

Physics and arts / *Physique et arts*

Apports de la colorimétrie et de la spectroradiométrie à la caractérisation in situ des peintures paléolithiques de la grotte Chauvet (Ardèche, France)

Contributions of colorimetry and spectroradiometry to the in-situ characterisation of the Palaeolithic paintings of Chauvet Cave (Ardèche, France)

Stéphane Konik^{a,*}, Dominique Lafon-Pham^b^a Ministère de la Culture / Centre national de la préhistoire, UMR 5199 – PACEA, 38, rue du 26^e -RI, 24000 Périgueux, France^b Centre des matériaux des Mines d'Alès (C2MA), IMT Mines Alès, 30319 Alès cedex, France

I N F O A R T I C L E

Historique de l'article :

Disponible sur Internet le 20 novembre 2018

*Mots-clés :*Peintures paléolithiques
Couleur
Colorimétrie
Spectroradiométrie
Grotte Chauvet*Keywords:*Paleolithic paintings
Colour
Colorimetry
Spectroradiometry
Chauvet cave

R É S U M É

La couleur des peintures paléolithiques sur les parois des grottes a été étudiée principalement de manière qualitative et, plus rarement, sous l'angle de la physique. Notre approche repose sur la réalisation de mesures colorimétriques dans des grottes, au moyen de l'acquisition de spectres de luminance énergétique avec un spectroradiomètre portable pouvant fonctionner sans contact, à plusieurs mètres des murs décorés étudiés, respectant ainsi les contraintes de conservation. La couleur des œuvres pariétales est un élément à prendre en compte pour leur étude archéologique et leur conservation. Mais l'observation est insuffisante, et seule la mesure de la couleur permet de comparer des œuvres éloignées sur des supports rocheux de différentes couleurs et sous diverses conditions de surface. Cet article présente la méthodologie utilisée et fait le point sur l'expérience acquise dans le cadre du programme de recherche sur la grotte Chauvet. Il tente également de montrer les avantages qu'il y a à prendre des mesures spectroradiométriques sur des œuvres d'art préhistoriques. Cependant, l'étude in situ de leur couleur ne peut se substituer aux analyses chimiques et minéralogiques et à la caractérisation des matériaux, qu'ils soient sous forme d'échantillons ou en place. Son intérêt réside dans sa capacité à détecter des modifications, même minimes, de l'état et de la composition. Notre objectif était donc d'établir des comparaisons entre les entités graphiques afin d'identifier les origines des variations détectées dans leurs signatures optiques. Ces variations peuvent être liées à la nature des matières colorantes, mais également à leur position sur le mur, conséquence des méthodes d'application et parfois aussi des retraits ultérieurs sous l'effet de processus taphonomiques, tels que le ruissellement de l'eau. Les altérations (patines) et les revêtements (notamment les voiles de calcite ou d'argile) ont également été pris en compte dans notre analyse des données. Nous avons donc mené des expériences de calcification de surfaces pour évaluer le cas – assez fréquent dans les grottes – de calcite recouvrant une surface colorée, en dehors de tout autre phénomène d'altération. Les premiers résultats nous amènent à penser qu'il est possible d'identifier la signature d'un

* Auteur correspondant.

Adresses e-mail : stephane.konik@culture.gouv.fr (S. Konik), dominique.lafon@mines-ales.fr (D. Lafon-Pham).

voile de calcite sur des matières colorantes données et de présenter des hypothèses sur la nature des matières colorantes recouvertes d'un voile de calcite.

© 2018 Publié par Elsevier Masson SAS au nom de Académie des sciences. Cet article est publié en Open Access sous licence CC BY-NC-ND (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

A B S T R A C T

The colour of the Palaeolithic paintings on cave walls has been studied primarily in a qualitative way and, more rarely, from the physical angle. Our approach is based on the production of colorimetric measurements in caves, by means of the acquisition of energy radiance spectra with a portable spectroradiometer that can function without contact, several metres away from the decorated walls being studied, thus respecting the constraints of conservation. The colour of parietal works is an element that needs to be taken into account for their archaeological study and conservation. But observation is insufficient and only the measurement of colour makes it possible to compare distant works on rocky supports with different colourings and surface conditions.

This article shows the methodology used, and it takes stock of the experience acquired in the research programme on the Chauvet Cave. It also attempts to show the benefits of taking spectroradiometric measurements on prehistoric artworks. However, the in-situ study of their colour cannot be a substitute for chemical and mineralogical analyses and the characterization of the materials, either sampled or in place. Its interest lies in its capacity for detecting even minimal changes in condition and composition. So our objective has been to establish comparisons between the graphic entities to identify the origins of the variations detected in their optical signatures. These variations can be linked to the nature of the colouring materials, but also to their position on the wall, a consequence of the application methods and sometimes also of later removals through taphonomic processes such as water run-off. Alterations (patinas) and coverings (notably veils of calcite or clay) have also been taken into account in our analysis of the data. Hence, we carried out experiments in calcification of surfaces to evaluate the case – quite frequent in caves – of calcite covering a coloured surface, outside of any other phenomenon of alteration. The first results lead us to assume that it is possible to identify the signature of a veil of calcite on given colouring materials and also to present hypotheses about the nature of colouring materials covered by a veil of calcite.

© 2018 Publié par Elsevier Masson SAS au nom de Académie des sciences. Cet article est publié en Open Access sous licence CC BY-NC-ND (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. Introduction

En matière d'étude des peintures paléolithiques sur les parois des grottes, la couleur des matières colorantes n'a été abordée, dans la plupart des cas, que de manière qualitative. Lorsque c'était possible, ces matériaux divisés colorants appliqués sur les parois au Paléolithique ont fait l'objet d'analyses physicochimiques et minéralogiques (prélèvements sur tracés ou analyses de matières premières) [1–7]. Ce sont le plus souvent des mélanges de deux à n constituants minéralogiques de tailles et formes variables : il est difficile, face à cette complexité, d'établir un lien direct entre comportement optique observable in situ et composition de la matière colorante. L'approche métrologique par l'analyse colorimétrique, bien que suscitant l'intérêt en matière de conservation notamment, n'a jusqu'à présent fait l'objet que de rares tentatives de mise en œuvre in situ [8]. La démarche innovante présentée dans cet article repose sur l'utilisation en grotte de techniques non invasives de mesure colorimétrique. Ainsi, nous avons eu recours à un spectroradiomètre portable permettant d'opérer à distance sur des parois ornées, en respectant les contraintes de conservation d'un site archéologique souterrain. Cette approche nous a permis d'accomplir des avancées significatives en matière d'étude quantitative des couleurs des parois ornées, de leurs matières colorantes et des principaux phénomènes d'altération susceptibles de les affecter. Cet article dresse un premier bilan de l'expérience acquise notamment dans le cadre du programme de recherche sur la grotte Chauvet [9], et il aborde les perspectives ouvertes par cette avancée méthodologique.

La couleur des surfaces est une propriété qui relève à la fois du domaine du subjectif (on parlera de couleur perçue) et du domaine de l'objectif (on parlera alors de couleur physique ou chimique). Nous n'aborderons ici la couleur que sous l'angle objectif, en nous intéressant uniquement aux interactions lumière/matière.

La couleur des œuvres peintes paléolithiques de la grotte Chauvet est un élément à prendre en compte pour leur étude archéologique, mais aussi pour leur conservation [10]. L'aspect actuel d'une paroi ornée résulte de l'histoire longue et complexe de la matière picturale et de l'œuvre. La composition chimique et minéralogique des matières colorantes appliquées n'était auparavant connue qu'à travers des micro-prélèvements faits en très petit nombre pour d'évidentes raisons de conservation des œuvres. Mais, depuis quelques années, certaines techniques d'analyse physicochimiques sont également réalisables in situ, car elles ont bénéficié de la mise au point d'appareils portables ou transportables. Bien que très utiles,

elles ne s'appliquent en général que sur de petites surfaces et, bien que non invasives, elles nécessitent un positionnement de l'appareil très proche de la paroi, ce qui peut se révéler contraignant dans une grotte ornée [11–13]. Les mesures de la couleur non invasives et à distance doivent permettre d'établir des comparaisons entre les matières colorantes utilisées par les paléolithiques et des matières colorantes de référence (de composition minéralogique connue). Elles doivent aussi permettre de comparer entre elles les matières colorantes utilisées dans différentes entités graphiques, panneaux ornés et secteurs de la grotte et selon diverses techniques d'application. Des processus de recouvrement et d'altération (développement de calcite, apport de matériaux fins tels des oxydes de fer par des coulures sur la paroi, dépôt de poussières sur les replats de paroi, enlèvement de matière par ruissellement d'eau sur des tracés peints...) peuvent également être à l'origine de modifications de la couleur des surfaces peintes. De façon générale, nous nous trouvons en face d'un système naturel complexe, dans lequel les variations observées peuvent avoir des origines multiples liées à la variabilité des matériaux (roche, matières colorantes...), mais aussi des conditions microclimatiques, sans oublier les impacts, à différentes échelles, des divers êtres vivants susceptibles d'avoir laissé leurs traces dans la grotte (des micro-organismes aux ours et aux humains). L'impact que peuvent avoir les variations de l'état hydrique des surfaces ornées sur leur comportement optique est non négligeable : ainsi, une variation de la teneur en eau des pigments provoque un changement de couleur [14].

Le présent article s'attachera à montrer l'intérêt des mesures spectroradiométriques dans le domaine du visible réalisées en grotte ornée. Notre but n'a pas été de contribuer à la détermination formelle de la composition minéralogique des matières colorantes, mais plutôt d'établir des comparaisons entre entités graphiques en cherchant à identifier les causes probables des variations observées dans les signatures optiques mesurées. L'objectif est, à terme, de pouvoir modéliser leur impact sur l'œuvre.

Les conditions de mesure dans un site souterrain orné classé aux titres des monuments historiques et du patrimoine mondial de l'UNESCO, tel que Chauvet, sont très contraignantes. L'accès aux zones ornées est fortement contingenté :

- le site de Chauvet n'est accessible que sur une courte période de l'année, en raison des contraintes induites par une concentration en radon non négligeable et par la présence très fréquente d'un taux élevé de CO₂ dans l'air de la grotte ;
- la très grande richesse archéologique de la grotte, en particulier de ses sols, implique, pour d'évidentes raisons de conservation, de ne circuler que sur un cheminement bien défini, matérialisé par un ensemble de passerelles implantées à distance variable des champs ornés.

Dans ces conditions, réaliser des mesures de couleur nécessite de recourir à des systèmes d'acquisition portatifs et utilisables même à plusieurs mètres de distance des œuvres pariétales et, dans tous les cas, sans contact. Ceci implique également de recourir à des systèmes d'éclairage compatibles avec une mesure correcte de la réflectance des surfaces et capables de produire une lumière uniforme sur des plans plus ou moins lointains.

Au-delà des problèmes d'accessibilité, le choix des parois mesurées est dicté à la fois par l'état des études en cours sur les œuvres et les questions posées (organisation, chronologie relative, techniques picturales, matériaux utilisés...). Il est, en outre, nécessaire d'observer, de visu et à partir de levés photographiques détaillés, les caractéristiques des zones mesurées à l'échelle du millimètre, voire de la centaine de microns. On enregistre ainsi des informations sur l'état de l'agrégat de matières granulaires colorées au moment de la mesure. Ce dernier, qui adhère à une surface de calcaire ou de calcite de texture et de couleur variable, peut être plus ou moins couvrant, humide... La mesure de couleur intervient pour conforter des hypothèses et permettre des comparaisons entre tracés, entités graphiques ou zones distantes pour lesquelles le support rocheux peut présenter des colorations et des états de surface différents. Ces situations sont difficilement interprétables par la seule observation. En effet, l'évaluation visuelle est tributaire, non seulement du type d'éclairage utilisé, mais également des caractéristiques couleur de l'environnement immédiat. De plus, notre mémoire des couleurs ne nous permet pas de comparer de façon rigoureuse deux éléments de couleurs proches qui ne seraient pas en intervisibilité.

2. Le protocole expérimental : acquisition des données sur le terrain

L'acquisition sur le terrain de spectres de luminance énergétique (radiance en anglais) s'est faite à l'aide d'un spectroradiomètre Konica Minolta de type CS2000 capable de travailler à très faible luminance (données constructeur : luminance minimale 0,003 cd/m² pour un angle de mesure de 1° avec une précision de ±2%) et avec des angles de mesure commutables de 1°, 0,2° et 0,1° permettant d'adapter le diamètre des zones de mesure en fonction de la distance et également de la taille de la surface étudiée. Le domaine spectral couvert par le CS2000 va de 380 à 780 nanomètres, avec un intervalle de sortie des données de 1 nm. La Fig. 1 ci-dessous illustre les conditions de mesure sur le terrain.

L'éclairage des surfaces à mesurer et le positionnement du capteur ont été choisis dans tous les cas selon une incidence minimisant autant que possible les réflexions spéculaires dans la direction du spectroradiomètre (détection principalement de la composante diffuse du signal lumineux réfléchi par la surface colorée visée). Ainsi, en présence de films de calcite brillants, la géométrie adoptée est au plus près d'une géométrie (45° 0°). Le spectroradiomètre est placé de façon à ce que l'axe de visée soit normal à la surface mesurée. Les éclairages utilisés éclairent la surface à mesurer selon une incidence de 45°. Ce sont des sources lumineuses à spectre continu de faible puissance (température de couleur de 4700 K). Elles émettent un faisceau conique de luminance uniforme suffisamment ouvert (30°) pour éclairer correctement les surfaces mesurées, même à distance importante.



Fig. 1. Situation de terrain. Prise de mesure sur le panneau de la Panthère (salle des Bauges).

Fig. 1. Situation in the field. Measurement on the Panther Panel (chamber of the Bear Hollows).

La mesure d'une luminance énergétique spectrale exprimée en watt par mètre carré et par stéradian ($W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$) permet de caractériser le comportement optique de surfaces considérées comme sources de lumière secondaire indépendamment de la distance au capteur [15]. Si l'on fait l'hypothèse que les surfaces mesurées peuvent être considérées comme des diffuseurs lambertiens (surfaces mates), il y aura également indépendance vis-à-vis de l'angle de visée de l'appareil de mesure.

Les mesures de luminance énergétique, réalisées sur le terrain selon une géométrie d'éclairage repérée, nous ont permis de calculer le coefficient de réflexion spectral (ou réflectance) des surfaces mesurées, défini comme le rapport, à chaque longueur d'onde, de ce qu'elle renvoie à ce que renverrait un diffuseur idéal. Nous avons eu recours à la colorimétrie pour obtenir une expression trichromatique des couleurs mesurées. L'approche colorimétrique fournit une représentation des couleurs basée sur l'utilisation conjointe du principe de synthèse additive (notions de mélanges de primaires et de métamérisme) et des lois énoncées par Grassmann, stipulant, entre autres, que les sensations colorées se comportent linéairement [16–18]. Nous avons évalué les composantes trichromatiques X , Y , Z de chaque surface mesurée sur le terrain selon les modalités suivantes :

- nous avons travaillé dans le système CIE XYZ 1931 de la CIE (Commission internationale de l'éclairage) – observateur 2° ;
- de façon à pouvoir nous ramener à des conditions d'observation standard des surfaces colorées, nous avons utilisé l'illuminant standard de type D65 dans tous nos calculs.

Dans la gamme de teneur en eau dans laquelle se situent les matières colorantes dans la grotte, les variations d'intensité lumineuse réfléchie peuvent, dans certains cas, se révéler notables (en fonction des conditions locales de percolation). On a pu cependant vérifier que, dans l'intervalle de variation de teneur en eau des surfaces ornées, le spectre de réflectance mesuré sur ces surfaces conserve une forme à peu près constante (indépendance vis-à-vis du taux d'humidité). Nous avons donc choisi d'utiliser le diagramme de chromaticité pour exprimer la part chromatique des spectres de réflectance, indépendamment des variations de luminance.

3. Résultats obtenus et discussion

Des premiers essais réalisés dans la grotte Chauvet nous ont permis de parachever notre mode opératoire. Nous avons acquis un ensemble de mesures sur des zones bien identifiées ayant également fait l'objet d'un levé photographique permettant de se référer à tout moment à l'état de surface effectif des zones de mesure. Ce travail de repérage a été complété par un échange avec les divers spécialistes, par exemple avec nos collègues archéologues spécialistes de l'art pariétal, afin de nous appuyer sur leur lecture des modes d'exécution des œuvres, et géoarchéologues, pour l'identification de l'état des surfaces étudiées. Nous avons ainsi pu associer à chaque mesure des éléments d'information quant aux modalités d'interaction lumière-matière. Nous avons défini des situations de référence qui font l'objet des paragraphes suivants.

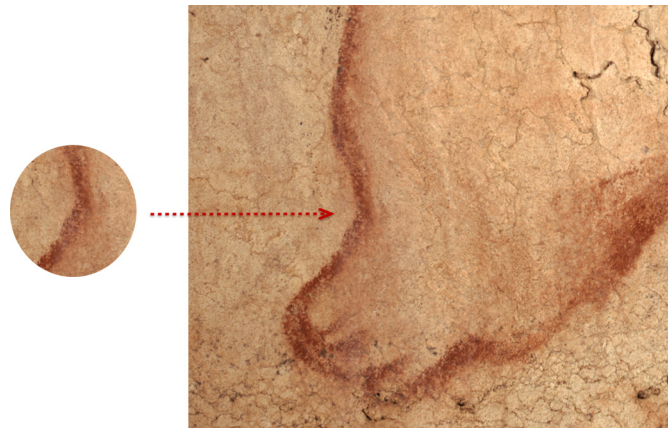


Fig. 2. Détail du tracé de l'Ours rouge (galerie du Cactus).

Fig. 2. Detail of the drawing of the red bear (Cactus Gallery).

3.1. Implications d'un enlèvement de matière entraînant une variation du caractère couvrant des tracés

Les matières colorantes employées sont des mélanges minéraux pouvant être considérés comme opaques lorsqu'ils sont déposés sous forme d'un film continu. Les tracés observables actuellement sur les panneaux ornés ne se présentent pas tous comme des recouvrements continus : les méthodes d'application ainsi que l'évolution au cours du temps des parois peuvent être les causes des discontinuités observées. La Fig. 2 illustre l'état dans lequel se trouvent les tracés : on constate que, même pour les traits bien marqués, le dépôt de matière rouge constituant le tracé n'est pas continu. Lorsqu'elle est présente, la matière colorante est sous forme d'amas très opaques et également en recouvrements très fins probablement constitués de particules de très petites tailles piégées sur la surface rocheuse plus ou moins rugueuse.

Des mesures ont été réalisées en différents points du contour de l'Ours rouge de la galerie du Cactus. La distance à la paroi (2,25 m environ) nous a permis de réaliser la mesure de zones de petite taille entièrement inscrites dans les tracés. Les zones choisies correspondent à des degrés divers de recouvrement du support calcaire par la matière colorante. Ainsi, à taille de surface de mesure similaire (disque d'environ 6 mm de diamètre), la matière colorante et son support calcaire contribuent en pourcentages variables à la lumière réfléchi qui est analysée par le capteur du spectroradiomètre. On mesure un ensemble de rayons lumineux réfléchis par l'un ou l'autre des deux constituants de la surface (considérés ici comme sources secondaires de lumière). Les résultats sont exprimés sous forme de données colorimétriques dans le système CIE xyY ($x = X/(X + Y + Z)$; $y = Y/(X + Y + Z)$; observateur standard 2° CIE-1931). Ce système permet de traiter la chromaticité donnée par les valeurs x et y indépendamment de la luminance donnée par la valeur Y . Le diagramme présenté sur la Fig. 3b est une vue partielle du diagramme de chromaticité (représentation en médaillon). Pour chaque point, on a identifié la zone de mesure sur l'image de paroi de la Fig. 3a et reporté sur le diagramme les valeurs obtenues à partir des mesures faites in situ. Les points de mesure ont été sélectionnés de façon à représenter l'ensemble des états observables pour la matière colorante rouge de cette zone. L'alignement des points sur la figure montre bien cet effet d'intégration de deux types de rayons lumineux émis par différentes parties de la surface mesurée, l'un issu des parties calcaires non couvertes et l'autre des parties couvertes par les matières colorantes opaques. On constate que le point 2 s'écarte un peu de l'alignement. Une observation rapprochée de l'état du trait montre que, dans cette zone, il reste quelques traces de matières colorantes noires (voir détail sur Fig. 3a) qui ont pu contribuer au signal mesuré en spectroradiométrie et entraîner ce décalage. Sont exclus de cette représentation les mesures réalisées sur les trois tracés digités situés cote à cote juste en dessous de la ligne de dos haut droit de l'image de la Fig. 3a); ils sont visiblement de couleur différente et ce, probablement en raison d'une différence dans la composition de la matière colorée employée.

Dans notre analyse des couleurs de la grotte Chauvet, un matériau colorant appliqué sur paroi ne se représente pas par une seule valeur dans le diagramme de chromaticité, mais par un ensemble de valeurs alignées assimilable à un segment. La position de chaque point mesuré sur le segment est un indicateur de l'état de recouvrement du support par la matière colorante à l'emplacement de la mesure.

Ainsi, pour un ensemble de tracés de même type situés sur un même support rocheux (de chromaticité à peu près constante), on peut faire l'hypothèse que chaque alignement observé constitue la signature d'une matière colorante donnée. Il est ainsi possible d'évaluer le degré de similarité entre matériaux colorés employés dans des tracés différents, même lorsqu'ils présentent des états de conservation variables (plus ou moins effacés).

Nous avons ainsi pu établir que, dans le panneau de la Panthère, deux des entités graphiques représentant des ours, l'ours tacheté et l'ours acéphale, bien que toutes deux de couleur rouge, ont été très probablement tracées avec des matières colorantes légèrement différentes sur des surfaces calcaires chromatiquement proches. La Fig. 4 ci-dessous présente les valeurs (x, y) obtenues à partir de différentes mesures réalisées sur ces entités graphiques : Pour l'ours tacheté, on a distingué les mesures faites sur son contour des mesures faites sur les taches visibles à l'intérieur du tracé. Sont éga-

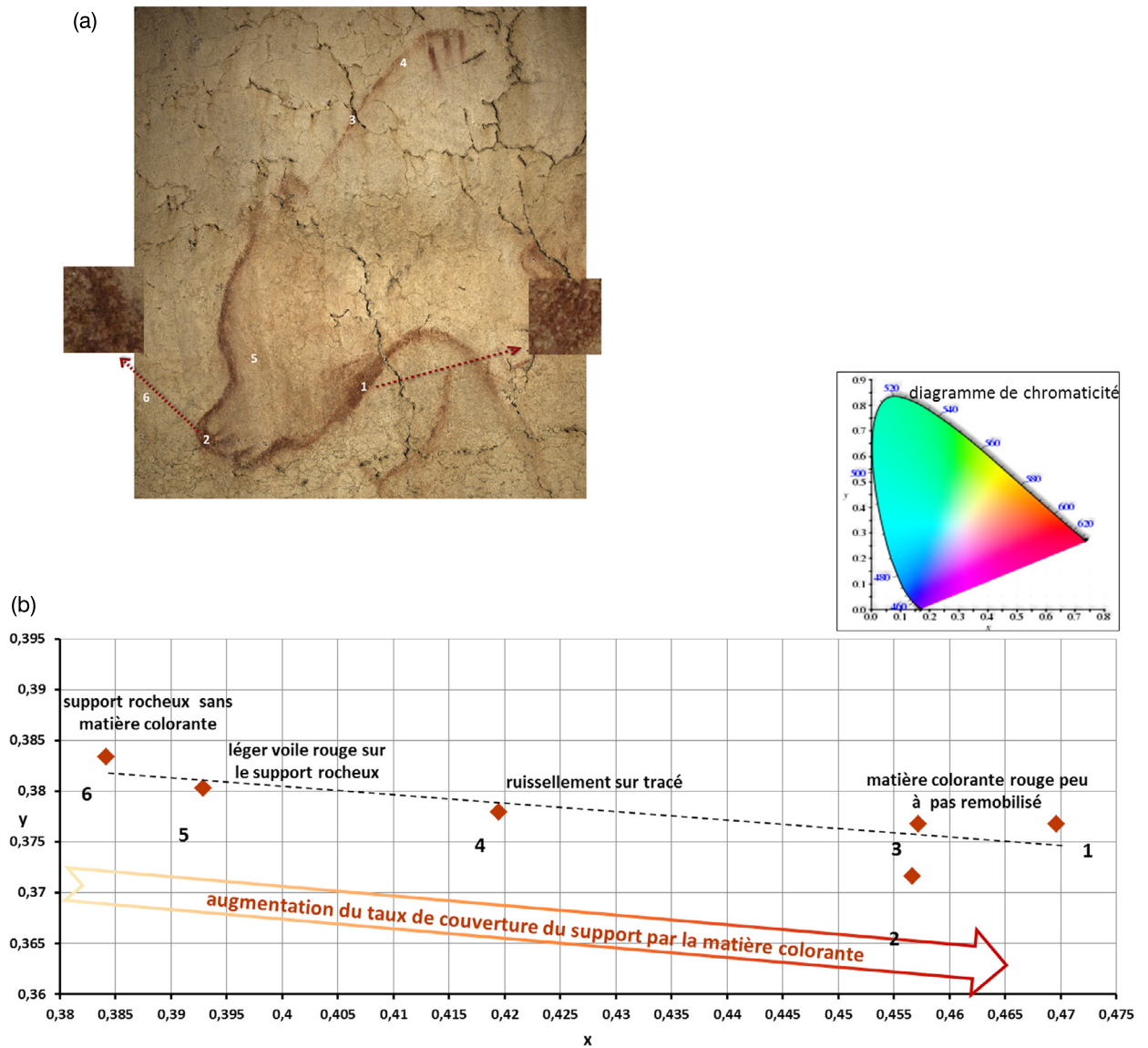


Fig. 3. Analyse de la couleur de différentes zones rouges dans et à proximité du tracé de l'Ours rouge (galerie du Cactus). (a) Identification des zones mesurées. (b) Valeurs de chromaticité (x, y) évaluées (diagramme de chromaticité complet en cartouche).

Fig. 3. Analysis of the colour of different red zones in and close to the drawing of the red bear (Cactus Gallery). (a) Identification of the measured zones. (b) Evaluated chromaticity values (x, y) (complete inset chromaticity diagram).

lement reportées les mesures faites sur le calcaire du panneau de la Panthère hors traces rouges. Deux mesures faites sur un fragment de plancher stalagmitique ayant induré d'anciens remplissages argileux rouges (galerie du Cactus). Les valeurs (x, y) obtenues pour les contours des deux entités graphiques forment deux ensembles distincts. Elles s'alignent selon deux segments de pentes différentes. Comme on pouvait s'y attendre, les deux segments convergent vers les valeurs mesurées sur le calcaire nu constituant le pôle calcaire non coloré par apport de matière. Les taches occupant l'intérieur de l'ours tacheté ont une chromaticité plus variable. Alors que certaines montrent des similarités chromatiques avec le contour de ce dernier, d'autres se rapprochent du contour de l'ours acéphale. C'est en particulier le cas des taches mesurées les plus denses (valeurs de x les plus grandes), pour lesquelles on observe clairement une similarité avec l'ours acéphale.

Nous avons également pu réaliser deux mesures spectroradiométriques sur le fragment tombé au sol d'un plancher stalagmitique ayant induré d'anciens remplissages argileux rougeâtres; ce fragment est en position dressée dans la galerie du Cactus. Les valeurs (x, y) obtenues ont été reportées sur la Fig. 4. On observe un alignement de ces deux points avec les points représentatifs du contour de l'ours acéphale.

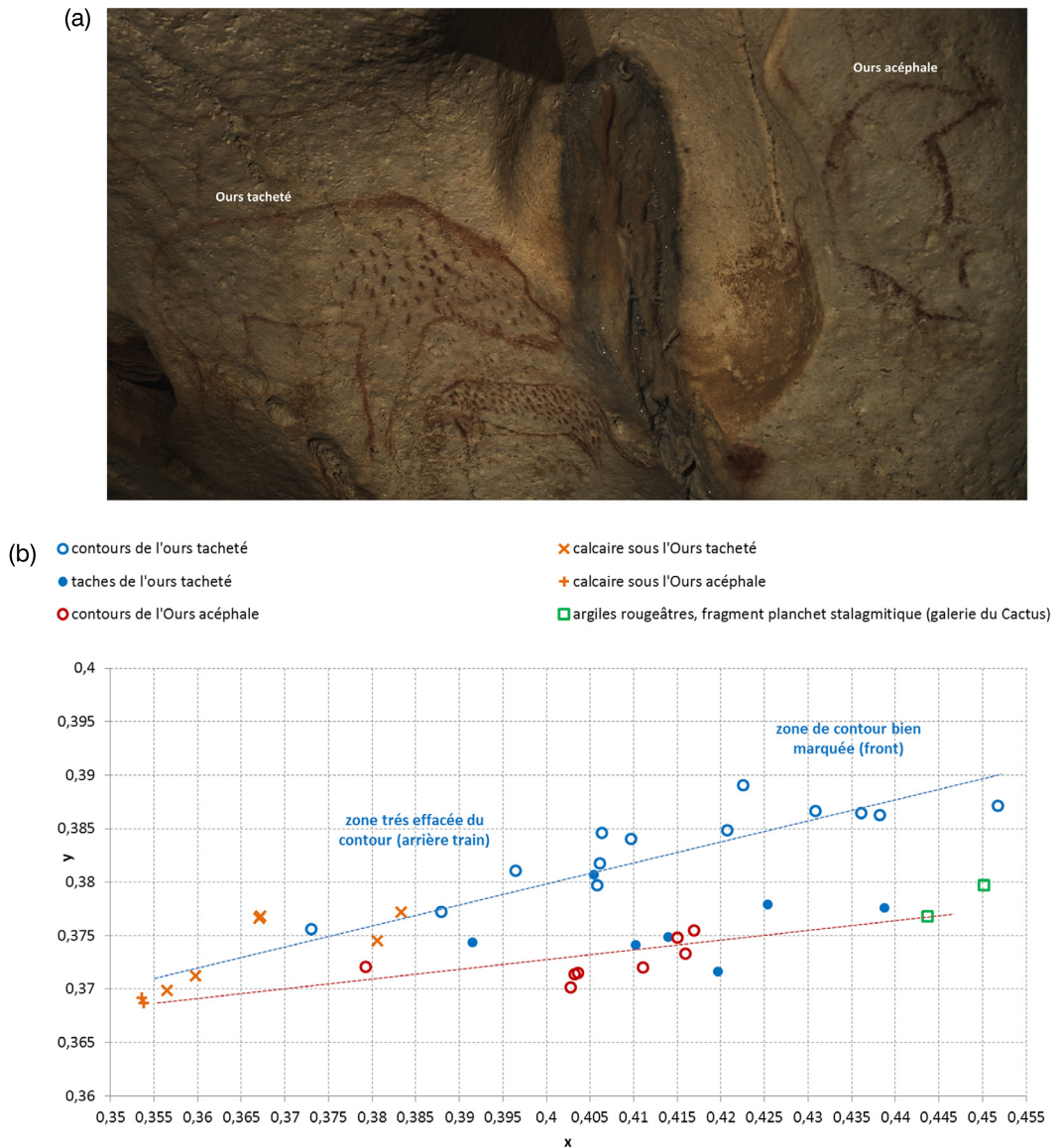


Fig. 4. Comparaison entre deux entités graphiques du panneau de la Panthère : l'ours acéphale situé à droite du panneau et l'ours tacheté situé au centre du panneau, à peu près à la même hauteur par rapport au sol. (a) Vue partielle du panneau de la Panthère. (b) Valeurs de chromaticité (x , y) évaluées sur les deux ours.

Fig. 4. Comparison of two graphic entities on the Panel of the Panther: the headless bear located on the right of the panel and the mottled bear located in the centre of panel, at about the same height in relation to the floor. (a) Partial view of the Panel of the Panther. (b) Chromaticity values (x , y) evaluated on the two bears.

3.2. Implication d'un apport de matière divisée – Couleur

Les coulures sont des phénomènes fréquents en grotte : elles viennent impacter les propriétés optiques des parois rocheuses et, en particulier, celles des tracés antérieurs au phénomène. Elles correspondent à de minces recouvrements de matériaux fins (argiles, oxydes de fer...) déposés sur la surface par écoulements d'eau actuellement actifs ou non. Il convient donc de les prendre en compte pour l'interprétation des mesures. Cette transformation ne se manifeste pas uniquement par un simple défaut de répartition de la matière colorée : de la matière colorante constitutive des tracés a pu être entraînée par le ruissellement après son application ; un nouveau constituant de propriétés optiques différentes apporté par l'eau de ruissellement peut venir se déposer sur la surface rocheuse ornée ou non. Ce phénomène de dépôt peut être considéré comme un envahissement progressif de la surface de mesure par un élément au comportement optique différent à la fois de celui du support rocheux et de celui de la matière colorante du tracé.

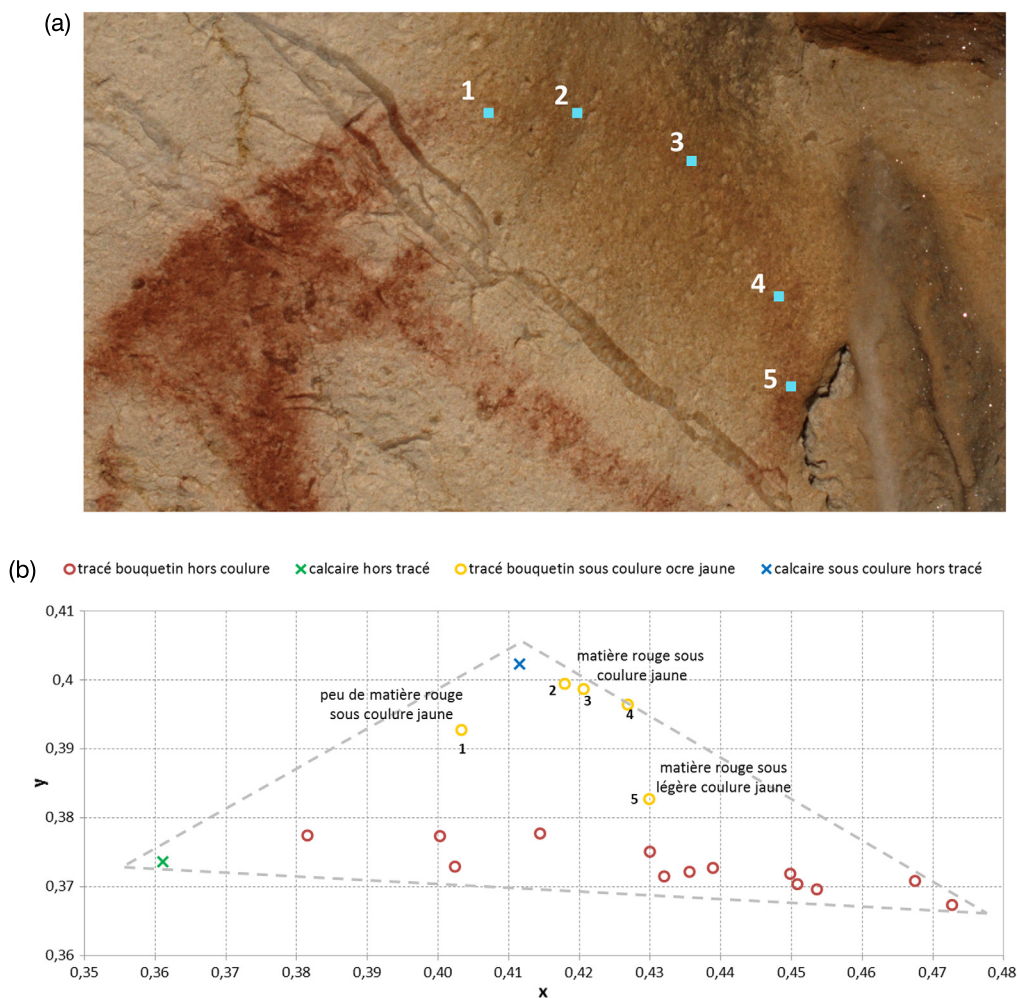


Fig. 5. Effet des coulures sur les tracés. (a) Points mesurés sur la corne du Bouquetin occupant la partie gauche du panneau de la Panthère. Cette zone de tracé est plus ou moins impactée par une coulure qui a eu pour effet d'ajouter une nouvelle matière colorante jaune (argiles, oxydes de fer). (b) Report sur le diagramme de chromaticité des valeurs x et y évaluées à partir des mesures de réflectance réalisées.

Fig. 5. Effect of flows on the drawings. (a) Points measured on the horn of the ibex occupying the left part of the Panel of the Panther. This area of the drawing is more or less impacted by a flow that has had the effect of adding a new yellow colouring material (clays, iron oxides). (b) Transfer to the chromaticity diagram of the x and y values evaluated from the reflectance measurements taken.

La Fig. 5 ci-dessous se rapporte au panneau de la Panthère. Des points de mesure ont été pris sur la corne du bouquetin situé sur la partie gauche du panneau. Cette zone de tracé rouge est plus ou moins impactée par une coulure qui a eu pour effet d'ajouter une nouvelle matière colorante jaune (argiles, oxydes de fer).

On constate que les points 1 à 5 mesurés sur la corne s'écartent de l'alignement correspondant aux tracés non altérés du bouquetin. On se retrouve dans un système à trois constituants : lumière réfléchi par le calcaire nu, par la matière colorante rouge et par le recouvrement d'argiles et/ou d'oxydes de fer jaune (voir le triangle gris sur la figure). La position des 5 points mesurés par rapport aux trois pôles ainsi définis est en accord avec les observations fines faites sur le terrain quant à l'état de couverture du support rocheux par d'une part la matière colorante rouge et d'autre part la coulure jaune : le point 1, correspondant à une zone de mesure pour laquelle le tracé rouge initial est très effacé, se retrouve bien entre le calcaire seul et le calcaire + coulure. Les points 2, 3, 4 et 5 se répartissent, eux, entre le pôle calcaire + coulure et le pôle matière colorante rouge.

3.3. Implication de l'existence d'un recouvrement calcique

Les cas traités précédemment ne représentent qu'une partie des situations rencontrées. Ils ne prennent en compte que des phénomènes de transformation des tracés sans modification physicochimique liée à l'altération des parois. L'un des phénomènes couramment rencontrés en grotte est la formation de calcite ultérieurement à la réalisation des œuvres pariétales [19]. Cette calcite néoformée peut venir recouvrir la matière colorante d'un film plus ou moins continu et plus ou moins

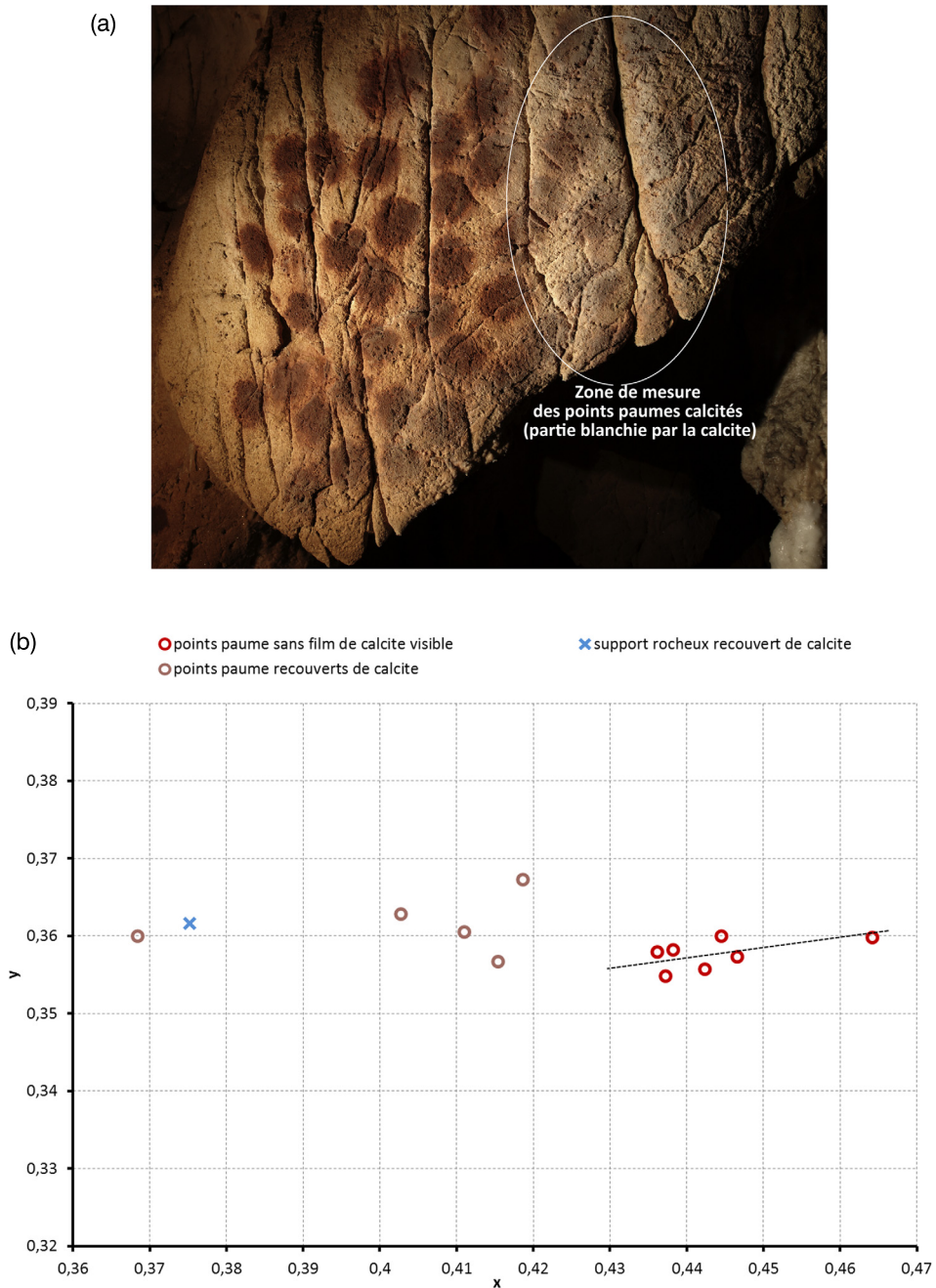


Fig. 6. Le panneau de la Main positive (salle Brunel). Report sur le diagramme de chromaticité des valeurs x et y évaluées à partir des mesures de réflectance réalisées sur différents points paume recouverts (partie droite) ou non (partie gauche).

Fig. 6. The Panel of Positive Hand Prints (Brunel Chamber). Transfer to the chromaticity diagram of the x and y values evaluated from the reflectance measurements taken from different hand dots covered (right part) or not (left part).

épais allant jusqu'à masquer complètement les tracés. Comme dans le cas des coulures, cette transformation ne se manifeste pas par un simple défaut de répartition de la matière colorée, dans la mesure où un nouveau constituant aux propriétés optiques différentes apparaît. Ce dernier peut en effet constituer des recouvrements plus ou moins opaques.

La Fig. 6 ci-dessous concerne le panneau de la Main positive. Sur la Fig. 6a, on peut observer un blanchissement des surfaces très probablement imputable au développement d'un film de calcite. Une observation rapprochée permet d'observer différents états de recouvrement par la calcite des matières colorantes rouges appliquées par pression de la paume (technique des points paume). Dans l'attente d'analyses plus poussées, nous ne sommes pour l'instant pas en mesure de préciser les caractéristiques de ce voile de calcite. Au cours des mesures, nous nous sommes trouvés confrontés à la situation suivante :

épaisseur variable du film de calcite, forme cristalline non connue, taille des cristallites et nature d'éventuelles impuretés non connues... Les mesures obtenues montrent que la présence de ce voile de calcite entraîne un décalage visible par rapport à l'alignement des points de mesure réalisés sur la surface peu à pas recouverte. L'analyse de la chromaticité sur différents tracés recouverts par des épaisseurs de calcite plus ou moins importantes ne permet pas de statuer quant à la similarité entre matières colorantes. Il n'est plus question ici d'intégration de différentes sources lumineuses secondaires sur la surface mesurée, mais de l'apparition d'un constituant nouveau, plus ou moins transparent et continu.

La matière colorée du panneau de la Main positive a très probablement eu une évolution complexe d'où ne sont pas à exclure des phénomènes autres que la calcification. Des expériences de calcification de surfaces nous ont permis d'évaluer l'impact de la formation de calcite sur une surface colorée fraîche hors tout autre phénomène d'altération. Nous avons placé durant un an des échantillons de calcaire recouverts d'une couche opaque de pigment rouge (hématite) dans une zone du gouffre de Proumeyssac (Dordogne, France) afin d'obtenir une calcification rapide de la surface. Nous avons constaté que cette calcification s'était accompagnée d'une remobilisation partielle des matières colorantes : il y a eu très probablement un léger lessivage (cf. écoulements d'eau auxquels les échantillons étaient soumis). Des mesures de réflectance ont été réalisées en laboratoire sur trois échantillons témoins, avant et après calcification. Conjointement, nous avons sélectionné des mesures de terrain faites sur des zones bien identifiées du panneau de la Main positive comme présentant ou non un recouvrement calcique. L'objectif était de déterminer l'impact du film de calcite sur le comportement optique des surfaces. Pour chacune des surfaces étudiées nous avons calculé l'écart de réflectance ER à un état non calcifié :

$$ER = \frac{R_{\text{cal}}(\lambda) - R_{\text{non cal}}(\lambda)}{R_{\text{non cal}}(\lambda)}$$

(avec $R_{\text{cal}}(\lambda)$ le facteur de réflectance de la surface calcifiée et $R_{\text{non cal}}(\lambda)$ celui de la surface de référence non calcifiée) entre 380 et 780 nm.

Dans le cas des mesures sur échantillons placés à Proumeyssac, l'état de référence non calcifié correspond à la mesure de la réflectance avant exposition dans le gouffre. Dans le cas des mesures réalisées sur le panneau de la Main positive à la grotte Chauvet, l'état de référence n'étant plus accessible, nous avons choisi pour l'ensemble des surfaces un spectre de réflectance $R_{\text{non cal}}(\lambda)$ mesuré sur une zone sans calcite apparente (petite anfractuosité non calcifiée, dans laquelle de la matière colorante rouge était piégée, cf. Fig. 7b).

La Fig. 7 ci-dessous montre les courbes d'écart de réflectance obtenues.

Les courbes d'écart obtenues sur les deux types de surface (Chauvet et Proumeyssac) présentent des similitudes :

- toutes les courbes présentent un maximum autour de 530 nm ;
- elles présentent un changement de pente net autour de 610 nm.

En l'absence d'analyse, nous ne pouvons pas affirmer que les voiles de calcite de Chauvet sont identiques en composition aux voiles produits sur les échantillons de Proumeyssac. Les points communs observés entre les deux séries d'échantillons sur la Fig. 7c laissent entrevoir la possibilité d'établir un lien entre mesure optique et épaisseur d'un film de calcite imparfaitement défini en termes chimiques et minéralogiques.

Le spectroradiomètre utilisé permet de réaliser des mesures sur des signaux lumineux très faibles. Forts de ces premiers résultats laissant penser qu'il était possible d'identifier la signature d'un voile de calcite plus ou moins épais sur une matière colorante donnée, nous avons réalisé des essais sur deux matières utilisées pour l'art pariétal de couleurs proches, très sombres : le charbon et l'oxyde de manganèse. Nous voulions savoir s'il était possible de différencier les deux signatures optiques après apparition d'un voile de calcite. Ainsi, la Fig. 8 ci-dessous porte sur ces deux matières. Les mesures de réflectance ont été faites sur trois échantillons de la série placée dans le gouffre de Proumeyssac (cf. Fig. 7b).

Comme on peut le constater sur la Fig. 8a, les tracés au manganèse et au charbon n'ont pas le même comportement en réflectance avant calcification. La courbe des écarts de réflectance ER obtenue après calcification des tracés diffère elle aussi selon la nature de la matière considérée. On constate sur la Fig. 8b que :

- le voile de calcite éclaircit moins le tracé au manganèse (initialement plus clair) que le tracé au charbon de bois ;
- la présence du voile de calcite n'efface pas les différences entre les deux noirs : ainsi, le tracé au charbon semble chromatiquement moins affecté. Les formes des deux courbes se différencient à partir de 510 nm : au-delà, la courbe des écarts en réflectance du charbon est beaucoup plus plate que dans le cas du manganèse, pour lequel un maximum est identifiable entre 460 et 480 nm.

Les essais réalisés permettent d'envisager la possibilité d'utiliser les mesures de réflectance faites sur le terrain pour des surfaces ornées plus ou moins calcifiées et d'émettre des hypothèses quant à la nature de matières colorantes visibles sous voile de calcite.

4. Conclusions

Le travail exploratoire présenté dans cet article avait pour but d'analyser l'intérêt des mesures spectroradiométriques dans le cadre particulier de grottes ornées. Il nous a permis de vérifier des hypothèses quant au contenu informationnel des

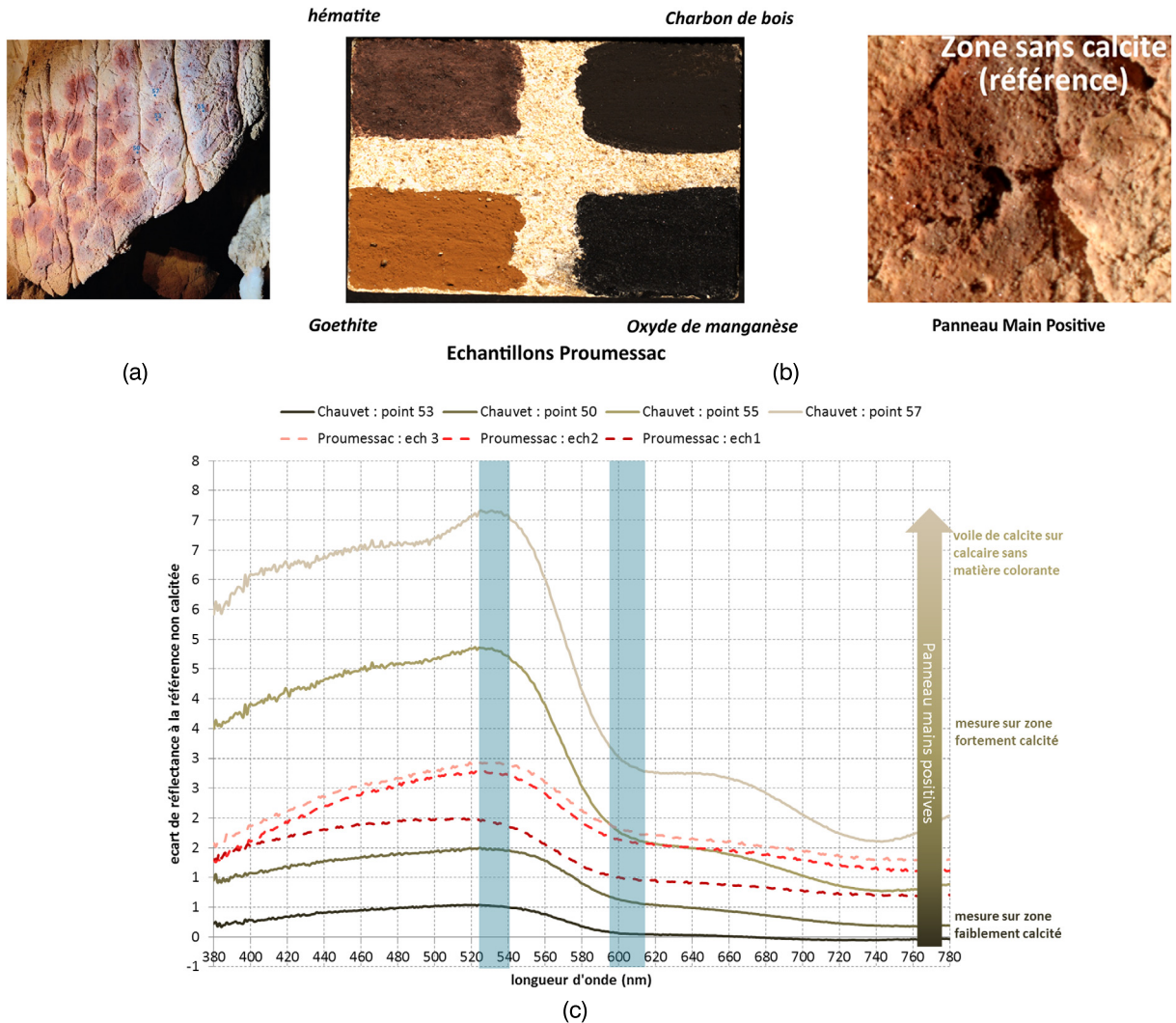


Fig. 7. Comparaison entre différents états calcifiés pour des tracés paléolithiques et des échantillons de référence. (a) Repérage des points mesurés sur le panneau de la Main positive; (b) échantillons de référence choisis comme état initial; (c) diagramme des écarts de réflectance (ER).

Fig. 7. Comparison of different states of calcitation on Palaeolithic drawings and reference samples. (a) Location of the points measured on the Panel of Positive Hand Prints; (b) reference samples chosen as an initial state; (c) diagram of the reflectance differences.

mesures dans le spectre de la lumière visible effectivement réalisables dans les conditions d'une grotte ornée paléolithique, à savoir la grotte Chauvet.

L'analyse in situ de la couleur des tracés paléolithiques ne peut pas prétendre se substituer aux techniques d'identification chimiques et minéralogiques appliquées aux matières colorantes prélevées ou en place. Son principal intérêt réside dans sa capacité à détecter des changements d'état et de composition, mêmes minimes.

Dans ces travaux, nous avons cherché à expliquer les variations de couleur mises en évidence sur différents tracés ou zones de tracé au regard des informations dont nous disposons quant à l'état des matières colorantes et du support rocheux que nous avons choisi de mesurer. Nous avons ainsi pu valider l'hypothèse d'additivité des contributions lumineuses des différents matériaux présents sur la paroi dans l'interprétation des résultats de mesure obtenus sur des surfaces présentant des enlèvements de matière colorante et des apports de matière argileuse.

Nous avons également analysé le cas où la présence d'un voile de calcite rend cette hypothèse d'additivité non plausible (intercalation d'un milieu d'indice optique différent de celui du tracé entre la couche pigmentaire et l'air ambiant). En nous référant aux problématiques d'identification de la matière colorante posées par les archéologues spécialistes de l'art pariétal, nous avons montré qu'une analyse comparative des spectres de réflectance pouvait renseigner sur les variations de composition de la matière colorante sous-jacente au voile de calcite : cette identification n'est bien sûr possible que dans le cas où le voile de calcite n'occulte que partiellement la couleur sous-jacente.

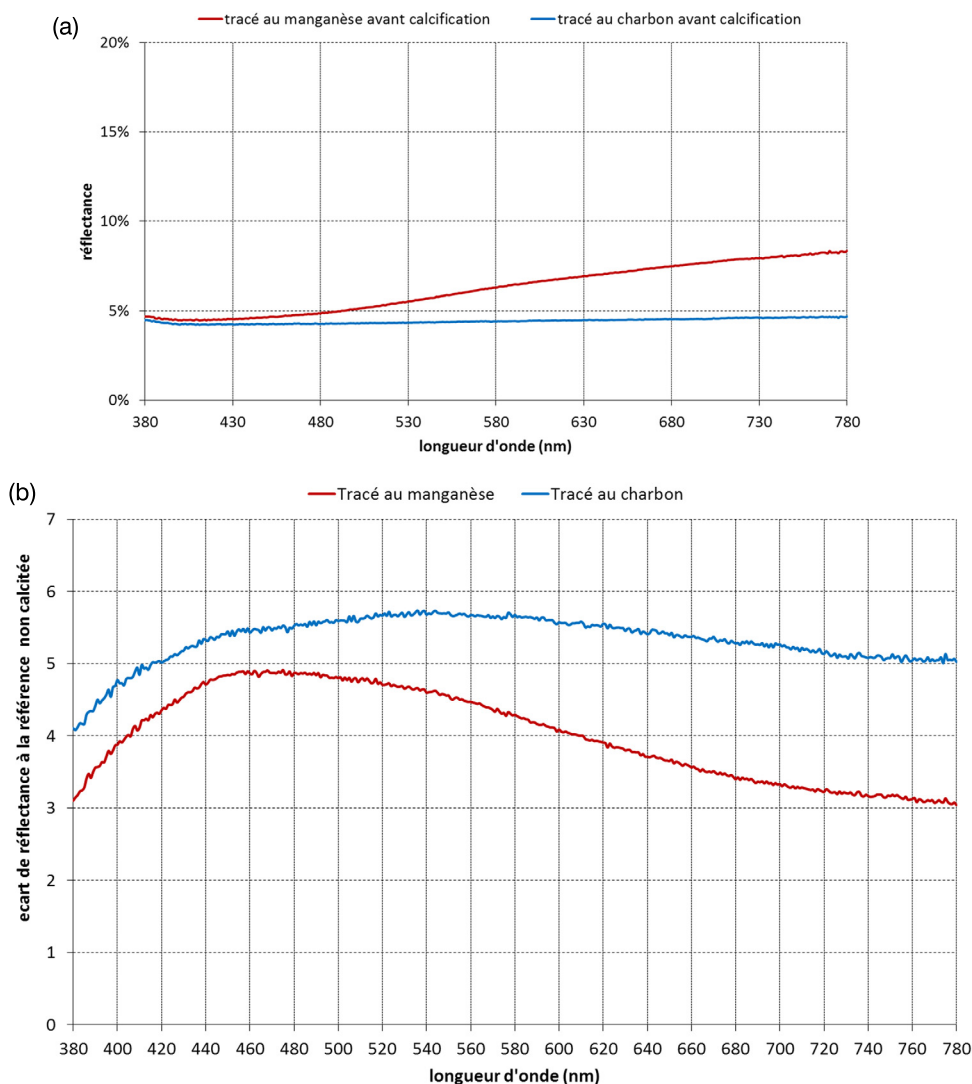


Fig. 8. Analyse de l'effet de la formation d'un voile de calcite sur le comportement optique de deux matières très sombres différentes : un oxyde de manganèse et un charbon. a) Spectres de réflectance des matériaux avant calcification ; b) écart.

Fig. 8. Analysis of the effect of the formation of a veil of calcite on the optical behaviour of two different very dark materials; a manganese oxide and a charcoal. a) Reflectance spectra of materials before calcification; b) difference.

Nous sommes maintenant en mesure de choisir selon des critères objectifs les zones à mesurer en fonction des problématiques diverses abordées par l'équipe de recherche, notamment les archéologues spécialistes de l'art pariétal, en ce qui concerne les entités graphiques, et les géoarchéologues, pour les phénomènes liés aux supports rocheux, aux phénomènes de recouvrement et d'altération.

Notre parti pris dans l'interprétation des mesures a été de conserver en permanence un lien avec le signal physique effectivement capturé, ne serait-ce que pour nous prémunir face aux inévitables aléas de la mesure in situ. Nous avons ainsi utilisé les outils de la colorimétrie sans les homogénéisations perceptives en termes d'écarts de couleurs qui caractérisent l'espace CIE $L^*a^*b^*$. Ce type de représentation de la couleur est bien sûr fort utile dans la perceptive d'une lecture visuelle des œuvres, mais nous avons voulu, dans un premier temps, nous concentrer sur l'interprétation de l'interaction lumière-matière, sans que l'observateur humain soit notre priorité. Notons cependant que les données rassemblées sont susceptibles d'alimenter une réflexion sur la perception des différents éléments constitutifs des œuvres pariétales de Chauvet. Ainsi, les modèles numériques de terrain devenant des enjeux tant dans le domaine de la médiation que dans le domaine de la recherche archéologique, il est intéressant de disposer d'informations quant au comportement optique des parois. Contextualiser les données couleur mesurées à l'aide de ce type de modèle présente un intérêt à la fois dans le domaine scientifique et comme outil de médiation culturelle.

Ces premiers résultats nous permettent d'envisager l'élaboration de modèles prédictifs applicables sur le terrain et offrant, en particulier, la possibilité de renseigner sur le degré et les effets de divers types de recouvrements et d'altérations

pour inférer un état coloré initial qui nous était inaccessible jusqu'à présent. Il serait intéressant d'adapter le modèle de Melamed à l'étude des mélanges de matières granulaires colorées appliqués de diverses façons sur parois [20,21].

De plus, ce type de mesure doit pouvoir aider au suivi des tracés pariétaux et permettre d'évaluer d'éventuelles modifications irréversibles (hors changements de couleur liés aux variations de la teneur en eau des matières colorantes sur la paroi) dues aux effets plus ou moins marqués du vieillissement. La base de données des mesures colorimétriques et spectroradiométriques acquises dans la grotte Chauvet pourra ainsi servir pour la conservation préventive de la grotte, du fait qu'elle documente des états visibles, datés, de surfaces du champ orné précisément localisées. Ces surfaces pourront ainsi faire l'objet de nouvelles mesures susceptibles de mettre en évidence toute évolution de leur aspect visible.

Remerciements

Ce travail a été réalisé dans le cadre de l'équipe de recherche de la grotte Chauvet dirigée par J.-M. Geneste puis C. Fritz. Nous tenons à remercier tous les membres de l'équipe qui, chacun dans leur domaine, nous ont beaucoup appris sur ce site d'exception et sans qui ce travail n'aurait pu être réalisé, sans oublier l'équipe de conservation, qui nous a permis de travailler dans des conditions techniques adéquates. Merci à Léna Basel et aux propriétaires du gouffre de Proumeyssac, grâce à qui nous avons pu réaliser une expérience de calcification sur bloc coloré. Nous remercions également Geneviève Pinçon pour sa relecture critique et Paul Bahn pour la traduction en anglais du résumé et des légendes des figures de cet article.

Références

- [1] E. Chalmin, M. Menu, M.-P. Pomiès, C. Vignaud, N. Aujoulat, J.-M. Geneste, Les blasons de Lascaux, *L'Anthropologie* 108 (2004) 571–592.
- [2] N. Aujoulat, E. Chalmin, C. Vignaud, M. Menu, Lascaux : les pigments noirs de la Scène du puits, in : *L'art avant l'histoire, la conservation de l'art préhistorique*, SFIIC, Paris, 2002, pp. 5–14.
- [3] C. Vignaud, H. Salomon, E. Chalmin, J.-M. Geneste, M. Menu, Le groupe des « bisons adossés » de Lascaux. Étude de la technique de l'artiste par analyse des pigments, *L'Anthropologie* 110 (2006) 482–499.
- [4] H. Salomon, Les matières colorantes au début du paléolithique supérieur – Sources, transformations et fonctions, thèse de doctorat, université Bordeaux-1, Bordeaux, France, 2009, http://ori-oai.u-bordeaux1.fr/pdf/2009/SALOMON_HELENE_2009.pdf.
- [5] E. Chalmin, Caractérisation des oxydes de manganèse et usage des pigments noirs au paléolithique supérieur, thèse de doctorat, université de Marne-la-Vallée, Marne-la-Vallée, France, 2003, <http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00120355>.
- [6] J.C. San, Les matières colorantes dans les collections du musée national de préhistoire des Eyzies, *Paléo* 2 (1990) 229–242, <https://doi.org/10.3406/pal.1990.1002>.
- [7] M. Menu, L'analyse de l'art préhistorique, *L'Anthropologie* 113 (2009) 547–558.
- [8] J. Vouvé, F. Vouvé, J. Brunet, P. Malaurent, Apport de l'analyse colorimétrique in situ des peintures préhistoriques dans une démarche conservatoire : cas de la grotte Chauvet (Ardèche, France), *C. R. Acad. Sci. Paris, Ser. IIa* 331 (2000) 627–632.
- [9] J. Clottes, *La grotte Chauvet : l'art des origines*, Éditions du Seuil, ISBN 2-02-102208-0, 2010.
- [10] N. Aujoulat, Optimisation des méthodes de relevé, in : *Actes du colloque du ministère de la Culture « L'art pariétal paléolithique » Périgieux – Le Thot*, 1984, pp. 145–155.
- [11] M. Gay, K. Müller, F. Plassard, I. Reiche, Les pigments et les parois des grottes préhistoriques ornées, *Les Nouvelles de l'archéologie* 138 (2016), <https://doi.org/10.4000/nda.2684>, <http://journals.openedition.org/nda/2684>.
- [12] J. de Sanoit, D. Chambellan, F. Plassard, Caractérisation in situ du pigment noir de quelques œuvres pariétales de la grotte de Rouffignac à l'aide d'un système portable d'analyse par fluorescence X (XRF), *ArchéoSciences* 29 (2005) 61–68.
- [13] M. Elias, N. Bouldi, P. Cotte, Review of several optical non-destructive analyses of an easel painting. Complementarity and crosschecking of the results, *J. Cult. Heritage* 12 (4) (2011) 335–345, <https://doi.org/10.1016/j.culher.2011.05.006>.
- [14] A. Monnard, D. Lafon-Pham, H. Garay, Influence of moisture content on colour of granular materials. Part I: experiments on yellow ochre, *Granul. Matter* 18 (3) (2016) 47, <https://doi.org/10.1007/s10035-016-0650-0>.
- [15] G. Wyszecki, W.S. Stiles, *Color Science : Concepts and Methods, Quantitative Data and Formulas*, John Wiley & Sons, ISBN 978-0-471-39918-6, 2000.
- [16] R. Sève, *Science de la couleur : Aspects physiques et perceptifs*, Chalagam, Marseille, France, ISBN 978-2-9519607-5-6, 2009.
- [17] J. Schanda, *Colorimetry : Understanding the CIE System*, Wiley-Blackwell, ISBN 978-0-470-04904-4, 2007.
- [18] J. Lafait, M. Elias (Eds.), *La couleur : lumière, vision et matériaux*, Belin, Paris, 2006.
- [19] L. Bassel, Genèse de faciès calcitiques : mondmilch et coralloïdes : étude multiphysique des concrétions de la grotte laboratoire de Leye (Dordogne), thèse de doctorat, université Michel-de-Montaigne – Bordeaux-3, Bordeaux, France, 2017, <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01729035>.
- [20] H. Garay, O. Etteradossi, A. Benhassaine, Should Melamed's spherical model of size-colour dependence in powders be adapted to non-spheric particles? *Powder Technol.* 156 (1) (2005) 8–18.
- [21] H. Garay, A. Monnard, D. Lafon-Pham, Influence of moisture content on reflectance of granular materials. Part II: optical measurements and modelling, *Granul. Matter* 18 (3) (2016) 39, <https://doi.org/10.1007/s10035-016-0649-6>.