

1.2 - Surfaces concernées

Les vermiculations ont été observées sur bien des parois souterraines.

Dans le cadre des travaux de l'ANR MADAPCA, nous avons retenu les grottes de Rouffignac et de Font-de-Gaume, sites dans lesquels elles affectent des surfaces différentes par leur nature (calcaire, calcite, silex...), leur rugosité (lisses ou irrégulières), leur situation et inclinaison (voûte, paroi subverticale, sol).

1.3 - Explication synthétique de l'origine du phénomène

À partir des différentes hypothèses avancées dans la littérature à l'occasion d'observations particulières, A. Bini, M. Cavalli Gori et S. Gori (Bini *et al.* 1978) proposent une explication synthétique de la formation des agrégats vermiculés sur laquelle semblent actuellement s'accorder les auteurs. Le processus à l'origine du phénomène serait la floculation pendant le séchage de films liquides contenant des matériaux fins en suspension, l'eau provenant, suivant les cas, de condensation, de percolation et, plus rarement, d'inondation. Les caractéristiques des agrégats (forme, couleur, densité...) seraient notamment contrôlées par les paramètres relatifs à la matière en suspension, aux surfaces concernées, aux conditions d'évaporation et de neutralisation des charges électriques sur les particules colloïdales.

1.4 - Implications sur la conservation de l'art rupestre

Certains agrégats sont humides et mous, d'autres sont secs, indurés, ou recouverts par un voile de calcite. Leur impact visuel, préoccupation fondamentale en matière de conservation, dépend de multiples paramètres : localisation, couleur, présence de halos, taille, densité qui peuvent affecter ponctuellement ou de manière ponctuelle ou généralisée, les champs ornés. La méthode est destinée à évaluer les risques qu'ils font courir aux œuvres pariétales et à reconnaître les paramètres susceptibles de contrôler leur développement.

2 - Méthode développée : mesures et enregistrements colorimétriques des surfaces

Afin de mener une étude métrologique de l'aspect des vermiculations dans les deux grottes retenues, nous avons adapté la méthode classique d'automatisation des enregistrements colorimétriques de surfaces. Cette dernière est par ailleurs déjà appliquée pour l'étude, la conservation et la restauration du patrimoine (Concha-Lozano *et al.* 2011, 2013). Transposée aux grottes ornées, elle devrait permettre l'enregistrement et la quantification de toute manifestation visible des modifications apparaissant sur les parois. La signature couleur de chaque agrégat peut informer à la fois sur la nature de ses constituants (minéraux et/ou organiques) et sur leur distribution spatiale. Dans cette perspective, nous avons complété l'étude colorimétrique par l'analyse d'agrégats prélevés sur le calcaire et la calcite : observations en microscopie électronique à balayage (MEB) couplée à un système d'analyse X (EDX) et microdiffraction des rayons X (voir Plassard *et al.* ce volume). Ce travail sur les vermiculations réalisé dans le cadre de l'ANR MADAPCA constitue une première étape de caractérisation de différents processus d'altération des parois des grottes ornées.

2.1 - Cahier des charges pour les grottes

La mise en œuvre de la méthode en grotte permet de contrôler totalement l'éclairage de la surface étudiée. Ce dernier doit répondre à plusieurs contraintes :

- ne pas produire de chaleur excessive ;
- émettre un spectre continu qui couvre toutes les longueurs d'onde du domaine visible de façon équilibrée (éclairage de type « lumière du jour ») ;
- produire un flux lumineux uniforme selon un angle solide suffisamment ouvert pour éclairer de façon homogène les surfaces étudiées ;
- être régulé, c'est-à-dire produire un signal lumineux constant au cours du temps, afin de garantir la reproductibilité des conditions d'éclairage lors de prises de vue successives.

L'étude de la typologie morphologique des vermiculations et de leur signature couleur répond à deux préoccupations :

- prendre en compte le fait que la distribution spatiale de la couleur constitue une donnée importante sur la répartition des particules dans l'agrégat et son entourage ;
- analyser leurs caractéristiques morphologiques ou texturales à partir d'informations extraites de cartographies construites sur la base de mesures colorimétriques (segmentation pour extraire les agrégats). Les éventuels filtrages de l'image avant segmentation doivent être minimisés et limités à la correction de critères physiques n'affectant pas la signature couleur.

En effet, il convient d'éviter toute perte d'information, notamment dans les zones de recouvrement moins denses telles que les bordures des agrégats.

L'appareil photographique numérique choisi pour la capture des informations couleur doit répondre à plusieurs critères :

- fonctionner sous faible éclairage ;
- être calibré afin de produire une image couleur codée dans un espace colorimétrique standard (X, Y, Z défini par la Commission internationale de l'éclairage - CIE - en 1931, par exemple) ;
- fournir une précision suffisante pour permettre l'analyse des variations observées sur les zones de vermiculations.

2.2 - Mise en forme de l'information couleur contenue dans l'image

Les images acquises selon ce cahier des charges doivent pouvoir être exploitées de façon simple. Il est donc nécessaire de sélectionner des attributs couleur pertinents afin de produire des cartographies qui permettent de discerner des ensembles distincts ayant une signification au sens physique ou au sens perceptif du terme (distinction entre fond rocheux et zone pigmentée, distinction entre matière pigmentaire employée par l'artiste et matière colorée naturelle issue d'un processus d'altération/transport, par exemple). L'objectif de la mise en forme de l'information couleur est de générer des cartographies en niveaux de gris codant un attribut sous forme d'une valeur mesurée (scalaire).

Les éléments étudiés font classiquement l'objet d'un examen visuel et d'une description basée sur des critères perceptifs. C'est pourquoi nous avons choisi de représenter les données sous forme de cartes d'attributs perceptifs, comme la clarté, la teinte ou la saturation, en codant la couleur dans l'espace CIE L*a*b* 1976 qui permet une évaluation quantitative de ces attributs (Schanda 2007) :

- en coordonnées cartésiennes pour les plans L (clarté), a (axe rouge-vert) et b (axe jaune-bleu) ;
- en coordonnées cylindriques pour les plans teinte et saturation.

3 - Premiers essais en grotte et résultats

Afin de tester les potentialités de la méthode, nous avons réalisé une série d'essais dans les grottes de Rouffignac et de Font-de-Gaume. Le matériel utilisé (fig. 1) a été :

- un éclairage halogène filtré UV de température de couleur 4700 Kelvin ;
- un appareil photographique numérique reflex (Nikon D700), dont nous avons calibré le capteur CMOS à l'aide d'un spectroradiomètre (Konica-Minolta CS2000).

Pour assurer la reproductibilité du positionnement des éclairages, nous avons fixé les lampes directement sur le pied de l'appareil photographique.

3.1 - Vermiculations du secteur d'entrée de la grotte de Rouffignac

Des vermiculations, généralement de forme hiéroglyphique irrégulière (Parenzan 1961 ; Bini *et al.* 1978), sont présentes sur certaines parois à proximité du « mur des Religions », près de l'entrée de la grotte. Un suivi photographique, mené indépendamment du protocole présenté ci-dessus par l'un d'entre nous (FP) pendant plus d'un an et demi sur la paroi gauche de la galerie, une quinzaine de mètres après le mur de l'entrée, n'a détecté aucune évolution : ni nouveaux agrégats, ni changement de forme.

3.1.1 - Apports de l'analyse colorimétrique

Différentes cartographies des enregistrements colorimétriques (images couleur calibrées) ont été réalisées (fig. 2). Elles correspondent à la décomposition des images selon des attributs couleur :

- composante du système CIE $L^*a^*b^*$: clarté « plan L », couleurs sur un axe vert-rouge « plan a » et bleu-jaune « plan b » (fig. 2.2, 2.3 et 2.4) ;
- saturation (chroma) « plan c », en référence à l'aspect plus ou moins délavé d'une couleur (Sève 1996) (fig. 2.5) ;
- angle de teinte (hue) « plan h », exprimé en degrés (fig. 2.6).

Si les agrégats apparaissent un peu plus distinctement sur le plan b que sur le plan a, c'est sur le plan c qu'ils contrastent le plus avec leur environnement. C'est donc ce plan que nous avons retenu pour caractériser leur morphométrie. Ce contraste révèle que le support est moins saturé et que le processus engendre des gradients locaux de saturation dus à une concentration de la matière colorée dans les agrégats. En revanche, l'angle de teinte (plan h), qui ne constitue pas un critère discriminant, montre que les agrégats ne s'identifient pas à une teinte distincte. Dans ces conditions, il apparaît vraisemblable que la matière concentrée dans les vermiculations résulte d'une remobilisation de résidus fins d'altération de la roche et de poussières qui recouvrent la paroi (« crasse des siècles » de H. Breuil ; Capitan, Breuil *et* Peyrony 1910) en lui conférant une teinte similaire.

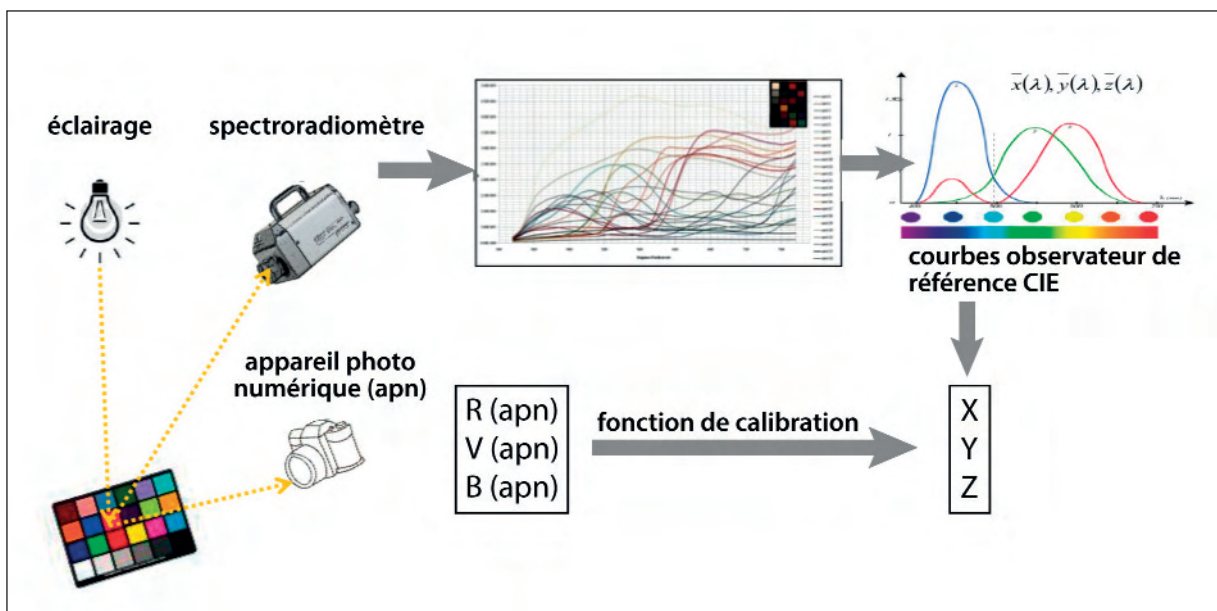
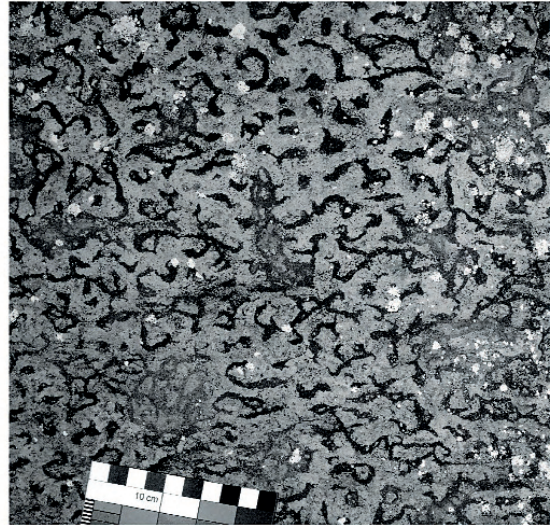


Figure 1 - Principe de l'acquisition des données couleur par prises de vues calibrées.

Figure 1 - Example of acquisition of color data by calibrated views.



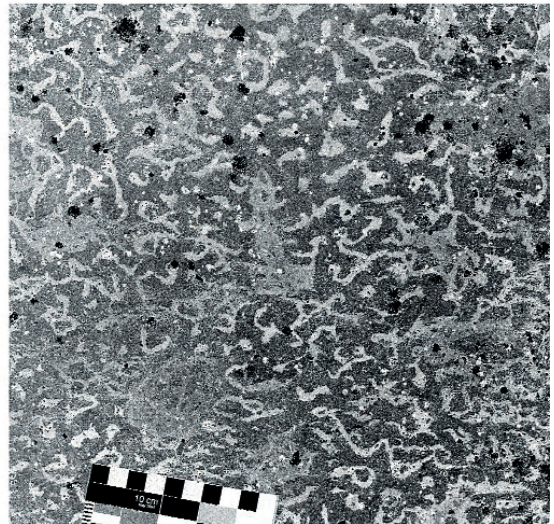
1 - Photo de la surface étudiée avec des vermiculations



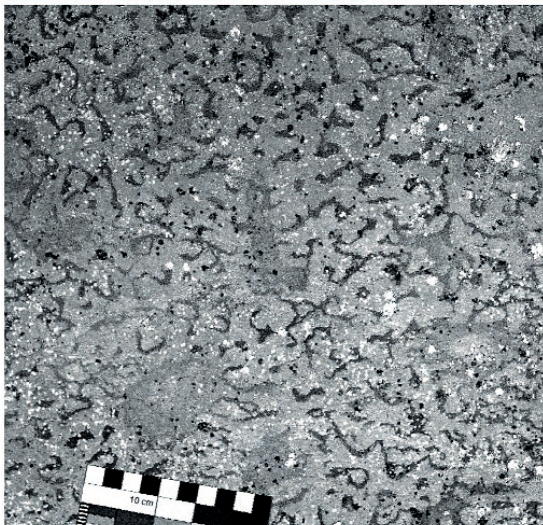
2 - Cartographie du plan L : clarté



3 - Cartographie du plan a du système CIE L*a*b*



4 - Cartographie du plan b du système CIE L*a*b*



5 - Cartographie du plan c : saturation (chroma)



6 - Cartographie du plan h : teinte (hue)

Figure 2 - Cartographies des enregistrements colorimétriques d'une portion de paroi avec des vermiculations de la grotte de Rouffignac.

Figure 2 - Mapping of color records of a wall portion with vermiculations in Rouffignac cave.

3.1.2 - Apports de l'analyse morphométrique

La segmentation d'image destinée à extraire les agrégats vermiculés a été faite sans perte notable au niveau des caractéristiques géométriques des vermiculations. En effet, l'hétérogénéité du support rocheux (petites variations de couleur essentiellement dues à la répartition des plages d'humidité et à la présence d'efflorescences de calcite) qui apparaît sur l'image couleur initiale peut être compensée avant l'étape de segmentation. Ce filtrage préalable n'affecte pas la distribution spatiale des gradients chromatiques sur lesquels se base l'extraction des agrégats.

Nous avons sélectionné des portions de paroi planes puis extrait leurs agrégats par seuillage à partir des informations de saturation contenues dans le plan c (chroma) (fig. 3). Différentes mesures ont été réalisées dans chacun des secteurs étudiés, comme par exemple le taux d'occupation surfacique des agrégats qui a été estimé voisin de 33 %. Cette estimation a vocation à être précisée en tenant compte de la diversité des modes d'agrégation des vermiculations. L'image seuillée a fait l'objet d'un étiquetage : chaque groupement connexe de pixels a été individualisé (l'analyse de l'image numérique a été effectuée en huit connexes). Ce découpage en un ensemble d'objets - les agrégats vermiculés connexes - a ensuite permis une analyse de la morphologie de chaque agrégat.

3.1.3 - Observations microscopiques et analyses physico-chimiques

Des agrégats aux couleurs relativement variées : brun clair, brun (V_Rouf1), noirâtre (V_Rouf2), ont été prélevés sur le calcaire de la paroi gauche (V_Rouf1) et sur un rognon de silex (V_Rouf2). L'échantillon d'un placage argileux brun clair dépourvu de vermiculation est en cours d'analyse afin de le comparer aux agrégats voisins.

Des observations des échantillons de vermiculations à la loupe binoculaire et au MEB, ainsi que des analyses ponctuelles grâce à l'analyseur X couplé au MEB et en microdiffraction de rayons X, ont mis en évidence le caractère très hétérogène des agrégats. L'échantillon V_Rouf1 apparaît ici constitué principalement de calcite, de quartz et de traces de fer. L'échantillon V_Rouf2 (fig. 4.1 et 4.2) est plus hétérogène, présentant différentes phases d'éléments à la fois hétérométriques et de natures diverses : grains de quartz, de calcite, fragments de fossiles de l'encaissant, aluminosilicates riches en fer et des microcristaux disséminés de monazite contenant des terres rares (Cd, Th, U). Ces derniers sont probablement d'origine détritique.

La similitude de composition des agrégats et des résidus d'altération du calcaire présents sur la paroi est à remarquer. Le fait de retrouver les mêmes constituants – y compris la calcite – dans les agrégats formés sur rognon de silex que sur la paroi calcaire démontre que le phénomène

de vermiculation mobilise tous ces éléments et peut les entraîner sur des supports variés.

Les études colorimétriques et physico-chimiques initiées à Rouffignac tendent à confirmer l'origine locale des matériaux constituant les agrégats, mais attestent aussi de déplacements suffisamment conséquents pour que, par exemple, de la calcite ou des minéraux détritiques viennent se déposer sur des rognons de silex. Elles montrent la faisabilité et l'intérêt de l'analyse d'image à partir de cartographies des mesures chromatiques, la complémentarité des analyses physico-chimiques et le potentiel de la méthode proposée pour mieux appréhender la mobilisation des matériaux fins sur les parois.

3.2 - Vermiculations de la grotte de Font-de-Gaume

Des vermiculations, généralement fines et allongées, de forme dendritique, ont été observées sur certaines portions de paroi dans la seconde partie de la Galerie principale et dans le Diverticule terminal. Elles peuvent affecter aussi bien les calcaires encaissants que leurs revêtements calcitiques.

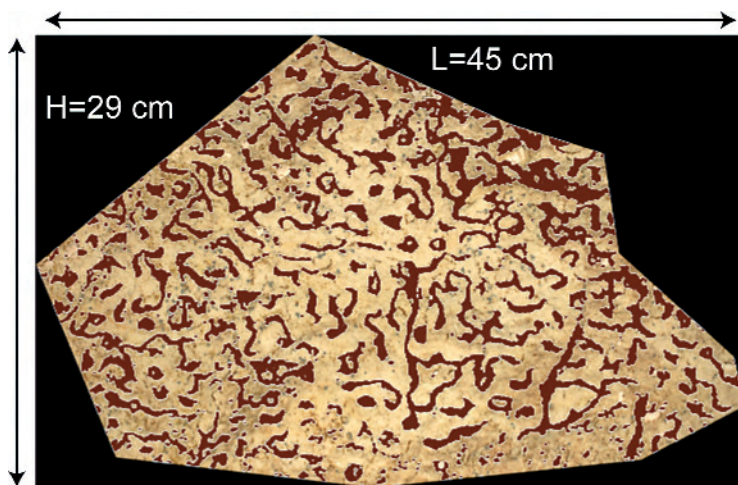
3.2.1 - Apports de l'analyse colorimétrique

3.2.1.1 - Exemple d'agrégats vermiculés sur de la calcite

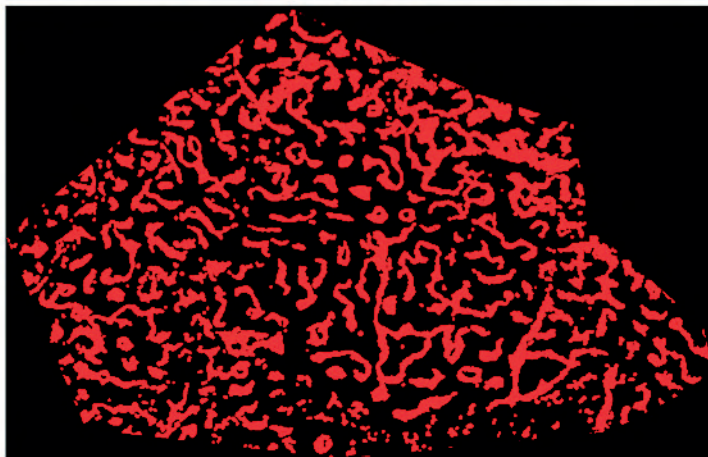
Les agrégats s'observent notamment au fond de la Galerie principale. Ceux que nous avons étudiés se trouvent sur une stalactite située près de l'entrée du Diverticule terminal (fig. 5.1 à 5.5). Le support de calcite blanche présente localement une plage rougeâtre, rapportable à des oxydations ou à la présence d'argiles. L'étude colorimétrique (plans a, b et, plus nettement, plans c et h) permet de délimiter une zone d' « influence » dans laquelle les agrégats s'avèrent plus rougeâtres (fig. 5.2 à 5.5). Ils ont donc concentré de la matière remobilisée et/ou été imbibés par de l'eau chargée en oxydes de fer et/ou argiles. Dans l'hypothèse où ils n'auraient pas été imbibés *a posteriori*, cette zone d'influence serait indicative de la distance de migration des matériaux qui constituent les agrégats et montrerait que le déplacement de matière ne s'est pas effectué uniquement sous l'effet de la gravité.

3.2.1.2 - Agrégats avec halos sur pigment (Diverticule terminal)

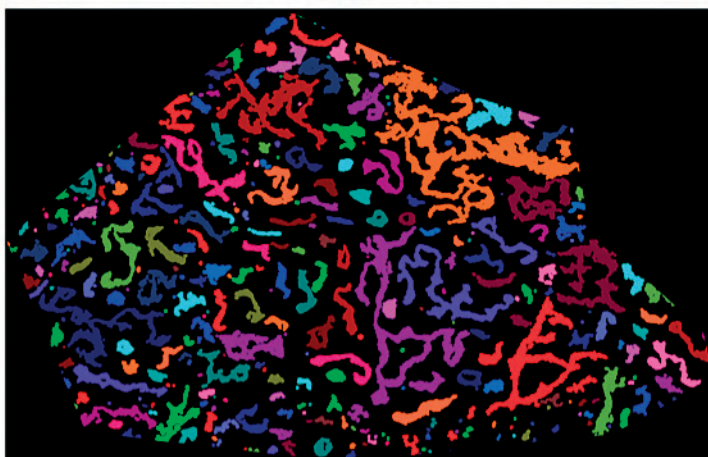
Les agrégats qui affectent quelques peintures sont parfois entourés de halos plus clairs qui matérialisent un appauvrissement local de la couche pigmentaire (vache n° 29, sur la paroi gauche du Diverticule final ; Capitan, Breuil et Peyrony 1910) (fig. 5.6 à 5.8). La caractérisation et le suivi de l'impact du processus de vermiculation sur la distribution spatiale des pigments appliqués par l'artiste sont déterminants dans une démarche de conservation. L'exemple retenu montre des halos formés au sein d'un pigment brun et partiellement recouverts par des moisissures grisâtres. Notre démarche a consisté à mettre en évidence ces halos en produisant une image scalaire (à



1 - Élection d'une portion de paroi plane avec des vermiculations



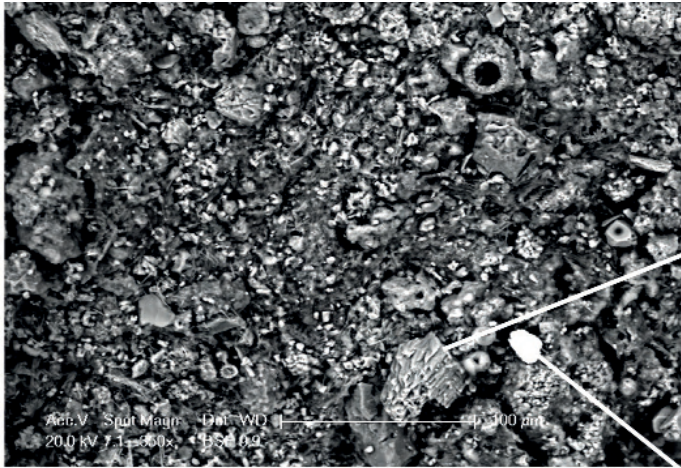
2 - Extraction des agrégats (segmentation)



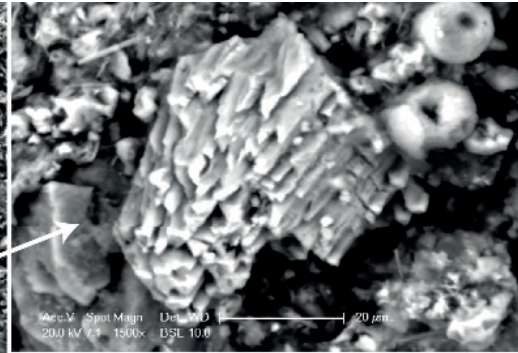
3 - Étiquetage de chaque agrégat

Figure 3 - Analyse morphométrique des vermiculations sur une portion de paroi de la grotte de Rouffignac.

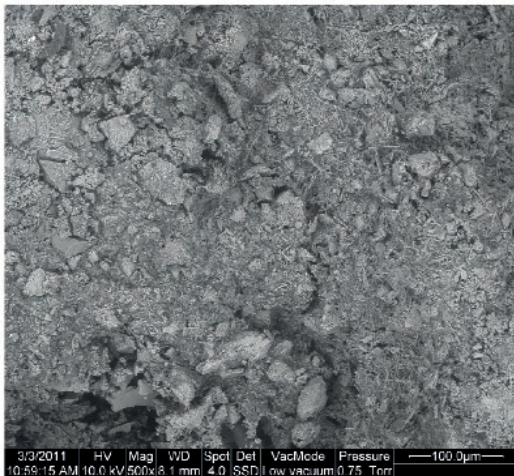
Figure 3 - morphometric analysis of vermiculations on a wall portion in Rouffignac cave.



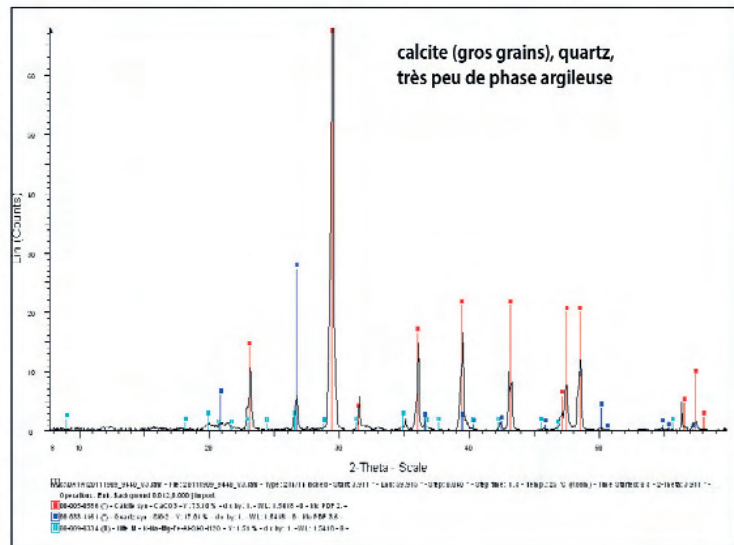
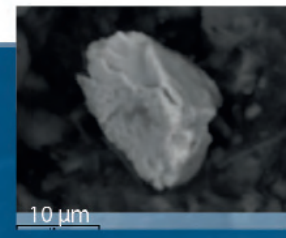
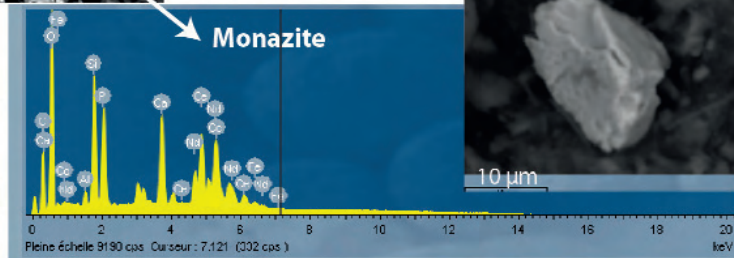
a) Rouffignac : agrégat sur silex au MEB (échantillon V_Rouf2)



b) détail du fragment de calcite (échantillon V_Rouf2)



c) Font-de-Gaume : agrégat sur calcite au MEB (échantillon FdG2)



d) Font-de-Gaume : analyse par microdiffraction de rayons X (échantillon FdG2)



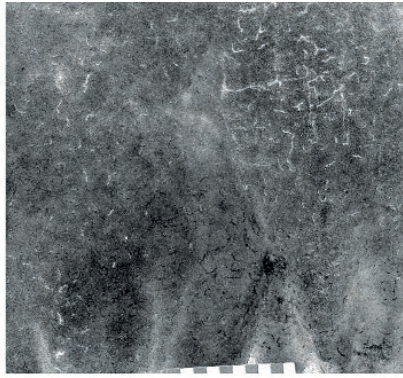
e) Font-de-Gaume : poussières sur calcite au MEB (échantillon FdG1)

Figure 4 - Quelques observations microscopiques de vermiculations des grottes de Rouffignac et de Font-de-Gaume (V_Rouf1, V_Rouf2, FdG1, FdG2) et analyse par microdiffraction de rayons X de l'échantillon FdG2.

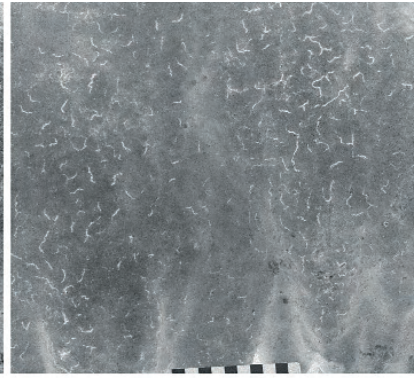
Figure 4 - Some microscopic observations of vermiculations from Rouffignac and Font-de-Gaume caves (V_Rouf1, V_Rouf2, FdG1, FdG2) and analysis by X-ray microdiffraction of sample FdG2.



1 - Photo de vermiculations sur une stalactite (Galerie principale)



2 - Cartographie du plan a du système CIE L*a*b*



3 - Cartographie du plan b du système CIE L*a*b*

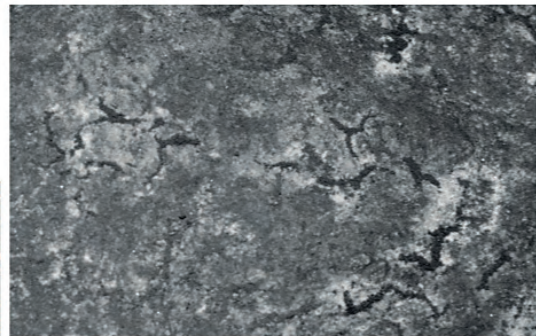


4 - Cartographie du plan c : saturation (chroma)



5 - Cartographie du plan h : teinte (hue)

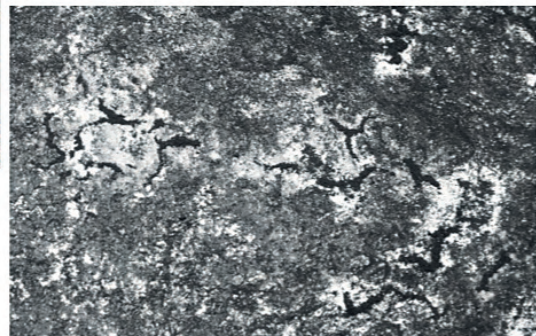
6 - Cartographie du plan L : clarté



1 cm



7 - Photo d'agrégats avec des halos sur des pigments (Diverticule terminal) (les flèches indiquent la présence de moisissures recouvrant partiellement certains amas et halos)



8 - Cartographie de L/c

Figure 5 - Cartographies des enregistrements colorimétriques de portions de paroi avec des vermiculations de la grotte de Font-de-Gaume.

Figure 5 - Mapping of color records of wall portions with vermiculations in Font-de-Gaume cave.

niveaux de gris) dans laquelle une correspondance évidente pourrait être établie entre valeur de gris d'un pixel et degré d'appartenance à la zone de halo. Dans le cas présenté, c'est le rapport clarté/chroma qui a le mieux permis d'individualiser les halos de l'image en « gommant » l'impact des moisissures sur la définition des limites halos/zone couverte de pigment. Les dimensions respectives des amas et des halos peuvent ainsi être mesurées après seuillage de l'image.

La cartographie des angles de teinte discrimine nettement le support calcaire du pigment tandis que les agrégats ont la même teinte que le pigment non remobilisé. L'établissement de profils (fig. 6) renseigne sur le gradient de teinte induit par la remobilisation de la matière pigmentaire dans l'environnement des halos. Cette caractérisation colorimétrique de la transition entre couche pigmentaire non affectée, agrégats et halos matérialise bien la redistribution de la matière colorante en zones tour à tour concentrées et appauvries.

3.2.2 - Observations microscopiques et analyses physico-chimiques

Nous avons prélevé des agrégats vermiculés présents sur la stalactite en marge du secteur de l'étude colorimétrique (FdG2) ainsi que de la « poussière » (FdG1) (« crasse des siècles ») accumulée sur un replat en paroi gauche de la Galerie latérale, au niveau du Carrefour, afin de voir si cette « poussière » a été remobilisée par les vermiculations.

Les observations des agrégats FdG2 à la loupe binoculaire et au MEB, complétées par des analyses EDX ponctuelles, ont confirmé leur caractère hétérogène et le fait que, comme à Rouffignac, ils sont constitués de phases hétérométriques comportant de la calcite (ici des gros grains), mais aussi du quartz et une phase argileuse, bien qu'ils aient été prélevés sur une concrétion (fig. 4.3 et 4.4).

L'échantillon de « poussière » renferme ces mêmes constituants mais de nombreuses fibres s'ajoutent (fig. 4.5). Elles pourraient provenir, par exemple, des vêtements des personnes fréquentant la grotte. Si les processus à l'origine des vermiculations ont repris les matériaux fins de la « poussière », ils n'ont donc, en revanche, pas été capables, dans cet exemple, de mobiliser ces fibres (rôle des forces électrostatiques ?).

Les études colorimétriques et physico-chimiques que nous avons initiées à Font-de-Gaume constituent deux approches complémentaires qui fournissent des informations sur la mobilisation des matériaux fins en fonction des différents supports qui caractérisent une grotte ornée - surface rocheuse, spéléothèmes - avec ou sans pigment.

Conclusion

Ces exemples illustrent les avantages de la méthode et son potentiel pour l'étude et la conservation des grottes ornées. Ils montrent qu'elle autorise un diagnostic susceptible d'être

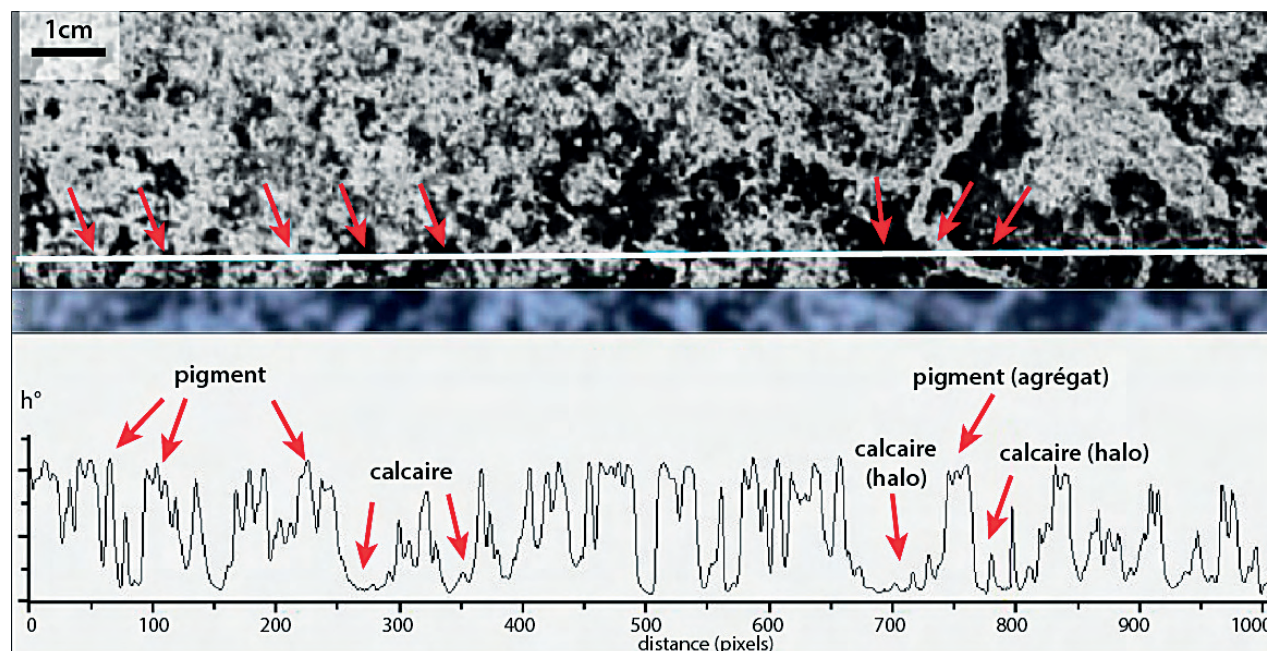


Figure 6 - Profil sur la cartographie de la teinte montrant les gradients induits par la remobilisation du pigment en agrégats vermiculés.

Figure 6 - Profile on the map of color showing gradients induced by remobilization of pigment in vermiculated aggregates.

étendu à l'ensemble des états de surface des parois et à l'étude des témoignages pariétaux (Aujoulat 1989). Ils nous ont permis de poser les bases d'une caractérisation quantitative - colorimétrique, morphométrique et texturale - de l'état des parois et de l'évolution de leur aspect dans le temps par une technique optique, non invasive et adaptée aux contraintes du milieu souterrain. En outre, l'acquisition et l'analyse d'images calibrées apportent des informations sur la couleur qui concernent à la fois des éléments sur le contenu perceptif de la scène analysée et des caractéristiques du signal physique non discernables à l'œil, ce qui démultiplie le potentiel de surveillance. En effet, notre mémoire des couleurs n'est pas absolue ; il nous est difficile d'établir *de visu* des comparaisons entre zones différentes, particulièrement en cas de variation des gradients couleurs ou des textures.

Ces premières cartographies couleur et mesures spectroradiométriques, complétées par des analyses physico-chimiques et par des expériences en laboratoire, devraient contribuer à une meilleure compréhension des mécanismes de vermiculation. Nous avons pour objectif d'établir des relations entre couleur, nature et état de la matière pulvérulente et des supports rocheux, de manière à mieux comprendre l'impact des processus physico-chimiques impliqués notamment en termes d'altération du contenu perceptif des œuvres pariétales.

Remerciements

Nous remercions l'équipe de l'ANR MADAPCA, les membres du C2RMF, J.-J. Cleyet-Merle, G. Lévy, les guides de la grotte de Font-de-Gaume, É. Chalmin, S. Hoerlé, ainsi que M.-O. et J. Plassard pour leur aide dans la réalisation de ce travail. Nous tenons également à remercier le département Biomatériaux de l'institut Max-Planck des Colloïdes et Interfaces (Potsdam-Golm, Allemagne), pour l'accès au microscope électronique à balayage en mode environnemental.

Références bibliographiques

AUJOULAT N. 1989 – Optimisation des méthodes de relevé. In : *L'art pariétal paléolithique, étude et conservation*. Actes du colloque de Périgueux (1984). Paris : Ministère de la Culture et de la Communication, p. 145-155.

BINI A., CAVALLI GORI M., GORI S. 1978 – A Critical Review of the Hypotheses on the Origin of Vermiculatons. *International Journal of Speleology*, 10, p. 11-33.

CAMASSA M.M., FEBBRORIELLO P. 2003 – Le foval della grotta Zinzulusa in Puglia (SE-Italia). *Thalassia Salentina*, 26, p. 207-218.

CAPITAN L., BREUIL H., PEYRONY D. 1910 – *La caverne de Font-de-Gaume, aux Eyzies, (Dordogne)*. Monaco : Imprimerie Veuve A. Chêne.

CONCHA-LOZANO N., LAFON-PHAM D., ETERRA-DOSSI O., GAUDON P. 2011 – Assessment of Real Aging in Selection Process of Replacement Materials for Stone Monuments Conservation. *Virtual Archeology Review*, 3, 2, p. 27-29

CONCHA-LOZANO N., LAFON D., SABIRI N., GAUDON P. 2013 – Color Thresholds for Aesthetically Compatible Replacement of Stones on Monuments. *Color Research & Application*, octobre 2013, Vol. 38, Issue 5, p. 356-363.

HILL C., FORTI P. 1997 – *Cave Minerals of the World*. Huntsville, USA : National Speleological Society.

PARENZAN P. 1961 – Sulle formazioni argillo-limose dette vermicolari. *Rassegna Speleologica Italiana*, Memoria V, tomo II, p. 120-125.

PLASSARD F., KERVAZO B., FERRIER C., REICHE I., KONIK S., CASTAING J., ROUSSELIÈRE H., AUJOULAT N. 2014 – Altérations et dépôts sur les parois de la grotte de Rouffignac : premiers résultats d'analyses. In : Paillet P. dir., *Les arts de la Préhistoire : micro-analyses, mises en contextes et conservation*. Actes du colloque « Micro-analyses et datations de l'art préhistorique dans son contexte archéologique », MADAPCA, Paris, 16-18 novembre 2011, Paleo, numéro spécial, 2014, p. 299-310.

SÈVE R. 1996 – *Physique de la couleur. De l'apparence colorée à la technique colorimétrique*. Paris : Masson.

SCHANDA J. 2007 – *Colorimetry – Understanding the CIE System*. Hoboken, New Jersey : Wiley & Sons.

