



HAL
open science

DStretch® et l'amélioration des images numériques: applications à l'archéologie des images rupestres

Jean-Loïc Le Quellec, Jon Harman, Claudia Defrasne, Frédérique Duquesnoy

► **To cite this version:**

Jean-Loïc Le Quellec, Jon Harman, Claudia Defrasne, Frédérique Duquesnoy. DStretch® et l'amélioration des images numériques: applications à l'archéologie des images rupestres. Les Cahiers de l'AARS, 2013, 16, pp.177-198. halshs-00935630

HAL Id: halshs-00935630

<https://shs.hal.science/halshs-00935630>

Submitted on 6 Feb 2017

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.

DStretch® et l'amélioration des images numériques : applications à l'archéologie des images rupestres

Jean-Loïc Le Quellec¹, Jon Harman²,
Claudia Defrasne³ & Frédérique Duquesnoy³

Among all the tools currently available for rock art studies, DStretch®, plug-in for ImageJ® designed specifically for the enhancement of digital images of pictographs, seems to be one of the most efficient to decipher fainted figures while being fast, easy to use and cheap. The examples presented here show that DStretch is currently one of the best way to achieve what should be now the scientific standards for image enhancement of rock paintings and, in some cases, engravings.

Parmi les outils actuellement disponibles pour l'étude des arts rupestres, DStretch® pour ImageJ® conçu spécifiquement pour l'amélioration des images numériques de pictogrammes, semble être l'un des plus performants pour « ressusciter » des images très estompées tout en étant rapide, facile d'utilisation et peu onéreux. Il est l'une des meilleures façons d'atteindre ce qui devrait constituer désormais les nouvelles normes d'amélioration d'image pour les peintures rupestres, ainsi que, dans certains cas, les gravures.

Introduction

Depuis une dizaine d'années, le développement de la photographie numérique et des logiciels d'amélioration d'images a considérablement modifié les procédés de documentation et d'étude des arts rupestres. Comparés aux anciennes techniques (dessin à main levée, calque direct ou d'après photographie argentique), les nouveaux outils produits par ce qu'on a pu qualifier de « révolution numérique » (Brady, Gunn, McDonald *et al.* 2012 : 628) apportent de nombreux avantages : ils permettent d'effectuer des inventaires plus complets (McNiven, David, Brady *et al.* 2004, Brady 2006) accompagnés de relevés plus précis et plus objectifs (Montero Ruiz, Rodríguez Alcalde, Vicent García *et al.* 1998, David, Brayer, McNiven *et al.* 2007), tout en facilitant l'étude des superpositions (Gunn, Ogleby, Lee *et al.* 2010, Brady, Gunn, McDonald *et al.* 2012) sans qu'aucune de ces opérations ne nécessite un contact direct avec les œuvres.

La perspective d'exercer des « manipulations » sur une photographie numérique peut susciter des réticences, dans la mesure où l'on pourrait penser que cela reviendrait à altérer un document « original. » Cette notion d'original (Fig. 1) a néanmoins été fortement bousculée par l'avènement du numérique (Chabin 2000) et particulièrement de l'APN (appareil photo numérique). Seul peut être considéré comme « original » un fichier n'ayant subi aucune modification, ni traitement ni compression, lors



Fig. 1. Deux Théranthropes peu visibles d'Iheren (Tasili-n-Ajjer). Photographie au format JPG produite par le logiciel embarqué dans un appareil photo numérique. Comme ce type d'image résulte de la modification automatique d'un fichier RAW, peut-on le considérer comme un « original » ? (Photo JLLQ).

de son enregistrement. C'est le cas des fichiers RAW (« bruts ») qui préservent toute l'information des pixels et peuvent gérer jusqu'à 281,4 milliards de milliards de couleurs. Le format RAW fournit une pseudo-image qui n'est pas encore convertie en valeurs de couleurs, et il permet d'effectuer plusieurs réglages après la prise de vue : exposition, balance des blancs, netteté, contraste, saturation des couleurs. Le résultat peut alors être sauvegardé aux formats JPEG (*Joint Photographic Experts Group*) ou TIFF (*Tagged Image File Format*).

1. CEMAF — UMR 8171 / School of Geography, Archaeology and Environmental Studies, University of the Witwatersrand, Johannesburg ; 2. www.dstretch.com ; 3. LAMPEA — UMR 7269, Aix-Marseille Université, France.
Reçu le 22 novembre 2013.

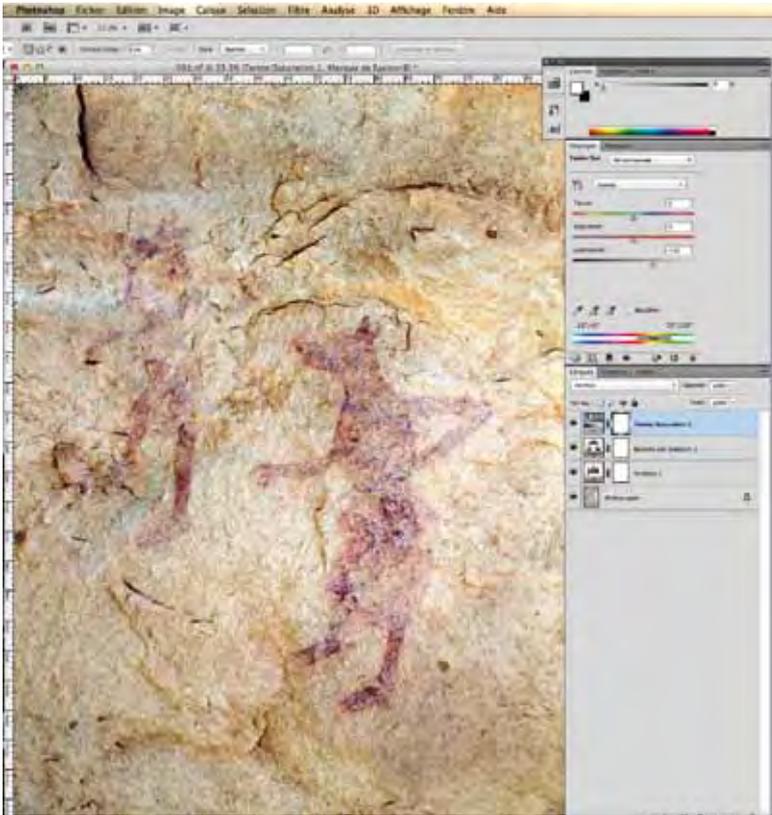


Fig. 2. Traitement de l'image précédente à l'aide du logiciel *Photoshop*®.

Les fichiers JPEG (limités à 16,7 millions de couleurs) ou TIFF (jusqu'à 4,29 milliards de couleurs) résultent donc ici du traitement des fichiers RAW par le logiciel embarqué dans l'APN, et ce ne sont déjà plus des originaux au sens propre du terme.

Il existe un autre standard qui pulvérise toutes les limites des formats précédents : le format HDR (*High Dynamic Range*) susceptible d'afficher 340 milliards de milliards de couleurs. Ce standard est encore très peu utilisé, du fait du poids considérable des images ainsi obtenues et des ressources nécessaires pour les traiter.

S'il est possible d'améliorer les images dès le stade de la prise de vue en utilisant des techniques spéciales comme l'infrarouge (Kamal *et al.* 1999; Fredlund & Sundstrom 2007) ou la lumière polarisée (Henderson 2002), le procédé le plus répandu consiste à les traiter *a posteriori* avec un logiciel spécialisé. Parmi ceux qui sont actuellement disponibles, le « standard » depuis plus de dix ans est *Photoshop*® (Fig. 2), produit par la société *Adobe*®, puissant et très souvent utilisé (Domingo Sanz & López-Montalvo 2002, McNiven, David, Brady *et al.* 2004, Mark & Billo 2006, Brady 2006 et 2007) Il existe cependant des alternatives payantes comme *DxO Optics pro*® (Fig. 3) — ou gratuites, comme le *Gimp*® (<http://www.gimp.org/>), *Krita*® (<http://krita.org/>), *ImageJ*® (<http://rsb.info.nih.gov/ij/>) ou *Hypercube*® (<http://www.agc.army.mil/>).

DStretch®, un greffon gratuit pour *ImageJ*® spécifiquement conçu en 2005 par Jon Harman pour améliorer les photos numériques de peintures rupestres (Harman 2005, Mark & Billo 2006; Maestrucci & Giannelli 2008a), est plus avantageux en terme d'objectivité et de rapidité de traitement. Il fut introduit en France lors de la réunion de l'AARS de 2006, lors de laquelle fut présenté un test sur une photographie peu lisible prise à Wa-n-Derbawen (Tasīlin-Ajjer) et aimablement communiquée par Louis-Noël Viallet (fig. 4 et 5). Les premiers articles illustrés par des images sahariennes semblablement traitées apparurent peu après dans la revue *Sahara* et dans les *Cahiers de l'AARS* (Fouilleux 2007, Menardi-Noguera *et al.* 2007, Lachaud 2008a et b). Depuis, nombreux sont les auteurs qui ont utilisé ce greffon pour illustrer des travaux parus dans ces publications et d'autres, faisant connaître des centaines d'œuvres nouvelles.



Fig. 3. Autre traitement de la même image, à l'aide du logiciel *DxO Optics pro*®.



Fig. 4. Photographie prise à Wa-n-Derbawen par Louis-Noël Viallet.

Fig. 5. Le même document après traitement DStretch-YRE : une corde apparaît nettement près du troupeau.

Bien que très employé aussi en Amérique ou en Australie, et malgré ses indéniables qualités, *DStretch*® est rarement utilisé en Afrique (hors du Sahara) et en Europe, à l'exception notable de l'Espagne (Quesada Martínez 2010, Domingo *et al.* 2013, Fernández Ruiz Marcos & Liliana Spanedda 2013). Cela est peut-être dû à la longue tradition de relevés manuels qui prévaut dans ces deux régions par suite de l'influence de l'abbé Breuil (Breuil 1955: 16-18, Le Quellec 2010: 209-225). Ainsi, en Afrique du Sud, la plupart des spécialistes préfèrent encore la technique du calque direct, bien que cela ne soit pas sans poser des problèmes de conservation (néanmoins, des signes de changement apparaissent: Hollmann & Crause 2011). En Europe, les pariétalistes qui opèrent en grotte ont définitivement abandonné les calques directs, travaillant toujours sur place mais désormais sur photographies, en comparant leur relevé directement avec les figures originales¹. Ils utilisent également le dessin assisté par ordinateur (DAO), mais ne semblent généralement pas très favorables à l'application d'algorithmes d'amélioration sur leurs documents (Fritz & Tosello 2007). Pour l'instant, seuls Romain Pigeaud et Hervé Paitier ont tenté d'appliquer *DStretch*® à des peintures paléolithiques (Pigeaud, Le Quellec, Paitier & Pommier 2012: 18-23 et fig. 7, 8, 9, 11, 13).

Nous souhaitons faire ici une présentation technique de *DStretch*®, avant d'exposer plusieurs exemples de traitements obtenus avec ce programme et avec *Photoshop*®, afin de comparer leurs performances et proposer une démarche standardisée de traitement des photographies.

Origine, développement et fonctionnement de DStretch®

Pour améliorer les photographies digitales de peintures rupestres, *DStretch*® utilise un algorithme de décorrélation initialement développé en 1978 au *Jet Propulsion Laboratory* de Pasadena en Californie, où il servait à améliorer le contraste des images multispectrales Landsat (Soha & Schwarz 1979). Il fut ensuite

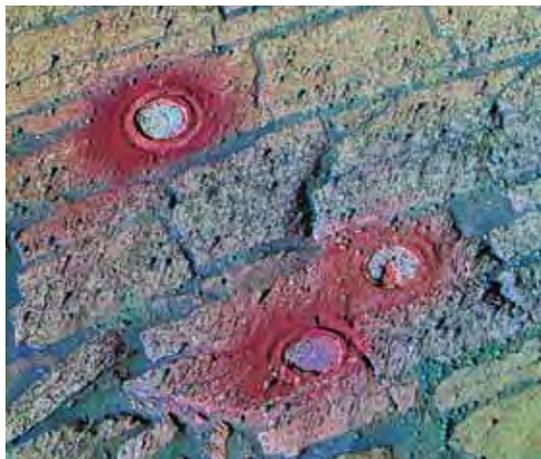


Fig. 7. Image de Mars publiée en 2004 par la Nasa, et traitée par un algorithme de décorrélation (Mars Rover Press Release 2004).

utilisé avec l'ASTER (*Advanced Spaceborne thermal Emission and Reflectance Radiometer* ou «radiomètre spatial perfectionné pour la mesure de la réflectance et des émissions thermiques terrestres»), et une description de l'algorithme fut alors publiée (Alley 1996).

En 2004, la Nasa publia dans la presse des images de la mission Rover sur Mars, qui avaient été améliorées à l'aide de cette technique (Mars Rover Press Release 2004), et qui laissaient supposer que celle-ci pourrait aussi bien fonctionner sur des photographies de peintures rupestres (Fig. 6).

Chaque pixel d'une image digitale contient trois nombres qui spécifient la couleur qui doit être visible à cet endroit. Ces trois nombres peuvent être considérés comme déterminant un point dans un espace tridimensionnel, dénommé espace colorimétrique. Un espace colorimétrique très répandu est le RVB, dans lequel ces trois nombres définissent la quantité de rouge, de vert et de bleu. C'est le système le plus répandu, étant utilisé par les appareils de photo numériques et les écrans d'ordinateur, mais il en existe beaucoup d'autres, par exemple TSL (Teinte, Saturation, Luminosité; en anglais HSB: Hue, Saturation, Brightness), CMJN (Cyan Magenta Jaune Noir) correspondant aux encres utilisées en imprimerie, YUV qui a été développé pour la télévision, ou LAB qui est souvent utilisé en traitement d'image,

1. En effet, les risques d'erreur imputables aux relevés effectués uniquement sur photographie et sans contrôle par observation directe de la paroi ont été dénoncés depuis bientôt un demi-siècle (Schoonraad 1965).

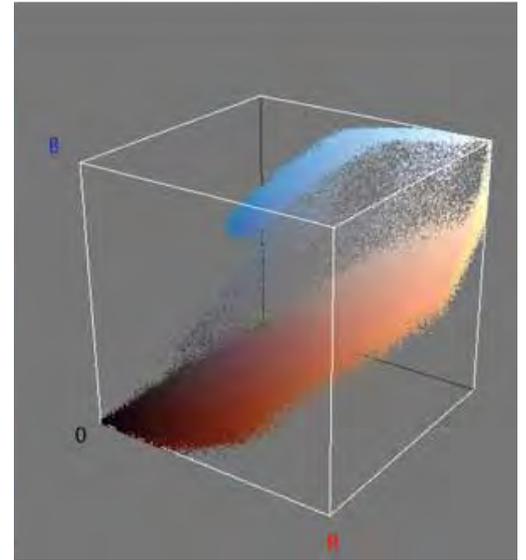


Fig. 7. Photo prise au Jebel el-'Uweynât. À droite, l'histogramme représentant la répartition de l'ensemble de ses points dans l'espace colorimétrique RVB.

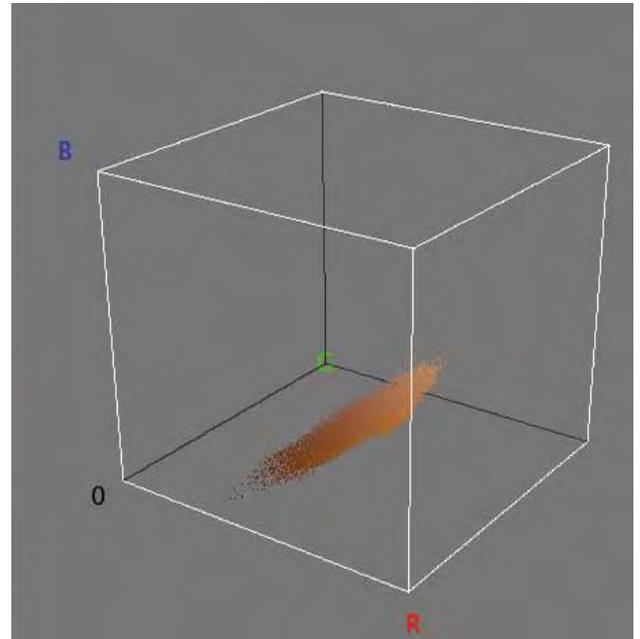


Fig. 8. Image de la Fig. 1 et son histogramme dans l'espace colorimétrique RVB.

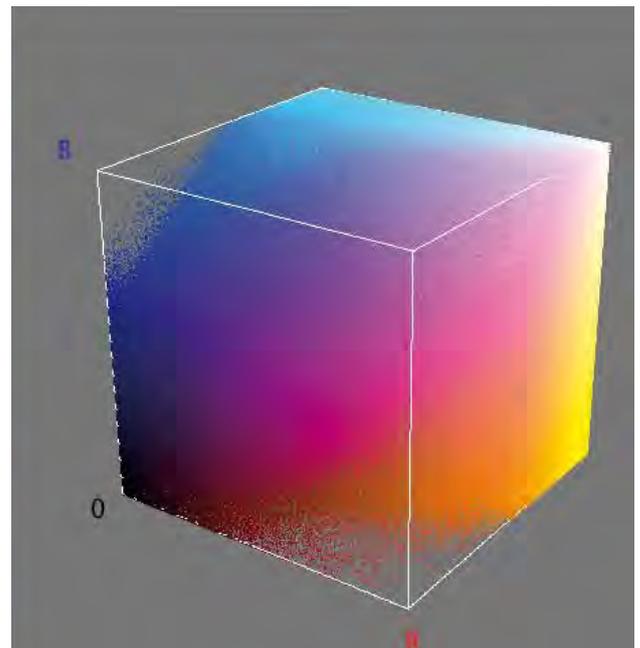


Fig. 9. La même image et son histogramme après décorrélation : tout l'espace colorimétrique est rempli.

car les changements de couleurs en fonction de divers paramètres y sont plus graduels pour l'œil humain que dans l'espace RGB.

Les espaces colorimétriques permettent donc de définir une couleur, et celle-ci sera spécifiée par des nombres différents selon les espaces utilisés. La répartition de l'ensemble des points d'une image digitale selon leurs coordonnées dans l'espace colorimétrique est appelée histogramme (Fig. 7).

L'algorithme d'étirage et décorrélation applique à l'histogramme une opération statistique dite transformée de Karhunen-Loève (Loève 1955), en utilisant la matrice de covariance de l'histogramme pour décorréler les couleurs. Ensuite, les écarts sont égalisés et la transformation inverse est appliquée. Un exemple de cette transformation est donné dans les Fig. 8 et 9. La première montre un détail de peintures d'Ihøren (Tasili-n-Ajjer): son histogramme est hautement corrélé, c'est-à-dire qu'il occupe une portion de l'espace colorimétrique ayant la forme d'un «cigare». La seconde montre la même image après traitement *DStretch-LDS-AC*, avec son histogramme: celui-ci ayant été décorrélé, il remplit maintenant l'espace colorimétrique.

DStretch® améliore l'image de la façon suivante. Le logiciel calcule d'abord la valeur moyenne de l'histogramme de l'image; puis il applique l'algorithme de décorrélation et d'étirement à l'histogramme normalisé, en soustrayant la moyenne. Cela crée une matrice 3x3 des valeurs transformées. Enfin, la transformation est appliquée à la photo originale pour produire l'image améliorée. La puissance de la transformation peut-être modifiée en utilisant un facteur d'échelle. Ainsi, l'amélioration par *DStretch®* est spécifiée par trois éléments: l'espace colorimétrique (voir ci-dessous), les valeurs moyennes de l'histogramme, et la matrice 3x3 de décorrélation et d'étirement. Pour les utilisateurs qui souhaitent un meilleur contrôle de la constance des améliorations sur différentes photos, *DStretch®* permet de mettre en mémoire l'espace colorimétrique et la matrice dans un fichier qui peut ensuite être utilisé sur d'autres images.

Les espaces colorimétriques

Lorsqu'il est appliqué dans un espace RVB à des photos de peintures rupestres, l'algorithme de décorrélation original n'améliore pas toujours la visualisation. De plus, les couleurs peuvent être assez déplaisantes. Or les différents espaces colorimétriques permettent de produire des améliorations différentes. Les espaces YUV et LAB ont d'abord été testés.

Le premier est créé en modifiant linéairement l'espace RVB et le second donne des améliorations aux couleurs plus vives. En utilisant *DStretch®* sur des images provenant de diverses régions du monde, il est apparu qu'on pouvait obtenir de meilleurs résultats en introduisant des modifications personnelles sur les espaces colorimétriques.

L'algorithme ignore à quel espace colorimétrique appartient la peinture rupestre, mais de nombreux sites présentent des couleurs et des fonds semblables. Par exemple, les peintures rouges à base d'hématite sont très fréquentes. Certains espaces colorimétriques modifiés donnent donc des résultats similaires pour de nombreux sites à peintures. Des noms composés de trois lettres ont été donnés aux espaces colorimétriques modifiés qui se sont avérés être les plus utiles.

Puisque les couleurs varient selon les sites, il est bon de pouvoir disposer d'un grand nombre de possibilités d'amélioration. Plusieurs ont été développées pour les rouges (LRE, LRD, YBR, YRE, YRD) et pour les jaunes (YDS, YYE, LDS, LYE). L'espace CRGB a été implémenté à un stade ancien du développement de *DStretch®*: c'est une matrice qui avait été développée en utilisant une version préliminaire et non standard de l'algorithme, mais qui s'est révélée être très utile pour de nombreux sites à peintures rouges (Fig. 12).

Les peintures en noir et en blanc sont particulièrement difficiles à améliorer par *DStretch®*. Celui-ci a besoin d'une différence de couleur et ne peut fonctionner sur une image en niveaux de gris, mais la plupart des représentations se trouvent sur un fond d'une certaine teinte, ce qui fait que le logiciel peut se montrer utile pour les figures en noir et blanc. Les améliorations YBK et LBK sont intéressantes sur certains pigments noirs, alors que YWE et LWE le sont pour les blancs.

La profusion d'espaces colorimétriques peut paraître gênante. Actuellement, il y en a dix-neuf (RGB, YUV, LAB, YDS, YBR, YBK, LDS, LRE, YRE, YBG, YBL, YWE, LBK, LBL, LWE, LYE, YYE, YRD, LRD), mais leur utilisation dans *DStretch®* est très facile. Un bouton est dédié à chacun de ces espaces colorimétriques, et il suffit de l'activer pour réaliser l'amélioration correspondante (Fig. 10).

Les utilisateurs découvrent rapidement l'amélioration la plus efficace pour leurs images, mais pour leur donner plus de flexibilité, *DStretch®* offre la possibilité de créer des espaces colorimétriques personnalisés.



Fig. 10. L'interface de DStretch. Les boutons du bas permettent de changer d'espace colorimétrique.

Cela est offert par les modes YXX et LXX. Le premier permet de créer des espaces colorimétriques basés sur l'espace YUV, et le second se base sur l'espace LAB. Dans ces deux modes, l'utilisateur peut modifier les coefficients qui commandent la transformation des espaces colorimétriques, de manière à produire une amélioration personnalisée.

Usages et avantages

La fonction principale des logiciels d'amélioration d'image consiste à faciliter la visualisation des peintures décolorées et/ou des superpositions difficiles à « lire » à l'œil nu. Or le déchiffrement des motifs peints est essentiel, car un inventaire erroné ou partiel peut conduire à de mauvaises interprétations, ou à la surinterprétation d'une figure, voire d'un site tout entier. Avec la plupart des logiciels, le résultat est très lié au niveau d'expertise et de virtuosité de l'opérateur, et il est donc extrêmement variable, tandis qu'avec *DStretch*[®] il dépend beaucoup moins de l'intervenant¹. Cela permet d'obtenir des résultats plus objectifs et aisément reproductibles, ce qui est essentiel pour une étude précise de l'art (Clogg & Diaz-Andreu 2000 : 842 ; Brady, Gunn, McDonald *et al.* 2012 : 630, 632).

Les pré-réglages du greffon permettent un apprentissage facile et des résultats rapides alors que procéder à diverses modifications de paramètres ou combinaisons de réglages dans

Photoshop[®] ou *Hypercube*[®] (Rogerio-candelara 2010a et b) nécessite beaucoup plus de manipulations. Même si ces logiciels sont très puissants, *DStretch*[®] livre des résultats souvent meilleurs, et bien plus facilement, comme les exemples qui suivent le montreront.

La rapidité et la facilité d'obtention de résultats puissants et fiables sont des conditions essentielles pour documenter les sites d'art rupestre des zones montagneuses ou désertiques où les difficultés d'accès et la logistique de terrain sont des aspects cruciaux. Quand on ne peut faire des aller-retour entre le laboratoire et le terrain, ou *a fortiori* quand il est impossible de retourner sur place, *DStretch*[®] permet un déchiffrement rapide des parois, ce qui facilite l'acquisition d'une documentation précise et détaillée.

Emploi sur le terrain

Nous proposons une procédure en deux étapes :

1/ couverture photographique systématique de la totalité de la paroi, sans préjuger de l'existence de peintures. Chaque photographie couvre environ 1x1 m, avec un recouvrement d'au moins 50% de l'une à l'autre pour être sûr de ne manquer aucune figure. Ces photos sont alors immédiatement traitées sur place avec *DStretch*[®] et un numéro d'inventaire est attribué à chaque motif identifié (y compris les motifs partiels). Ce numéro est ensuite transcrit sur une vue générale de la paroi, ainsi qu'on le fait maintenant de façon routinière (ex. McNiven, David, Brady *et al.* 2004). Avec un schéma des peintures positionnées sur la paroi, cela permet de se souvenir de l'emplacement de celles qui sont très effacées ou incomplètes. Les photographies seront toutes référencées en utilisant ce numéro d'inventaire précédé du nom (ou de la désignation codée) du site et de la paroi.

2/ La seconde étape consiste à prendre des vues rapprochées de chaque motif (ou groupe de motifs) identifié. Grâce au déchiffrement préliminaire effectué à l'aide de *DStretch*[®], il est alors possible de cadrer correctement des sujets à peine visibles. Différents réglages peuvent être appliqués lors de la prise de vues selon l'usage que l'on projette d'en faire — publication, relevé, photogrammétrie, etc. (Hachid, Le Quellec, Aqsous *et al.* 2010 : 52). Les vues rapprochées servent aussi à l'analyse des superpositions. À ce stade, certains systèmes comme *GigaPixel*[®] ou *Gigapan*[®] peuvent également être utiles pour créer des panoramas du site en haute résolution (Mark & Billo 2011). Une deuxième série d'améliorations

1. Il est à noter que, dans un même espace colorimétrique, des résultats très différents, peuvent être obtenus avec *DStretch*[®] en appliquant les réglages sur différents cadres de sélection.

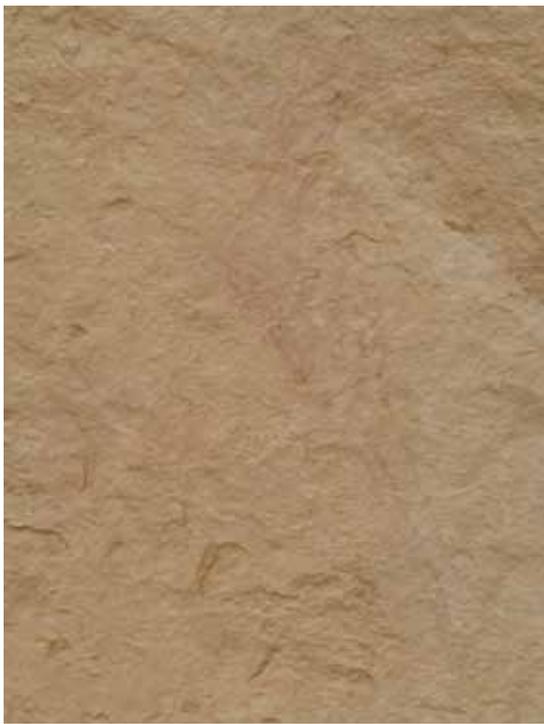


Fig. 11. Photographie d'une peinture d'Imerda (Tasli-n-Ajjer) (d'après Maestrucci & Giannelli 2008b, fig. 8-9).

Fig. 12. La même image, après traitement DStretch-CRGB.

par *DStretch*[®] permet de vérifier le cadrage et la mise au point sur les motifs très peu visibles. De retour au laboratoire, on l'utilisera aussi pour relever chaque motif ou pour faciliter l'étude des superpositions (Gunn, Ogleby, Lee *et al.* 2010). À ce stade, la méthodologie rejoint celle que proposent d'autres chercheurs (ex.: López-Montalvo & Domingo-Sanz 2009) et *Photoshop*[®] ou ses alternatives permettent alors d'extraire le motif de l'image améliorée.

De *DStretch*[®] au relevé

On l'a vu, les résultats obtenus grâce à *DStretch*[®] sont généralement bien plus lisibles que sur la photographie de départ (Fig. 11 et 12), mais cette lisibilité s'obtient grâce à des couleurs très artificielles qui donnent aux images un aspect «psychédélique» bien éloigné des teintes originales. Par ailleurs, la grande simplicité d'utilisation de ce greffon (du moins dans son mode de fonctionnement «non-expert»), est telle qu'il suffit d'actionner les boutons correspondant aux différents

espaces colorimétriques pour obtenir des résultats très étonnants, qui sont aussitôt publiés tels quels. Cette simplicité d'emploi et le côté quasi «magique» des effets obtenus ne devraient pourtant pas faire oublier que cet outil, certes des plus utiles, n'est pas une fin en soi, et qu'il peut être possible de continuer à travailler les images après leur traitement par *DStretch*[®], dans le but de bien documenter les figures rupestres. Nous allons proposer deux exemples de démarches possibles, depuis la prise de vue jusqu'à l'élaboration d'un relevé.

En premier exemple, nous présentons le relevé d'une peinture de Guindingui au Mozambique. La Fig. 13 est une photo non améliorée du panneau principal, sur laquelle on peut reconnaître deux anthropomorphes, mais les détails sont difficiles à distinguer. La Fig. 14 montre la même photographie après traitement *DStretch*-YRD, choisi pour son efficacité à mettre en évidence les rouges. De nombreux détails sont maintenant visibles, en particulier les restes d'une antilope



Fig. 13. Peintures de Guindingui au Mozambique (Photo JLLQ).

Fig. 14. La même image, après traitement *DStretch*-YRD.

Fig. 15. L'image précédente, convertie en noir et blanc.



Fig. 16. Sélection des rouges.



Fig. 17. Relevé final, par report de rouges sur le fond naturel, et ajout d'une échelle.



apparaissant entre les deux anthropomorphes : on voit ses cornes, son dos et sa queue, et elle ne semble pas être du même âge que les autres motifs. Certains chercheurs n'aiment pas les couleurs acidulées des améliorations obtenues par *DStretch*[®] et des revues spécialisées hésitent à les publier, mais il est facile de remédier à cela.

La façon de procéder la plus simple consiste à convertir le résultat en noir et blanc (Fig. 15), mais cela se fait au prix d'une perte de la visibilité, et l'on peut donc s'y prendre autrement : en supprimant toutes les couleurs sauf le rouge, on obtient le résultat montré Fig. 16. On peut alors extraire les rouges et les reporter sur l'image originale. Avec l'ajout d'une échelle et un léger ajustement de la luminosité, on obtient le résultat présenté Fig. 17.

En second exemple, voici un cliché pris sur un petit plafond très bas d'Imerda, dans la Tasīli-n-Ajjer (Fig. 18). Sur l'image originale tout comme sur place, on distingue bien quelques anthropomorphes en style d'Ihøren et divers traits tout autour, mais il est impossible d'avoir une lecture claire de l'ensemble. Plusieurs essais de traitement à l'aide de *DStretch*[®], dont le meilleur (YBK) est donné Fig. 19, permettent de mieux voir certains des anthropomorphes, dont deux au moins semblent brandir des objets, sans que l'ensemble du panneau soit beaucoup plus lisible pour autant.

L'expérience de telles améliorations limitées a incité à prendre sur place une série de clichés rapprochés de ce petit ensemble (ex. Fig. 20), de même que des macrophotos pour les endroits les plus difficiles à lire (ex. Fig. 21).



Fig. 18. Petit plafond orné d'Imerda (Tasīli-n-Ajjer).
Photo JLLQ.

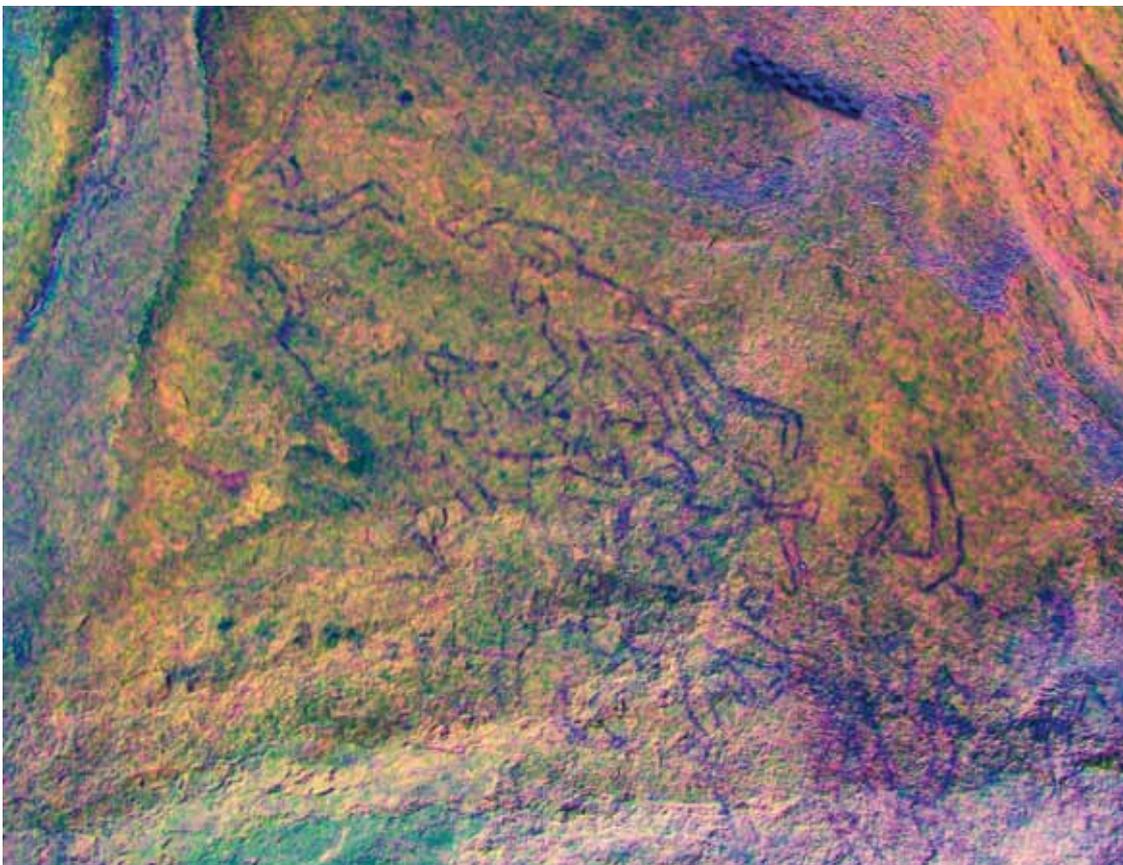


Fig. 19. Le même cliché, après traitement DStretch-YBK..

Fig. 20. Photo de détail du plafond précédent.



Fig. 21. macro-photo d'un détail du plafond précédent (situé en haut à gauche, près de la rupture de roche, sur la Fig. 19).



Fig. 22. Cliché de la Fig. 20, après traitement DStretch-LDS.

Fig. 23. La même image, après suppression automatique des couleurs étrangères au tracé;

Fig. 24. *Id.* après sélection de tous les pixels de la même teinte que le tracé.

Chacun des clichés de détail a ensuite été manipulé dans *DStretch*[®], en cherchant la plus grande lisibilité possible (ex. Fig. 22). Il est alors facile de mettre en lumière la peinture de façon automatique, par deux méthodes que l'on peut combiner ou non :

1/en supprimant les couleurs qui sont manifestement étrangères au tracé (comme le jaune et le vert) et l'on obtient alors l'image de la Fig. 23 ;

2/en sélectionnant dans l'image tous les pixels de la même teinte que le tracé, ce qui donne le résultat de la Fig. 24.

Ces opérations sont répétées pour toutes les photos de détail. Après nettoyage en se reportant si besoin aux macrophotos pour décider de ce qui est anthropique ou non lorsque subsiste un doute (Fig. 25), on procède alors à l'assemblage de tous les traitements partiels et à l'ajout d'une échelle (Fig. 26). Une fois colorés en ocre (Fig. 27), les tracés sont reportés sur une photographie de la paroi originale (Fig. 28), non sans avoir diminué les contrastes de cette dernière et introduit un léger flou dans les tracés, de manière à réduire l'aspect artifi-

ciel du résultat final... lequel donne une bonne restitution de l'ensemble, en minimisant autant que faire se peut les interventions personnelles de l'opérateur. Les avantages de ces méthodes sont doubles: le résultat est facile et rapide à obtenir, et il ne nécessite qu'un minimum d'intervention subjective. On ne fait que rendre

visibles des éléments qui existaient déjà dans l'image, mais qui étaient à peine perceptibles ou même invisibles à l'œil nu. On supprime aussi les informations redondantes, gênantes ou inutiles. Cependant, un risque inhérent à l'emploi de *DStretch®* est de supprimer quelques détails par inadvertance, mais c'est un moindre mal si on le compare au fait d'ajouter des informations erronées.



Fig. 25. Relevé semi automatisé de la Fig. 20, après toilette.



Fig. 26. Assemblage des relevés partiels, et ajout d'une échelle.

Fig. 27. Mise en teinte de l'assemblage.

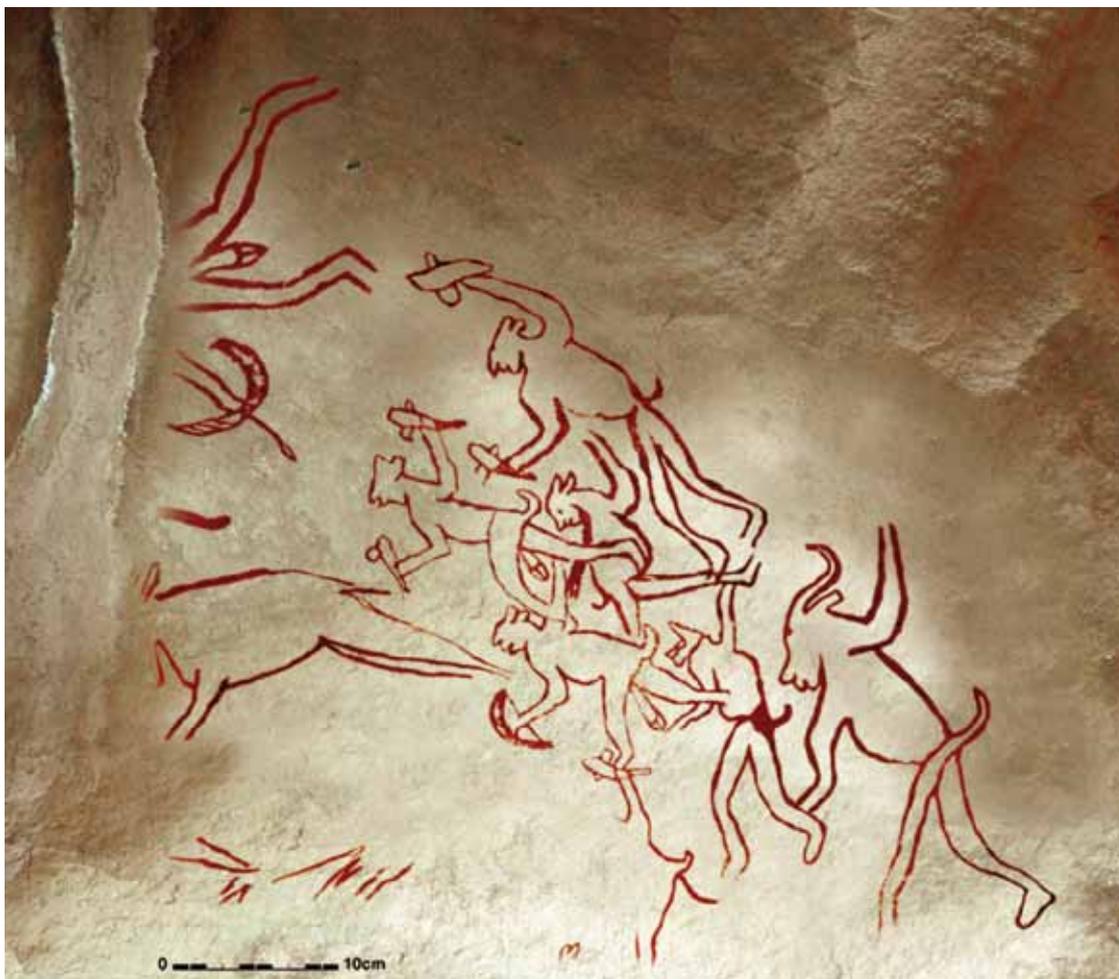


Fig. 28. Relevé final après report de la fig. 27 sur le fond original estompé. Comparer avec la Fig. 18.

Fig. 29. L'un des panneaux ornés de Main Caves North à Giant Castle (Drakensberg, Afrique du Sud). La partie dans le cartouche est celle qui a été traitée pour obtenir la Fig. 31 (Photo JLLQ).



Fig. 30. Relevé de l'antilope chevaline du panneau précédent, tel que publié par Francis Thackeray et Thembi Russell (2000).

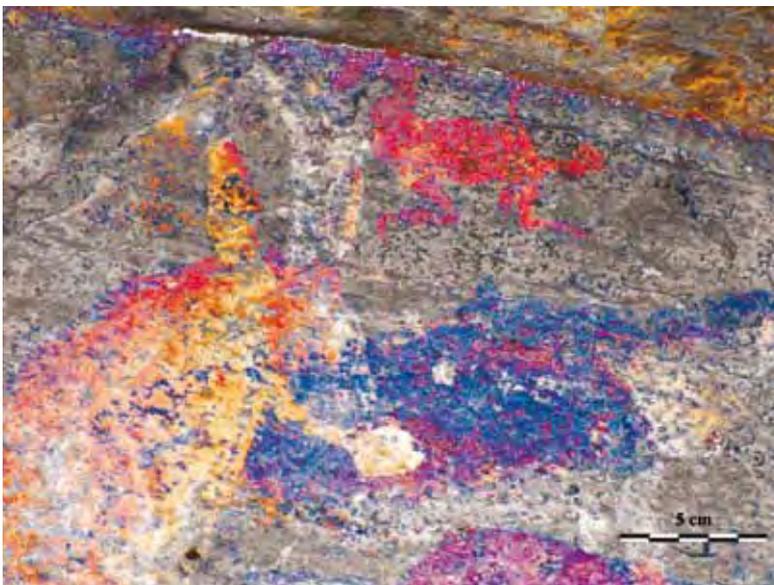


Juste quelques clics...

Voici maintenant trois exemples illustrant ce que quelques clics peuvent permettre d'éviter en terme de mauvaise interprétation des peintures rupestres.

Le premier est emprunté à un site bien connu d'Afrique du Sud: Main Caves North, qui se trouve dans la réserve naturelle de Giant's Castle (Drakensberg/Ukhlahamba Mountains). Parmi les nombreuses peintures inventoriées sur ce site (Russell 2000) Francis Thackeray et Themby

Fig. 31. Traitement DStretch-LRE de la partie de la Fig. 29 située dans le cartouche.



Russell ont commenté deux rayures marquant le cou d'une antilope chevaline (Fig. 29 et 30) sans spécifier si elles avaient été remarquées avec ou sans amélioration de l'image (Thackeray & Russell 2004: 18). Selon ces auteurs «elles ne se rapportent certainement pas à des raies naturelles sur la robe de l'animal, et il est probable qu'elles aient une valeur symbolique.» Après un traitement DStretch-LRE d'une bonne photographie de cette partie de la peinture (Fig. 31) plusieurs détails se révèlent ne pas correspondre au relevé publié: les oreilles, la crinière et le museau sont différents, et les prétendues «rayures» sont loin d'être convaincantes. Elles semblent résulter davantage de l'effet combiné des irrégularités de la paroi et du tracé de l'arrière-train d'un quadrupède sous-jacent, ce que confirme un traitement de la même image sous *Photoshop*® en mode CMJN par modification des niveaux de saturation. De plus, le traitement DStretch-LRE rend parfaitement visible une représentation féminine située juste au-dessus des images précédentes (Fig. 32).

Le deuxième exemple provient de Sefar dans la Tasili-n-Ajjer (Fig. 33). Le relevé publié par François Soleilhavoup est montré Fig. 34 (Soleilhavoup 2007: 107), et la Fig. 35 montre le résultat d'un traitement DStretch-LDS de la photographie de départ. Il s'agit d'un anthropomorphe doté d'une grosse tête circulaire très étrange, et

ce détail curieux a été interprété comme « tambour » (*Ibid.*: 107) ou comme « signe entoptique » (Fagnola 1995), ce qui a conduit certains auteurs à supposer qu'il s'agirait d'un chamane. À l'occasion des missions du projet franco-algérien de datation des images rupestres de la Tasili-n-Ajjer (Hachid, Le Quellec, Agsous *et al.* 2010; Le Quellec 2010; Hachid, Le Quellec, Amara *et al.* 2012; Mercier, Le Quellec, Hachid *et al.* 2012), une photo rapprochée de cette tête a été réalisée (Fig. 36), permettant un traitement DStretch-LDS qui a immédiatement rendu la tête de l'anthropomorphe clairement visible : elle est en vue frontale, avec de grandes « oreilles de Mickey » n'apparaissant pas dans les relevés sus-mentionnés (Fig. 37), et qui relèvent d'un type bien connu parmi les peintures en style des Têtes Rondes (Fig. 38).

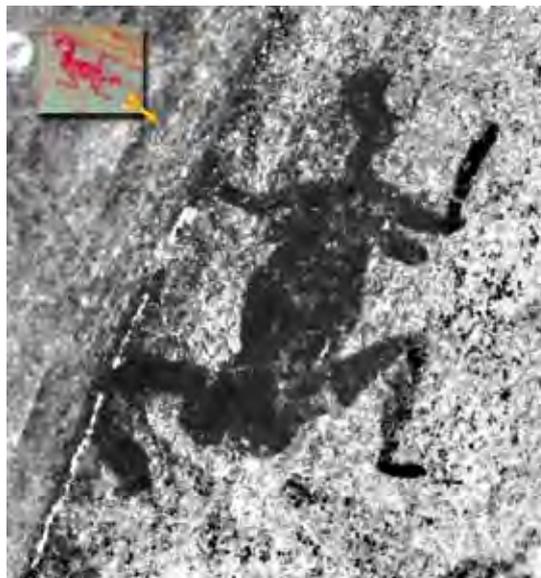


Fig. 32. La représentation féminine présente sur la Fig. 29 et bien mise en évidence par le traitement DStretch-LRE de la fig. 31, ici redressée et passée en noir et blanc.



Fig. 33. Anthropomorphe de Sefar (Photo JLLQ).



Fig. 34. Relevé du même, d'après Soleilhavoup 2007: 107.

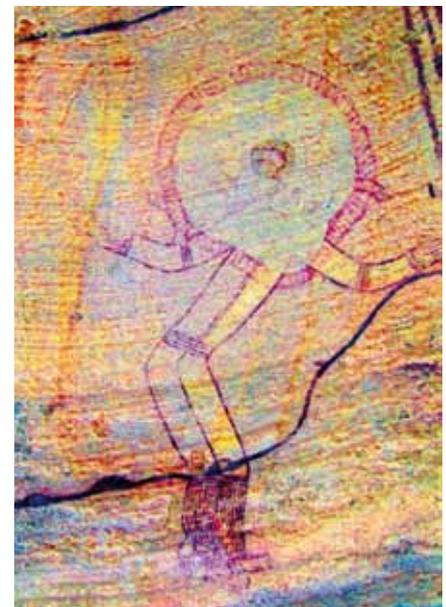


Fig. 35. Traitement DStretch-LDS de la photo de la Fig. 34.



Fig. 36. Photo de la tête du même l'anthropomorphe (Photo JLLQ).

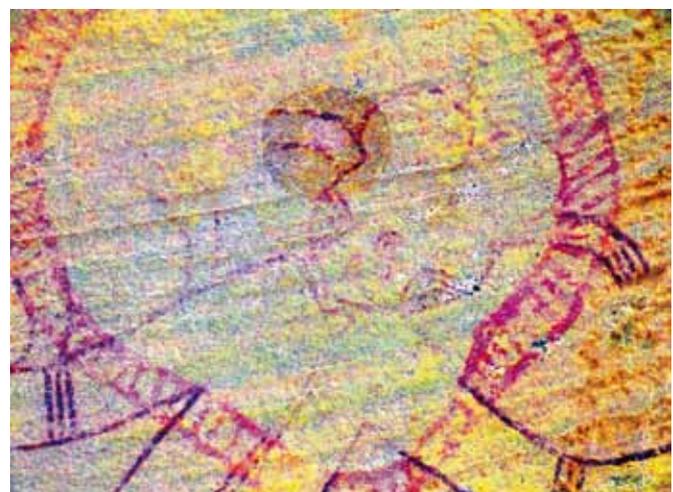


Fig. 37. Traitement DStretch-LDS de la photo précédente.

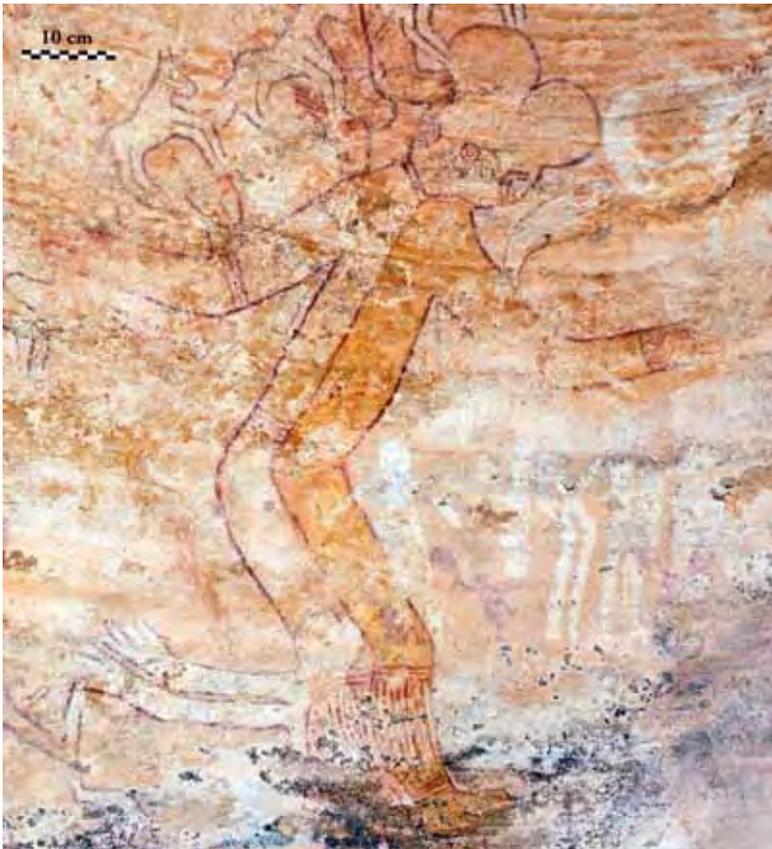


Fig. 38. Autre anthropomorphe de Sefar, doté d'une tête à « oreilles de Mickey » d'un type récurrent sur les peintures en style « classique » des Têtes Rondes. Comparer avec les Fig.37 et 39 (Photo JLLQ).

Fig. 39. Traitement de la photo de la Fig. 37 par photoshop en mode CMJN (réglage des teintes, saturation, remplacement des couleurs). Le résultat est moins complet que celui de la Fig. 37.

Selon Umberto Sansoni (Sansoni 1994 : 97, fig. 44) et Alfred Muzzolini (Muzzolini 1995 : 106, fig. 80) la figure circulaire serait superposée à l'anthropomorphe, mais l'amélioration digitale DStretch-LDS révèle le contraire (les pigments de la tête n'ont sans doute pas adhéré à la peinture sous-jacente), ce qui inverse la chronologie proposée par Sansoni (Sansoni 1994 : 92, fig. 41 et 97, fig. 44). Dans ce cas, la tête est légèrement moins visible sur l'amélioration par *Photoshop*® (Fig. 39 : mode CMJN, réglage des teintes et saturations, puis remplacement de couleurs).

Avant d'exposer le troisième exemple, rappelons que la plupart des chercheurs inventent leur propre méthode d'amélioration des photos, et que le problème essentiel réside dans le degré de confiance qu'il est possible d'attribuer à leurs résultats. Ainsi, plusieurs articles ont vanté l'efficacité de la méthode du « nettoyage électronique » (en italien : « *pulizia elettronica* » ou « PE ») élaborée par Lorenzo de Cola et qui a produit des résultats surprenants sur des sites du Sahara et d'Érythrée (De Cola 1995, 1997, 1999, De Cola, Peroschi & Cambieri 2009).

Par exemple, cette méthode aurait révélé de nombreux détails sur une paroi célèbre de Sefar (Fig. 40) et le relevé qui en découle comprend dix sujets nouveaux (Fig. 41), ce qui permet à Lorenzo de Cola de concevoir

une interprétation globale de l'ensemble de la scène (De Cola 1997). Nous avons cherché à vérifier ces affirmations en appliquant un traitement DStretch-LDS-AC à de bonnes photographies du même panneau. Il est apparu qu'aucune de ces nouvelles figures n'est correcte et que la plupart n'existe tout simplement pas. Ainsi, aucun tracé n'apparaît au-dessus de la tête du grand buffle antique, les lignes parallèles sous son poitrail sont inexistantes, aucun protomée de bovin n'a été peint dans son mufle, et « l'animal » situé entre ses jambes n'est rien d'autre qu'une série de fissures naturelles de la roche (Fig. 42).

En outre, deux autruches et un anthropomorphe en position d'imploration, typiques du style des Têtes Rondes, sont clairement visibles à l'intérieur du grand buffle juste au-dessus de sa ligne ventrale, ainsi que le montre le traitement DStretch-LDS de ce détail (Fig. 43), et comme le confirme, de façon moins lisible, le traitement par *Photoshop*® en mode CMJN (Fig. 44).

Pourtant, ces figures importantes et cette fois bien réelles avaient complètement échappé à l'auteur de la méthode dite « PE », et cela doit nous servir de leçon : l'usage indiscipliné des logiciels de traitement d'images produit facilement des résultats complètement erronés.

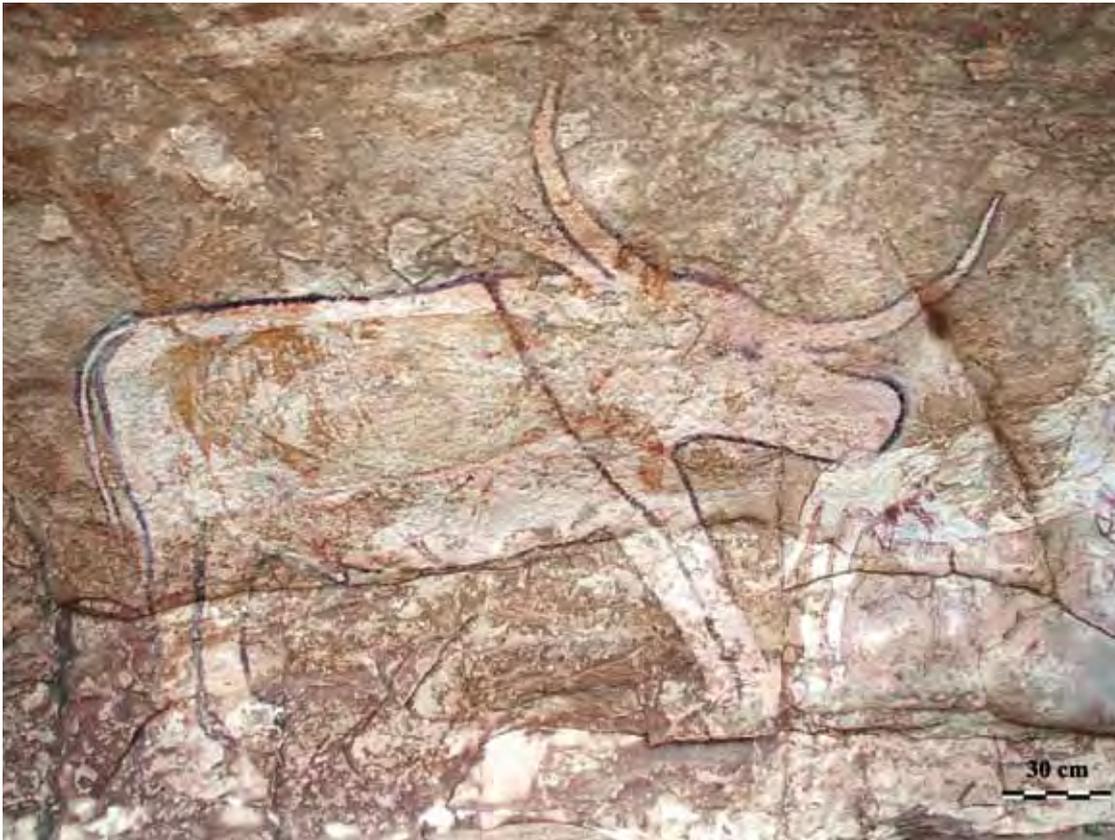


Fig. 40. Photo d'une paroi de Sefar ayant fait l'objet d'une «pulizzia elettronica». (Photo JLLQ).

Fig. 41. Résultat du traitement de la même image par «pulizzia elettronica», d'après Lorenzo de Cola (1997).

Fig. 42. La photo de la Fig. 40, après traitement DStretch-LDS-AC.



Fig. 43. Autruches et anthropomorphe en position d'imploration, situés jute au-dessus de la ligne ventrale du grand buffle (détail de la Fig. 42).

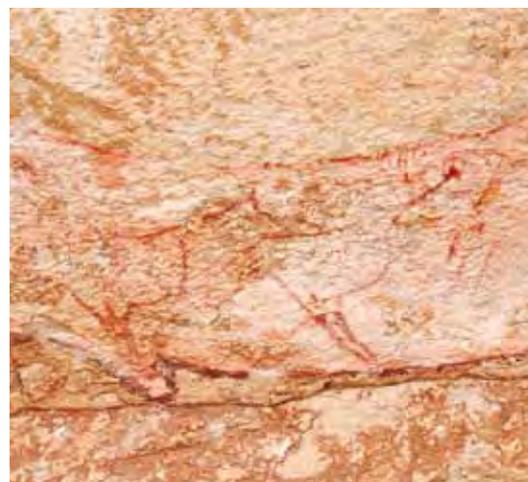
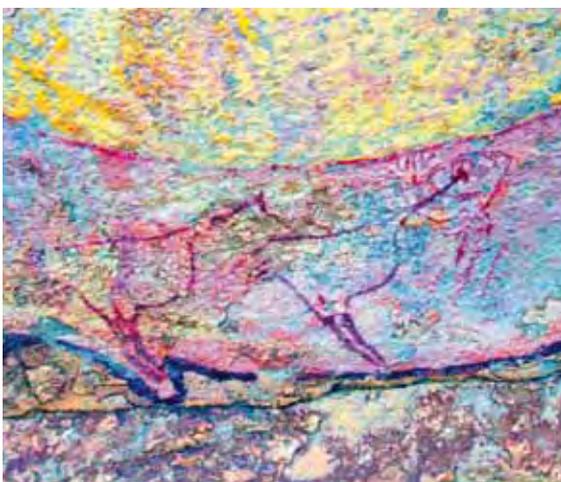


Fig. 44. Traitement du même détail sous Photoshop en mode CMJN (réglage des teintes et saturations, augmentation du contraste et de la netteté).

Fig. 45. Détail de la paroi de l'abri des Oullas à St-Paul-sur-Ubaye (Alpes de Haute-Provence).



Fig. 46. En haut : anciens relevés de la même paroi (A : d'après Müller & Jorda 2004 ; B : d'après Arcá 1994) . En bas : résultat obtenu après traitement DStretch-YBR et report sur une photo de la paroi.



Une application inattendue

Appliqué aux images de l'abri des Oullas (à Saint-Paul-sur-Ubaye, dans les Alpes de Haute-Provence) dont l'étude est en cours, *DStretch*[®] s'est montré capable de révéler, en plus des peintures, des incisions linéaires.

Une nouvelle couverture photographique de ce site, couplée à l'usage du logiciel, a permis de clarifier et compléter les relevés précédents (Arcá 1994, Müller & Jorda 1987, Arcá 2004). En premier lieu, un traitement *DStretch*-

YBR effectué sur une photo des peintures néolithiques (Fig. 45) a fait apparaître les restes de trois « branches » détectés pour la première fois sur le phytomorphe de gauche, ce qui le rapproche formellement des autres images

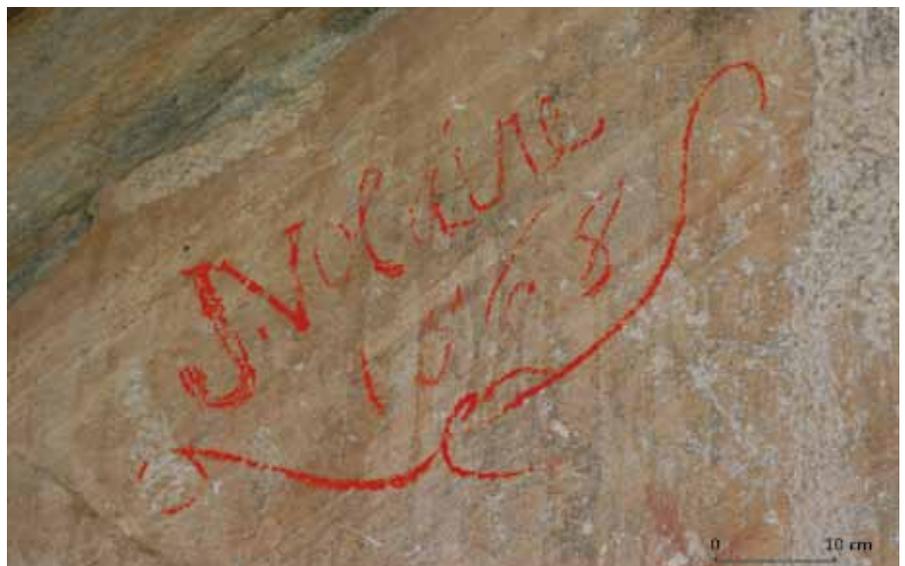


Fig. 47. Autre détail de la même paroi (Photo Maxence Bailly).



Fig. 48. Traitement *DStretch*-YDS de la photo précédente.

Fig. 49. Relevé semi-automatisé de la Fig. 47.



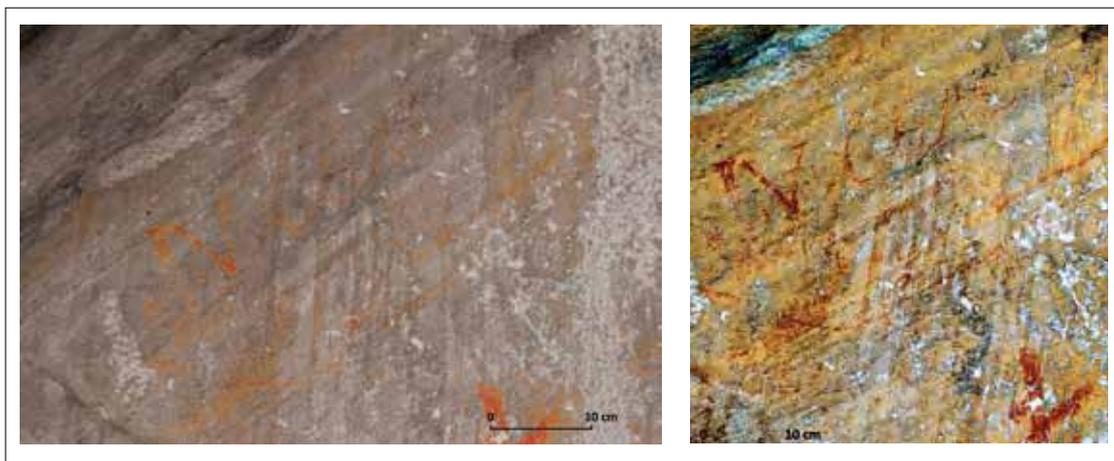


Fig. 50. Traitement sous *Photoshop*® d'un détail de l'inscription précédente (la photo d'origine est celle de la Fig. 51). À gauche par Claudia Defrasne, à droite par Hervé Paitier. Comparer avec le résultat obtenu par *DStretch*® (Fig. 48).

(Defrasne & Bailly, à paraître). De plus, celui de droite s'est révélé être plus haut que ce qu'indiquaient les anciens relevés (Fig. 46). Dans ce cas comme dans les suivants, *Photoshop*® s'est montré légèrement moins efficace. En effet, du fait de la couleur orangée particulière du rocher, qui est très proche de celles des peintures, il est difficile d'isoler les pixels appartenant aux parties estompées des figures. En conséquence, les contours obtenus ne sont pas assez précis pour pouvoir être reproduits et certains éléments ne peuvent être recouverts. De plus, les nombreux réglages requis (luminosité, contraste, niveaux, sélection et remplacement des couleurs) pour l'obtention d'un moindre résultat tendent à faire de *DStretch*® un outil plus efficace. La contribution de *DStretch*® fut encore plus convaincante sur une autre partie de la roche où une signature paraphée, au nom de «J. Volaire» est à peine lisible à

l'œil nu (Fig. 46). Elle n'a jamais été relevée lors des études précédentes, mais le traitement *DStretch*-YDS l'a rendue plus compréhensible et a permis de mettre en évidence sa date de création: «15(?)68» (Fig. 48 et 49), ce qui n'a pas été possible avec *Photoshop*® (Fig. 50).

Le résultat le plus surprenant fut néanmoins l'efficacité de *DStretch* pour la lecture de quelques pétroglyphes. *DStretch*® est généralement décevant quand on l'applique à des gravures (Harman 2005), mais ici, il a permis de visualiser des grattages et des incisions linéaires. Le traitement *DStretch*-YBK a ainsi précisé les contours d'un guerrier de l'âge du fer gravé sous la signature (Fig. 51 et 52). L'emploi de l'espace colorimétrique YBK permet de supprimer les rouges et de mettre en valeur les couleurs sombres et froides (correspondant ici aux incisions). Le résultat final complète les relevés précédents. André Müller et Maurice



Fig. 51. Détail de l'inscription de la fig. 47. (Photo Maxence Bailly).

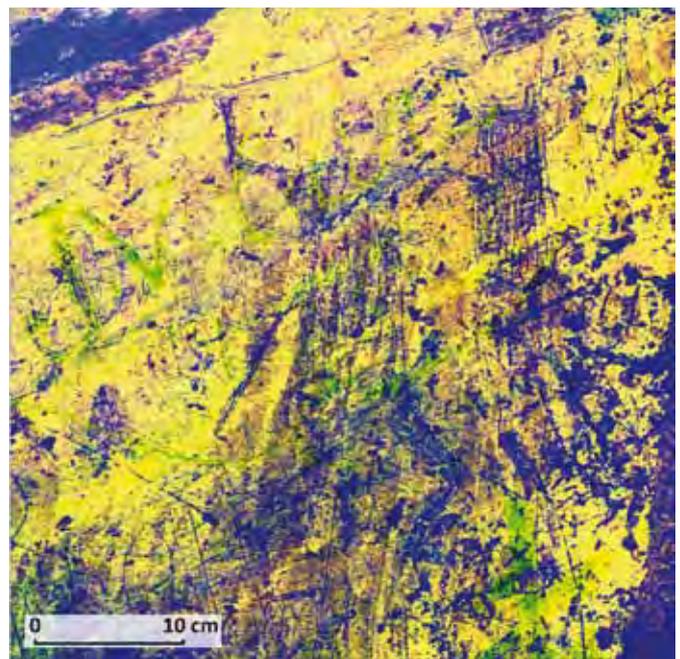


Fig. 52. La même image, après traitement *DStretch*-YBK et suppression des rouges. Le guerrier apparaît dans son entier, avec lance et bouclier.

Jorda avaient précédemment décrit ce guerrier comme étant impliqué dans une scène de duel entre deux combattants (Müller, Jorda & Gassend 2004 : 99), mais il s'avère que le corps du second « guerrier » n'est autre que le bouclier du premier. Cela permet de confirmer le relevé d'Andrea Arcà (Arcà 1994) et les observations de Nick Trustram-Eve (Trustram-Eve 2005). Le premier de ces auteurs a néanmoins omis une partie du tronc et d'une des jambes du guerrier, ainsi que sa lance et sa tête, qui ont pu être lus sur l'image améliorée par *DStretch*[®].

Ces dernières années, l'étude des pétroglyphes piquetés ou incisés a bénéficié du progrès des techniques visant à produire un enregistrement précis des surfaces rocheuses. La photogrammétrie et la scannérisation au laser sont particulièrement utilisées par les chercheurs (Simpson, Clogg, Díaz-Andreu *et al.* 2004, Cassen, Robin, Lefèbvre *et al.* 2006, Ortiz-Sanz, Luz Gil Docampo, Martínez Rodríguez *et al.* 2010, Plets, Verhoeven, Cheremisin *et al.* 2012, Plets, Gheyle, Verhoeven *et al.* 2012, Domingo, Villaverde, López-Montalvo *et al.* 2013). Ces deux techniques fournissent des modèles tridimensionnels des surfaces gravées, permettant l'étude des représentations dans leur contexte rocheux. La fonction de *DStretch*[®] est ici tout autre, visant à identifier ou clarifier des incisions peu visibles de manière à en faire un enregistrement bidimensionnel précis sans contact avec la surface rocheuse. De plus, la photogrammétrie et la scannérisation 3D requièrent un équipement spécialisé, onéreux, difficile à transporter sur des terrains lointains situés par exemple en haute montagne ou en plein désert. L'utilisation de *DStretch*[®] directement sur le terrain peut permettre de contourner ces difficultés.

Conclusions

Même si l'on peut discuter de l'objectivité des photographies améliorées (Read & Chipendale 2000), les techniques numériques d'amélioration des images sont désormais

devenues nécessaires pour procéder à une étude précise des documents rupestres, et nous souscrivons à l'avis de Liam Brady et Robert Gunn qui estiment que « l'enregistrement digital et l'amélioration de la visibilité de l'art pictural doivent maintenant faire partie intégrante des méthodes d'inventaire, de conservation et de gestion des sites d'art rupestre » (Brady, Gunn, McDonald *et al.* 2012 : 628).

De nombreux outils sont désormais disponibles à cet effet, aussi bien au moment de la prise de vues qu'après, mais leurs fonctions et leurs avantages sont différents. Si le niveau de performance est à peu près le même pour la plupart des logiciels de traitement d'image, leur prix et la qualification requise pour les utiliser correctement font souvent différence. Par exemple, le nouveau système dénommé CPED, développé par Jeremy Hollmann et Karl Crause (Hollmann & Crause 2011), paraît très puissant, mais il ne sera probablement pas accessible à la plupart des chercheurs ou étudiants.

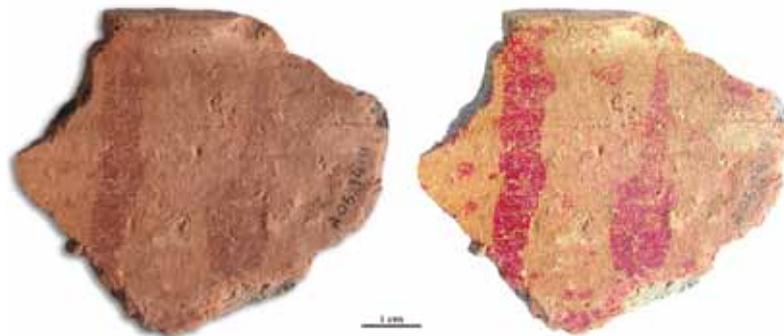
L'utilisation de *DStretch*[®] est donc actuellement le moyen le moins cher, le plus rapide et le plus facile d'emploi pour arriver à ce qui pourrait maintenant constituer un standard scientifique pour l'amélioration des photographies de peintures rupestres, et en certains cas de gravures. Cet outil peut également se révéler utile dans d'autres domaines, par exemple pour l'étude des fresques ou des poteries peintes (Fig. 53, 54).

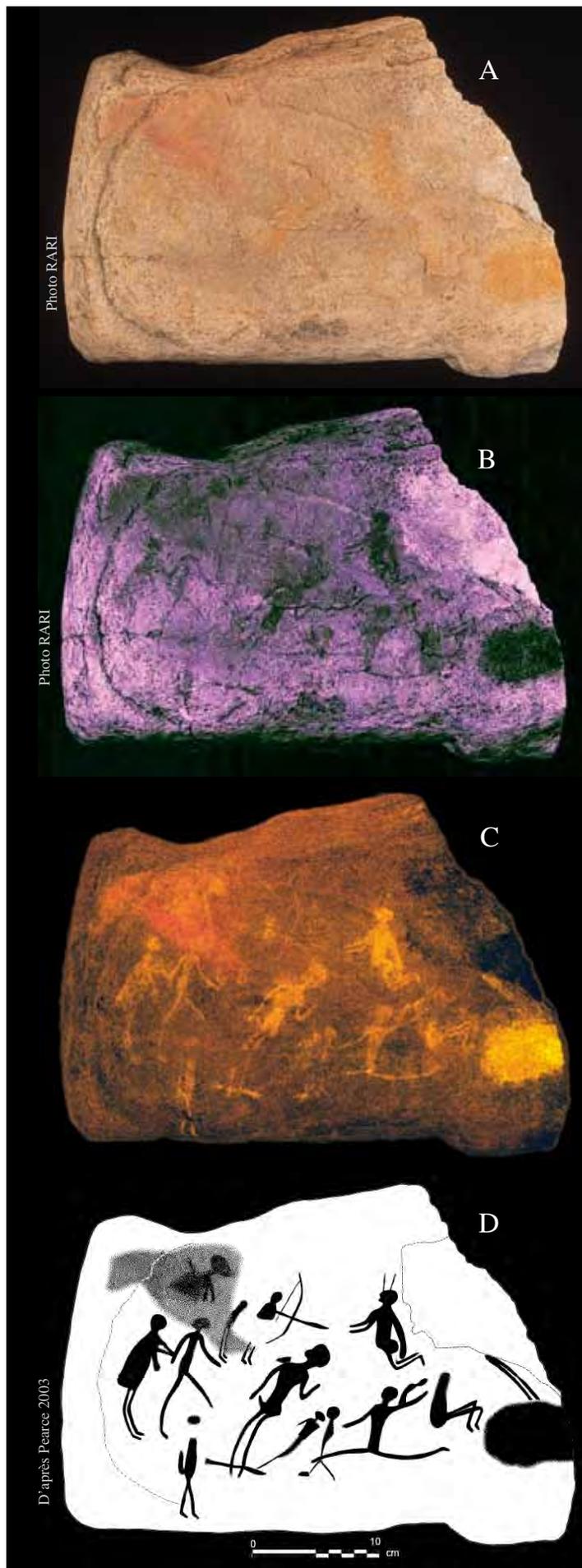
Dans la perspective d'une normalisation des procédures, il nous semble qu'un code de bonne conduite devrait être promu dans ce domaine, avec trois nécessités :

- 1/ ne jamais ajouter de nouveaux pixels sur une photographie;
- 2/ toujours documenter la procédure suivie;
- 3/ toujours publier la photographie de départ près de celle qui a été modifiée (ainsi que le recommandaient déjà Liam Brady et Robert Gunn (Brady, Gunn, McDonald *et al.* 2012 : 632).

Remerciements :
Nous remercions vivement Gianna Giannelli, Fabio Mastrucci, Ben Smith (RARI), Robert Vernet et Louis-Noël Viallet pour les documents qu'ils nous ont aimablement communiqués. Merci également à Hervé Paitier, photographe à l'INRAP, qui est l'auteur du traitement de la fig. 50. Merci à Maxence Bailly (LAMPEA- UMR 7269 : Aix-Marseille Université) pour sa participation à l'enregistrement photographique du site des Oullas.

Fig. 53. Tesson peint de la région de Nouakchott (Mauritanie). À gauche : photo de départ ; à droite : traitement *DStretch-LXX* montrant plusieurs digitations qui étaient pratiquement invisibles au départ (Photo Robert Vernet).





Annexe :

DStretch et la photo aux ultraviolets

Au cours d'un séminaire organisé en novembre-décembre 2007 à Giant Castle (Afrique du Sud) par le CNRS, l'IFAS (Institut Français d'Afrique du Sud), le GDRI STAR (Science, Technologie et Art Rupestre) et le RARI (*Rock Art Research Institute*), l'un de nous (JLLQ) a eu l'occasion de comparer les résultats obtenus par la photographie aux UV et par *DStretch*®.

Le test a porté sur l'un des blocs peints découverts en avril 1999 par Joann Binnemann à Tierkloof (Eastern Cape, Afrique du Sud), dans une sépulture datée de 26AD à 126AD (Fig. A). Ce bloc, de 410 x 275 x 70 mm, qui porte des peintures sur les deux faces et faisait partie des pierres recouvrant le corps, est actuellement conservé par l'Albany Museum à Grahamstown (Binneman 1999, Pearce 2003a).

Selon David Pearce, qui a étudié ce document, « la photographie représente avec un degré de fidélité très variable la forme et, de façon plus importante, les couleurs des peintures, de même que la surface sur laquelle celles-ci ont été réalisées. Néanmoins, cette technique est impuissante à montrer les [...] peintures extrêmement passées, comme c'est souvent le cas. C'est alors que le calque est particulièrement efficace; aucune autre technique ne permet actuellement de représenter avec une telle précision les menus détails d'une image très effacée » (Pearce 2003b: 8). Pour ces raisons, l'auteur a testé sur ce bloc la photographie aux infra-rouges et aux ultraviolets, et il a publié les résultats obtenus. La première technique n'a rien donné, mais la seconde a permis de distinguer une série d'anthropomorphes (Fig. B), et c'est à partir de ce document qu'un relevé (Fig. D) a été dessiné à la main, par calque sur la photographie.

Grâce à l'amabilité de Ben Smith, alors directeur du RARI, il a été possible d'examiner la photographie aux ultraviolets (Fig. B) et de la comparer avec un traitement *DStretch*-YXX (Fig. C) d'une excellente photographie de la pierre (Fig. A). La comparaison de la photographie aux ultraviolets avec le résultat obtenu par *DStretch*® est très en faveur de ce dernier, non seulement à cause de l'excellence des résultats, mais aussi par la grande facilité d'obtention.

Références

- Alley Ronald E. 1996. *Algorithm theoretical Basis Document for Decorrelation Stretch Version 2.2*. Pasadena: Jet Propulsion Laboratory, 18 p.
- Arcá Andrea 1994. Ubaye - La roche des Poinçards. *Europreart* http://www.europreart.net/cgi-bin/baserun.cgi?_cfg=record.cfg&_fil=code%3D%22uboul001%22 : Consulté le 11 juillet 2011.
- 2004. Ubaye St. Paul (Hautes-Alpes, France): the daggers Rock. In Stefania Casini & Angelo Euegenio Fossati (Eds.), *Le pietri degli dei : statue-stele dell'Età del Rame in Europa* (pp. 371-373). Bergamo: Civico Museo archeologico. (Notizie archeologiche bergomensi 12).
- Binneman Johann 1999. Mummified human remains from the Kouga Mountains, Eastern Cape. *The Digging Stick* 16(2): 1-3.
- Brady Liam M. 2006. Documenting and Analyzing Rock Paintings from Torres Strait, NE Australia, with Digital Photography and Computer Image Enhancement. *Journal of Field Archaeology* 31(4): 363-379.
- 2007. A different look: comparative rock-art recording from the Torres Strait using computer enhancement techniques. *Australian Aboriginal Studies* 1: 98-115.
- Brady Liam M., Robert G. Gunn, Jo McDonald & Peter Veth 2012. Digital Enhancement of Deteriorated and Superimposed Pigment Art: Methods and Case Studies In Jo McDonald & Peter Veth, *A companion to rock art* (pp. 627-643). Oxford: Blackwell.
- Breuil Henri 1955. *The White Lady of the Brandberg*, with collaboration of Mary Boyle and DR. E.R. Scherz. London: Trianon Press, x-31 p., 22 pl., 17 photos
- Cassen Serge & Guillaume Robin 2010. Recording Art on Neolithic Stelae and Passage Tombs from Digital Photographs. *Journal of Archaeological Method and Theory* 17(1): 1-14.
- Cassen Serge, Guillaume Robin, B. Lefèbvre, & M. Merheb 2006. Moving the immovable. A short study of methods of recording and illustrating Neolithic engraved steles in Brittany In *Virtual Retrospect, Archéologie et réalité virtuelle, colloque international ESTIA/ CNRS, nov. 2005, Biarritz* (pp. 187-193). Bordeaux: Ausonius Éditions. (Archéovision 2).
- Chabin Marie-Anne 2000. Document trace et document source. La technologie numérique change-t-elle la notion de document ? *Information-Interaction-Intelligence* 4(1): 141-157.
- Clogg Phil & Margarita Diaz-Andreu 2000. Digital Image Processing and the Recording of Rock Art. *Journal of Archaeological Science* 27: 837-843.
- De Cola Lorenzo 1995. Pulizia elettronica (P.E.) di dipinti e graffiti rupestri. *Les Cahiers de l'AARS* 3: 19-21.
- 1997. Sefar: un parziale inedito del periodo delle "Teste Rotonde" rilevato per mezzo della pulizia elettronica (P.E.). *Sahara* 9: 140-142.
- De Cola Lorenzo, Maria Emilia Peroschi, & Flavio Cambieri 2009. Il sovrano della Water Mountain e i suoi prigionieri. Osservazioni su un dipinto in ocre rossa nel Deserto Occidentale egiziano. *Sahara* 20: 140-142, et pl. E1-E3.
- Cola, Lorenzo de 1999. L'Ostentazione della virilità : I risultati combinati della Pulizia Elettronica (P.E.) e del rilievo tradizionale applicati a un dipinto di Sefar. *Sahara* 11: 134-136.
- David Bruno, John Brayer, Ian J. McNiven & Alan Watchman 2007. Why digital enhancement of rock paintings works: rescaling and saturating colours. *Antiquity* 75(290): 781-792.
- Defrasne Claudia & Maxence Bailly, à paraître. Les Oullas: an image bearing rock shelter on a Neolithic Alpine path ? In : *Actes du colloque «Autour du Petit-Chasseur», International conference in Sion, Valais, Switzerland, 27-30 octobre 2011*, 8 p.
- Domingo Inés, Valentín Villaverde, Esther López-Montalvo, José Luis Lerma & Miriam Cabrelles 2013. Latest developments in rock art recording: towards an integral documentation of Levantine rock art sites combining 2D and 3D recording techniques. *Journal of Archaeological Science* 40(4)
- Domingo Sanz Inés & Esther López-Montalvo 2002. Metodologia: el proceso de obtencion de calcos o reproducciones. La Cova dels Cavalls en el barranc de la Valltorta In Rafael Martínez Valle & Valentín Villaverde Bonilla (Eds.), *La Cova dels Cavalls en el Barranc de la Valltorta* (pp. 75-81). Tírig: Museu de la Valltorta (Monografías del Instituto de Arte Rupestre 1).
- Fagnola Ferdinando 1995. Une nouvelle hypothèse d'étude pour les peintures du Tassili Acacus, périodes des Têtes Rondes, d'inspiration présumée hallucinée. *Actes de l'assemblée annuelle de l'Association des Amis de l'Art Rupestre Saharien*; Arles, 13-15 mai 1994 : 4-8.
- Fernández Ruiz Marcos & Liliana Spanedda 2013. Abrigo con arte rupestre de El Tablazo II (Diezma, Granada). Revisión con DStretch de los motivos pintados. *Bastetania* 1(9): 78-81.
- Fouilleux Bernard 2007. À la redécouverte des fresques du Tassili: le crocodile, le rhinocéros et le lotori. *Sahara* 18: 180-182
- Fredlund Glen & Linea Sundstrom 2007. Digital infrared photography for recording painted rock art. *Antiquity* 81(313): 733-742.
- Fritz Carole & Gilles Tosello 2007. The Hidden Meaning of Forms: Methods of Recording Paleolithic Parietal Art. *Journal of Archaeological Method and Theory* 14(1): 48-80.
- Gunn R.G., C.L. Ogleby, D. Lee & R.L. Whear 2010. A method to visually rationalise superimposed pigment motifs. *Rock Art Research* 27(2): 131-136
- Hachid Malika, Jean-Loïc Le Quellec, Ali Amara, Lucile Beck, Évelyne Kaltnecker, Souhila Merzoug, Anita Quiles & Héléne Valladas 2012. Quelques résultats du projet de datation directe et indirecte de l'art rupestre saharien. In *The Signs of Which Times? Chronological and Palaeoenvironmental Issues in the Rock Art of Northern Africa* (pp. 71-94). Bruxelles: Royal Academy for Overseas Sciences.

- Hachid Malika, Jean-Loïc Le Quellec, Safia Agsous, Ali Amara, Lucile Beck, Frédérique Duquesnoy, Michel Grenet, Abdelkader Heddouche, Évelyne Kaltnecker, Norbert Mercier, Souhila Merzoug, Anita Quilès, Hocine Sahnoun, Hélène Valladas & Daniel Vigears 2010. Premiers résultats du projet algéro-français de datation directe et indirecte des images rupestres dans la Tassili-n-Ajjer. *Sahara* 21 : 27-58 et pl. III-IV.
- Harman Jon 2005. *Using Decorrelation Stretch to Enhance Rock Art Images*. http://www.petroglyphs.us/article_using_decorrelation_stretch_to_enhance_rock_art_images.htm/, 14 November 2013.
- Henderson James W. 2002. Digitizing the Past: A New Procedure for Faded Rock Painting Photography. *Canadian Journal of Archaeology* 26(1): 25-40.
- Hollmann Jeremy C. & Karl Crause 2011. Digital imaging and the revelation of 'hidden' rock art: Vaalekop Shelter, KwaZulu-Natal. *Southern African Humanities* (23): 56-76.
- Kamal Omar S., Gene Z. Ware, Stephen Houston, Douglas M. Chabries, & Richard W. Christiansen 1999. Multispectral image processing for detail reconstruction and enhancement of Maya murals from La Pasadita, Guatemala. *Journal of Archaeological Science* 26: 1391-1407
- Lachaud Gérard 2008. Les guerriers de Tazega Mellet (Tassili-n-Azjer). *Les Cahiers de l'AARS* 12: 197-207.
- Lachaud Suzie 2008. À propos de serpents mythiques: les peintures de serpents de Ti-Yaraghnin (Tassili de Tadjelahin, Algérie). *Les Cahiers de l'AARS* 12: 209-219.
- Le Quellec Jean-Loïc 2010. Datations directes et indirectes des images rupestres en Ahaggar, Tassili-n-Ajjer et Atlas saharien. *Les Nouvelles de l'archéologie* (120-121): 49-56.
- 2010. *La Dame Blanche et l'Atlantide. Enquête sur un mythe archéologique*. Arles: Errance / Actes Sud, 286 p.
- López-Montalvo Esther & Inés Domingo-Sanz 2009. Nuevas técnicas aplicadas a la documentación gráfica del Arte Levantino: valoración crítica del método tras un década de experimentación In José Antonio López Mira, Rafael Martínez Valle, & Consuelo Matamoros de Villa (Eds.), *El arte rupestre del Arco Mediterráneo de la península ibérica. 10 Años en la Lista del Patrimonio Mundial de la UNESCO. Actas del IV Congreso*. Valencia, 3, 4 y 5 de diciembre de 2008 (pp. 295-302). Valencia: Generalitat Valencia.
- Loève Michel 1955. *Probability Theory: Foundations, Random sequences*. New York: van Nostrand Company, xv-515 p.
- Maestrucci Fabio & Gianna Giannelli 2008a. La fotografia nella documentazione dell'arte rupestre: Tecniche e metodi del rilievo fotografico. *Les Cahiers de l'AARS* (12): 221-231
- 2008b. Imagini del Tadjelahin elaborate con il plug-in DStretch. *Les Cahiers de l'AARS* 12: 233-248.
- Mark Robert & Evelyn Billo 2006. Computer-assisted photographic documentation of rock art. *Coalition CSIC Thematic Network on Cultural Heritage. Electronic Newsletter* 11 (<http://www.rtpc.csic.es/PDF/NL11.pdf>), accessed Aug. 10th 2013): 10-14.
- 2011. Using super-high resolution panoramas (Gigapans) to document and study rock art panels. *Bulletin de la Société Préhistorique Ariège-Pyrénées* 65-66: 1257-1264.
- Mars Rover Press Release 2004. <http://marsrover.nasa.gov/gallery/press/opportunity/20040701a.html/> : Consulté le 21 nov. 2013.
- McNiven Ian J., Bruno David, Liam Brady & John Brayer 2004. Kula Rock-Art Site, Dauan Island, Torres Strait. *Memoirs of the Queensland Museum, Cultural Heritage Series* 3(1): 227-256.
- Menardi Noguera Alessandro, Stefano Laberio Minozzi, & Michele Soffiantini 2007. Old tracks and rock art sites on the Emeri Highland, Jebel Uweinat (Libya). *Sahara* 18: 47-68.
- Mercier Norbert, Jean-Loïc Le Quellec, Malika Hachid, Safia Agsous, & Michel Grenet 2012. OSL dating of quaternary deposits associated with the parietal art of the Tassili-n-Ajjer plateau (Central Sahara). *Quaternary Geochronology* 10: 367-373.
- Montero Ruiz Ignacio, Angel L. Rodríguez Alcalde, Juan Manuel Vicent García, & María Cruz Berrocal 1998. Técnicas digitales para la elaboración de calcos de arte rupestre. *Trabajos de Prehistoria* 55(1): 155-169.
- Muzzolini Alfred 1995. *Les images rupestres du Sahara*. Toulouse: A. Muzzolini, 447 p., 515 fig.
- Müller André & Maurice Jorda 1987. *Prospections et inventaire archéologique de la vallée de l'Ubaye de 1987 à 1989*. Service Régional de l'Archéologie PACA, 70 p.
- Müller André, Maurice Jorda, & Jean-Marie Gassend 2004. L'occupation humaine de la vallée de l'Ubaye et les modalités du peuplement de la zone intra-alpine. *Méditerranée* 1-2: 95-108.
- Ortiz-Sanz J., M. de la Luz Gil Docampo, S. Martínez Rodríguez, M.T. Rego Sanmartina, & Gonzalo Mejjide Cameselle 2010. A simple methodology for recording petroglyphs using low-cost digital image correlation photogrammetry and consumergrade digital camera. *Journal of Archaeological Science* 37(12): 3158-3169.
- Pearce David G 2003a. The Tierkloof painted burial stones. *South African Journal of Science* 99: 125-127
- 2003b. Ultraviolet photography as an aid to copying painted stones. *The Digging Stick* 20(3): 8-9.
- Pigeaud Romain, avec Jean-Loïc Le Quellec, Hervé Paitier & Vincent Pommier 2012. *Prospection avec relevés d'art rupestre dans la vallée de l'Erve (grotte Mayenne-Sciences et grotte Margot, commune de Thorigné-en-Charnie, Mayenne)*. Paris / Rennes: Programme UMR 6566 du CNRS CReAAH, 108 p.
- Plets Gertjan, Geert Verhoeven, Dimitry Cheremisin, Ruth Plets, Jean Bourgeois, B. Stichelbaut, Wouter Gheyle, & Jeroen De Reu 2012. The deteriorating préservation of the Altai Rock Art: assessing three-dimensional image-based modelling in rock art

- research and management. *Rock Art Research* 29(2): 139-156.
- Plets Gertjan, Wouter Gheyle, Geert Verhoeven, Jeroen De Reu, Jean Bourgeois, Jeroen Verhegge, & Birger Stichelbaut 2012. Towards a Three-Dimensional Registration of the Archaeological Heritage of the Altai Mountains. *Antiquity* 86(333): 884–897.
- Quesada Martínez Elia 2010. Extensión DStretch del software Image-J. Avance de resultados en el Arte Rupestre de la Región de Murcia. *Cuadernos de Arte Rupestre* 5: 14-47
- Read Emma J. & Christopher Chippendale 2000. Electronic drawing or manual drawing? Experiences from work with rock-paintings In V. Cummings, C. Buck, C. Henley, S. Mills, & S. Trick (Eds.), *Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology: Proceedings of the Fourth Meeting, Cardiff University, February 27 and 28, 1999*. (pp. 59 - 79). Oxford: Archaeopress. (British Archaeological Reports, International Series 844).
- Rogerio Candelara Miguel A. 2010a. *Técnicas de análisis digital de imágenes para la documentación integral de la pintura rupestre*. Séville, Thèse de Doctorat de l'Université de Seville, 385 p., 163 fig., 24 tabl.
- 2010b. *Experiencias en la documentación de pintura rupestre utilizando técnicas de análisis de imagen: avances hacia el establecimiento de protocolos de documentación no invasivos*. Centro de Estudios de Arte Rupestre. Ayuntamiento de Moratalla: Cuadernos de arte rupestre, 20 p.
- Russell Thembi 2000. The Application of the Harris Matrix to San Rock Art at Main Cave North, Kwa-Zulu-Natal. *South African Archaeological Bulletin* 55(171): 60-70.
- Sansoni Umberto 1994. *Le più antiche pitture del Sahara. L'arte delle Teste Rotonde*. Milano: Jaca Book, 323 p.
- Schoonraad Murray 1965. Ons rotskuns: kopieë vanaf foto's. *South African Journal of Science* 61: 392-394.
- Simpson Alice, Phil Clogg, Margarita Díaz-Andreu, & Brian Larkman 2004. Towards three-dimensional non-invasive recording of incised rock art. *Antiquity* 78: 692-698.
- Soha J.M. & A.A. Schwarz 1979. Multispectral histogram normalization contrast enhancement. *Proceedings of the 5th Canadian Symposium on Remote Sensing, Victoria, British Columbia, Canada, August 28-31, 1978* (pp. 86-93). Ottawa: Canadian Aeronautics and Space Institute.
- Soleilhavoup François 2007. *L'art mystérieux des TÊTES RONDES au Sahara*. Dijon: Faton, 280 p.
- Thackeray Francis & Thembi Russell 2004. Rock Painting of Roan Antelope at Giant's Castle, Kwazulu-Natal. *The Digging Stick* 21(3): 18.
- Trustram-Eve Nick 2005. *A geo-spatial analysis of alpine rock art*. York: York University. Department of Archaeology, Master Dissertation, 124 p.



Fig. 54. Tesson peint de la région de Nouakchott (Mauritanie). À gauche : photo de départ ; à droite : traitement DStretch -LXX avec filtres jaune, cyan et bleu, de manière à mettre les peintures rouges en valeur (Photo Robert Vernet).