HAL
open science

La Ségognole : propriétés et altérations des parois gravées.

Médard Thiry

▶ To cite this version:

Médard Thiry. La Ségognole : propriétés et altérations des parois gravées.. 2018. hal-01889659

HAL Id: hal-01889659
https://minesparis-psl.hal.science/hal-01889659

Submitted on 19 Nov 2018

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.

Art rupestre préhistorique dans les chaos gréseux du Bassin parisien (ARBap)

Étude, archivage et valorisation

Programme collectif de recherche

coordonné par Boris VALENTIN (UMR 7041 – université Paris 1)

Travaux d'Alain BÉNARD, Fantine BELLANGER, Guillaume BÉNAILY, Béatrice BOUET, Alexandre CANTIN, Quentin CLABEAU, Lauren COSTA, Cécile DARDIGNAC, Emmanuel GUY, Yann LE JEUNE, Émilie LESVIGNES, Aurélia LUREAU, Éric ROBERT, Vanessa ROMERO, Régis TOUQUET & Boris VALENTIN

Rapport d'activités pour 2017

© É. Lesvignes/PCR ARBap

DRAC Île-de-France, Service régional de l'archéologie

INRAP Centre Île-de-France,
UMR 7041, 7194 & 8215
Muséum National d'Histoire Naturelle & université Paris 1

CHAPITRE 11
LA SÉGOGNOLE : PROPRIÉTÉS ET ALTÉRATIONS DES PAROIS GRAVÉES

Médard Thiry, *Mines ParisTech, PSL Research University*

1. L'aptitude des parois à la gravure

D'une manière générale les Grès de Fontainebleau sont très durs. C'est pour cette propriété qu'ils ont été intensément exploités pour le pavage des rues de Paris. Néanmoins, il existe en carrière des grès tendres, presque friables dans la masse (les grès dits « paf » autrefois par les carriers par référence au son sourd qu'ils émettent quand ils sont frappés au marteau). Mais ces grès tendres ne sont pas connus à l'affleurement : tendres et friables ils ne résistent pas à l'érosion et à l'altération.

1.1 Propriétés

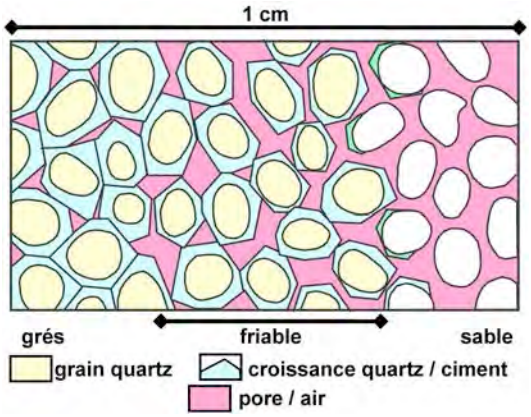

Figure 1 – Gradient de silicification entre sable et grès à l'origine du cortex friable utilisé pour les gravures.

Les cortex friables qui ont été gravés par les hommes préhistoriques résultent du processus de silicification du sable. C'est la zone de passage entre sable et grès, avec cimentation incomplète au front de silicification (fig. 1). L'épaisseur du cortex friable et son gradient de dureté ou de friabilité dépendent des conditions de silicification, probablement surtout du gradient de température plus ou moins étalé qui a induit la précipitation de la silice et des conditions d'écoulement des eaux nourricières (voir M. Thiry, Première partie, chapitre 2, ce volume). Ce sont des conditions éminemment locales, variables à l'échelle décimétrique à métrique. Ces conditions peuvent varier drastiquement d'un fuseau (boudin) silicifié à son voisin.

En carrière, quand les grès viennent d'être extraits du sable et n'ont pas subi l'altération météorique, toutes les surfaces des grès sont friables. Il arrive que la face supérieure de certaines dalles sommitales soit plus dure car elle a déjà été altérée/dissoute par l'écoulement des eaux d'infiltration à sa

surface. En revanche, à l'affleurement il y a un fort contraste entre la texture de la surface des blocs et celle des cavités. Les blocs de grès à l'air libre n'ont jamais de cortex friable, leur surface est dure et couverte par des lichens qui leur confèrent la couleur grise plus ou moins foncée. Les surfaces extérieures primaires étaient friables, mais elles ont été altérées, leur cortex friable a été érodé et elles ne sont plus « grattables ». Seules les cavités à l'abri des intempéries ont conservé leur cortex friable originel, et la couleur claire des grès, ce sont elles qui ont été gravées. Mais quelques surfaces extérieures friables ont néanmoins été préservées, en particulier celles mises à l'affleurement par des déflations éoliennes relativement récentes et elles ont été préservées à la faveur d'un surplomb qui les a protégé de l'altération. Certains de ces surplombs ont été gravés (Thiry, Liron, 2012). Il faut envisager que des gravures ont très probablement aussi existé sur les parois extérieures de blocs, mais qu'elles ont été altérées depuis leur tracé, l'altération des surfaces gréseuses étant relativement rapide, bien connue sur la période historique.

Par ailleurs, il ne faut pas exclure à priori que certains cortex friables puissent résulter d'une dissolution préférentielle des auréoles de croissance des grains de quartz par des circulations d'eau. C'est le cas lors d'infiltrations à travers les platières, avec développement de structures pseudokarstiques (Thiry et al., 1984 ; Thiry, 2007). Néanmoins, l'origine de la friabilité est une question relativement formelle, ce qui compte c'est la friabilité.

1.2 Les différents types de cortex des grès

La silicification s'étant faite par accrétions de corps siliceux formés successivement, dans des matériaux sableux quelque peu variables, qui ont conditionnés les écoulements des eaux silicifiantes, etc … il en résulte que chaque paroi, et même chaque élément morphologique des abris, présente des caractères qui diffèrent plus ou moins.

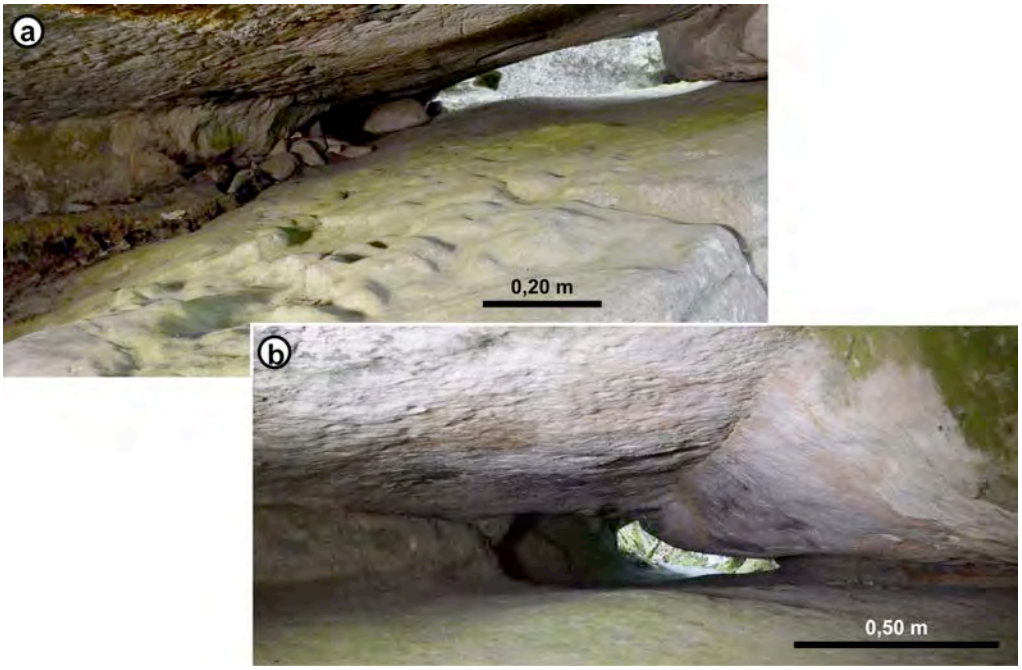

Figure 2 – La Ségognole 2 et 2 bis vues côté est vers ouest : opposition entre le toit et le plancher des conduits. (a) La Ségognole 2 (photo *ARBap_2017_7813* ; F. Bellanger) ; (b) La Ségognole 2bis (photo *ARBap_2017_7812* ; F. Bellanger).

Par exemple, les abris Ségognole 2 et 2bis[1] montrent une opposition forte entre le plafond et le plancher du conduit (fig. 2). Les fuseaux (boudins) silicifiés du toit sont formés de grès dur avec une bordure très nette, sans cortex friable, et même par endroit desquamation de fins feuillets de grès quartzite dur. En revanche, leur plancher comporte un cortex plus tendre, avec figures d'altération/dissolution par les eaux de pluie qui suintent du plafond pour Ségognole 2 et relativement plus régulier pour Ségognole 2bis. Malgré les irrégularités, le plancher de Ségognole 2 comporte quelques quadrillages peu profonds. Le développement d'un voile végétal vert (algaire ?) apparaît comme un bon indicateur d'un support poreux, donc friable.

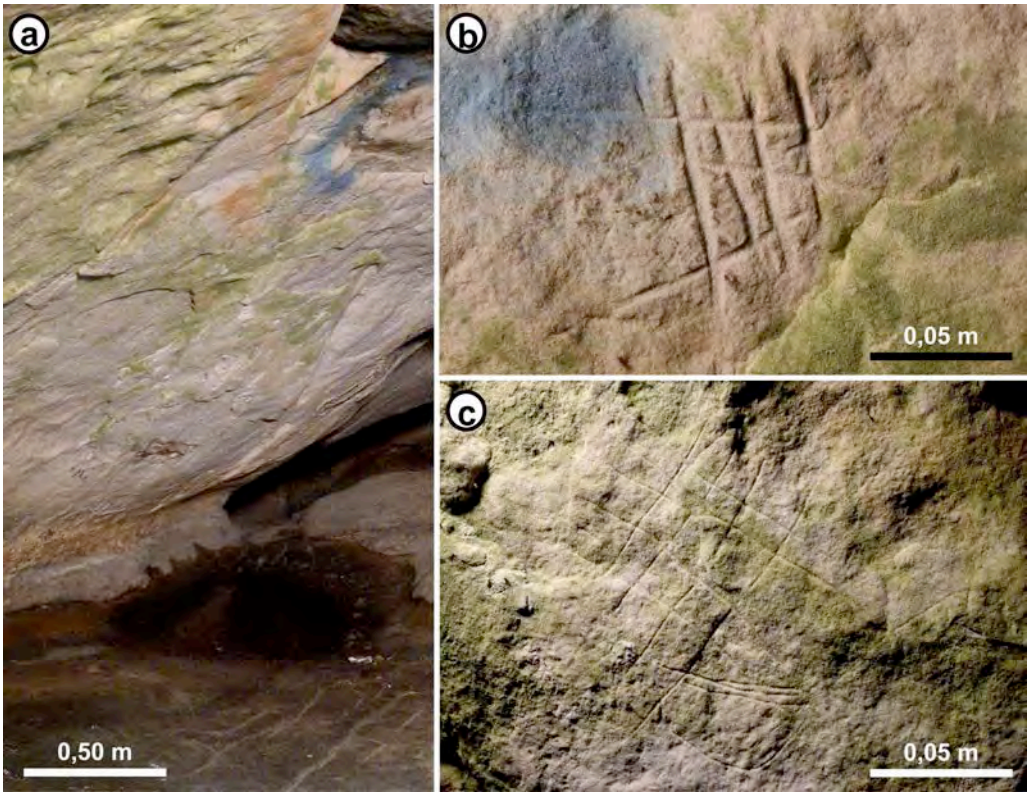

Figure 3 – La Ségognole 3sud-est : paroi en grès quartzite dur avec desquamations en feuillets. (a) Les feuillets plus internes sont plus durs, n'ont pas de cortex friable et ils ne sont pas gravées (photo *ARBap_2017_7842* ; F. Bellanger) ; (b) cortex moins dur et plus friable (photo *ARBap_2017_7875* ; F. Bellanger) ; (c) cortex plus dur et moins friable se côtoient à l'échelle décimétrique (photo *ARBap_2017_7872* ; F. Bellanger).

Les surfaces relativement nettes et dures dominent dans l'abri de la Ségognole 3 (abri du cheval paléolithique). Elles ont souvent affectées par diverses desquamations qui seront détaillées plus loin. Des quadrillages voisins sur la paroi sud (côté est) illustrent bien la variabilité d'une même surface à l'échelle décimétrique (fig. 3a) avec un quadrillage à sillons relativement profonds, larges et tracés rectilignes sur un cortex friable (fig. 3b) et des sillons moins profonds et tracés plus irréguliers, avec déviations par les irrégularités du support, sur une « écaille » plus interne et plus dure (fig. 3c).

[1] La numérotation des abris est celle du GERSAR (Bénard, 2007) augmentée de la numérotation de certains blocs qui ne sont pas gravés, mais qui ont été pris comme référentiel pour l'étude des altérations. La disposition et la numérotation des blocs est indiquée sur la figure 16 dans M. Thiry, Première partie, chapitre 2, ce volume.

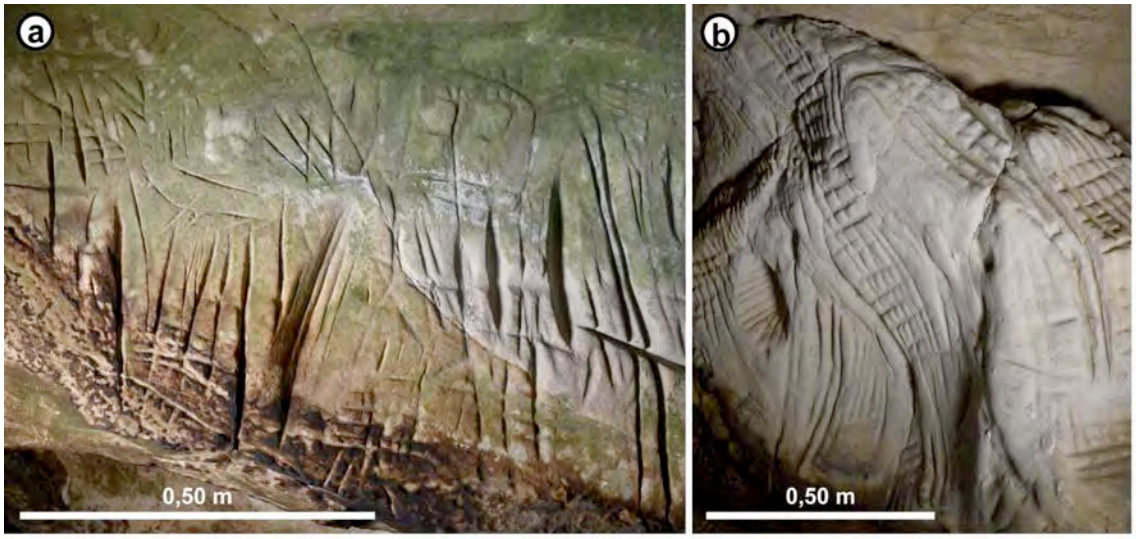

Figure 4 – La Ségognole 4 et 5 : foisonnement de sillons profonds dans les parois à cortex friable profond. (a) La Ségognole 5, milieu paroi sud : la taille des sillons reflète directement la variabilité de dureté du support. Il faut noter que la taille des sillons a « débordé » sur la croûte sombre qui recouvrait le cortex friable (photo *ARBap_2017_7932* ; F. Bellanger) ; (b) La Ségognole 4, paroi nord-ouest : protubérance de grès tendre, les sillons très longs sont onduleux, guidés par le relief de la paroi (photo *ARBap_2017_7988* ; F. Bellanger).

Des cortex friables et épais forment l'essentiel des parois des abris de la Ségognole 4 et Ségognole 5 (fig. 4). C'est la présence de ces cortex facile à graver qui est à l'origine du foisonnement des gravures dans ces abris. Les sillons y sont profonds et larges, souvent presque aussi larges que profonds, jusqu'à plus de 1 cm de profondeur. Les sillons moins marqués, et souvent plus étroits, marquent toujours des surfaces plus cohérentes et/ou à cortex moins épais. Ces abris sont aussi remarquables par la présence de sillons plus profonds (jusqu'à 2-3 cm ?) et en même temps plus longs (jusqu'à 50 cm) qui marquent des zones où le grès est moins cimenté et plus friable dans la masse (grès « paf »). Il conviendrait de vérifier si ces sillons ont atteint le grès dur ou demeurent dans le grès tendre. Il est probable que c'est moins une volonté de tracer des sillons profonds qu'une opportunité de le faire qui a conduit à ces singularités « stylistiques ». Les seules surfaces non gravées des abris de Ségognole 4 et Ségognole 5 sont des surfaces en fond d'abri, au voisinage de fentes d'infiltration des eaux qui ont altéré et induré les cortex friables primaires avec dépôts de croûtes noires.

Figure 5 – La Ségognole 5 : plancher à l'entrée. Le plancher est lisse, sans rugosité, à l'évidence abrasé par la fréquentation de l'abri (photo Médard Thiry).

Les planchers gravés de Ségognole 3-4-5 ne montrent jamais de cortex friable qui s'effrite et ils sont toujours réguliers et lisses, sans marque de desquamation, d'altération, ou d'encroûtement. Le phénomène est particulièrement frappant en comparant la profondeur des sillons et la rugosité des surfaces aux planchers (fig. 5) et sur les flancs des parois attenantes : sillons moins profonds et plancher lisse au centre de l'abri et sillons plus profonds et surface rugueuse et irrégulière sur les flancs. On peut faire l'hypothèse que ces planchers ont été altérés par les eaux de pluie qui ont pu y ruisseler. Mais les planchers relativement friables des abris non gravés de Ségognole 2 et 2bis ont gardé leur morphologies irrégulières et rugueuses (fig. 2), alors qu'ils sont à l'évidence soumis à une exposition aux intempéries au moins aussi forte que les autres abris. Il est plus vraisemblable que les planchers gravés de Ségognole 3-4-5 ont été usés et érodés par la fréquentation des abris. Nous reviendrons plus loin sur les indices de datation de ces érosions.

1.3 Répartition et signification des cortex friables

Figure 6 – La Ségognole 5bis : conduit de grès friable dans la continuité de Ségognole 5. Noter la structure en fuseaux/tunnel d'allongement est-ouest (photo Médard Thiry).

Il existe une variation des cortex friable à l'échelle du conduit principal d'où sont issus les différents abris gravés de la Ségognole[2]. Les cortex sont plus friables/tendres et plus épais dans la partie occidentale de l'alignement des abris (Ségognole 4 et Ségognole 5). Cette disposition se continue encore plus à l'ouest, où les cavités éventrées par la fracturation du conduit (Ségognole 5bis) montrent des grès tendres et des cortex friables épais (fig. 6), dans la continuité des cortex épais de Ségognole 5.

Ce gradient est concordant avec l'allongement des structures de silicification (fuseaux ou boudins) qui charpentent les différentes cavités et correspondent à l'écoulement des eaux silicifiantes de la nappe. Dans cette hypothèse, les parois dures sans cortex de l'est correspondraient à un front de silicification abrupt, lié à un gradient abrupt de température, et les parois à cortex friable et les grès moins durs de l'ouest seraient liées à un front plus étalé du froid et de la silicification. On peut aussi faire l'hypothèse que

[2] Voir la figure 16 dans M. Thiry, Première partie, chapitre 2, ce volume.

l'encaissant primaire avant silicification montrait un gradient fort entre matériaux perméables (qui ont été silicifiés) et matériaux moins perméables (qui ont été épargnés par la silicification au sein des conduits) entre l'est et l'ouest. Des observations complémentaires sont nécessaires pour trancher entre ces 2 hypothèses non contradictoires.

Quoi qu'il en soit, il paraît clair que cette disposition latérale est primaire, héritée de la géologie et de la sub-surface, avant mise à l'affleurement et qu'elle n'est pas liée à une altération de surface. Néanmoins, à l'échelle des abris cette disposition primaire est compliquée par des altérations plus tardives, liées à la mise à l'affleurement, avec : (1) altération des entrées d'abris soumises aux intempéries et (2) altération par des infiltrations d'eaux de surface le long des fractures.

2. Méthodes d'étude des échantillons

2.1 Nomenclature

Le grès présente des aspects de surface très variables. La texture et la couleur de la roche varient souvent ensemble. Dans la suite de l'exposé on parlera de « cortex friable » pour caractériser l'enveloppe (écorce) friable qui se superpose au grès dur dans les abris, et quand une pellicule d'altération affecte le grès ou le cortex friable on parlera de « film » quand transparaît la granularité du grès et de « croûte » quand une pellicule plus épaisse, lisse ou rugueuse, recouvre le grès.

Deux grands types d'altération tout à fait différentes peuvent être distingués sur les surfaces de grès exposés aux intempéries et dans les abris : (1) des altérations qui procèdent de changements minéralogiques et chimiques de la roche exposée à l'air, ce sont les altérations qu'on pourraient dénommer de « classiques » avec dissolution et précipitation de minéraux ; (2) des altérations moins souvent étudiées qui correspondent au développement d'organismes vivants sur les parois, à la faveur de l'humidité et/ou de la lumière. Les méthodes de caractérisation de ces deux types d'altération sont pour l'essentiel très différentes.

2.2 Échantillonnage

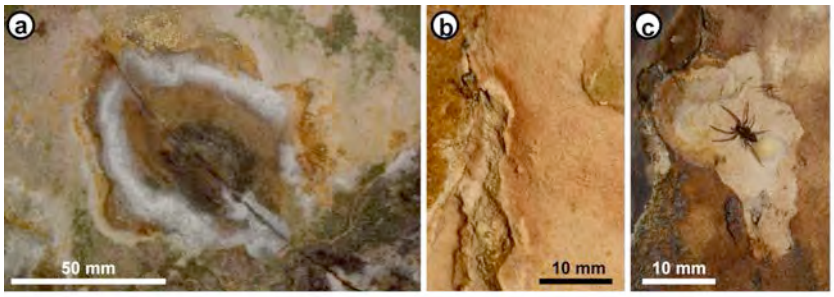

Figure 7 – La Ségognole 5bis et 3 : exemples de zones d'échantillonnage des pellicules de surface des grès après prélèvement. (a) plafond Ségognole 5bis : zones avec différentes facies autour d'une venue d'eau sur une fracture ; (b) Ségognole 3est : zone de desquamation de pellicules brunes ; (3) Ségognole 3est : pellicule brune prélevée sous laquelle est apparue une nidification d'araignée, échantillon 9113 (photos Médard Thiry).

L'échantillonnage a par principe été effectué sur des abris et des échantillons comparables à ceux des abris gravés. Ils peuvent être considérés comme des para-échantillons des sites gravés. L'abri sous-roche de Ségognole 5bis (fig. 6), correspondant à un conduit éventré par une fracture, a été particulièrement utile pour l'échantillonnage. Il peut être considéré comme un para-type d'abri gravé : il correspond à la prolongation du conduit de l'abri Ségognole 5 vers l'ouest et présente des altérations et modifications variées de la paroi similaires à celles des abris gravés de Ségognole 5, 4 et 3 (fig. 7a). D'autres cavités « annexes », correspondant à des conduits parallèles au conduit principal de la Ségognole, ont également été échantillonnées car elles sont encaissées dans les mêmes blocs de grès que ceux des abris gravés. N'ont été prélevés que de petits échantillons de grès (de 1 à 2 cm^3) en veillant à ce que les prélèvements ne soient pas apparents et susceptibles de susciter d'autres prélèvements par « mimétisme ».

Mais les cavités non gravées sont des cavités peu profondes, largement ouvertes sur l'extérieur et elles ne sont donc pas de parfaits équivalents des abris gravés. Ces cavités non gravées ne sont pas des conduits dans lesquels se font des circulations d'air et des condensations comme dans les abris gravés et généralement elles n'ont pas de voiles verts chlorophylliens. Aussi, quelques desquamations limitées à des pellicules d'épaisseur infra-millimétrique de quelques 100 à 500 mg, ont été prélevées dans les abris ornés, hors zones gravées, dans le double but : (1) d'assurer la représentativité des para-échantillons prélevés dans d'autres cavités et (2) de compléter l'échantillonnage pour des faciès spécifiques qui n'ont pas été trouvés dans les cavités annexes. Il n'a toujours été prélevé que des pellicules déjà libérées naturellement du support (desquamations), quelquefois sur les nidifications d'araignées (fig. 7 b et c) ; pour 2 échantillons, il s'agit de desquamations déjà tombées au sol.

2.3 Observations morphologiques

Les surfaces des grès ont été observées à la loupe binoculaire sur des éclats et pellicules de desquamation des grès (cf. *supra*, 2.2). Une loupe binoculaire *Leica EZ4HD* avec caméra numérique intégrée a été utilisée avec un traitement des images sous *Helicon Focus* qui permet de compiler des prises de vues faites à partir de mises au point sur des plans successifs (*focus stacking*), afin de recomposer des vues nettes même sur des profondeurs de champs qu'ont ne peut atteindre par le seul dispositif optique.

2.4 Analyses minéralogiques

Il est illusoire de vouloir pratiquer des tests HCl sur des cortex friables ou des grès tendres, l'acide est très rapidement absorbé par le support poreux, et ce n'est pas parce qu'on n'a pas observé d'effervescence que le grès n'est pas calcareux. Une observation utile, admise et confirmée par l'expérience, est que les grès de Fontainebleau qui supportent des toiles d'araignées sont des grès calcareux tandis que les grès-quartzites purement siliceux n'abritent pas d'araignées. On attribue ce comportement des arachnides au caractère thermique des grès : les grès calcareux seraient moins froids. Quand les toiles

d'araignées sont limitées à de petites cavités centimétriques, ces cavités correspondent à des nodules calcareux au sein d'une dalle siliceuse massive.

Pour des raisons d'organisation et de délais de mise en œuvre, il n'a pas été possible d'obtenir des analyses minéralogiques et chimiques pour ce rapport préliminaire. Toute une gamme matériaux d'altérations, comme les imprégnations ferrugineuses, les accumulations et concrétions calcaires, les efflorescences blanchâtres, etc. ne seront donc pas présentées dans ce rapport. Leur reconnaissance et leur inventaire sont en cours. Ces altérations seront présentées dans la prochaine phase de l'étude.

2.5 Analyse des recouvrements organiques

L'essentiel des travaux ont portés sur les matériaux d'origine organique qui recouvrent les parois des abris. Même si ces altérations ne sont pas souvent prises en compte dans les études d'altération, dans les cas des abris gravés c'est une composante majeure et qui recouvre sûrement plus de 90% des surfaces des abris, du moins pour le secteur de la Ségognole. L'observation à la loupe binoculaire a été favorisée, car c'est l'échelle d'observation qui convient pour l'étude des films et croûtes d'origine organique et leur relation avec les grains minéraux du grès.

Un test simple pour reconnaître la nature organique de ces recouvrements est de les attaquer à l'eau de Javel (NaClO, hypochlorite de sodium). L'eau de Javel est une solution liquide oxydante fréquemment utilisée comme désinfectant et comme décolorant. De nombreux composés organiques sont oxydés par l'eau de Javel, ce qui explique l'action décolorante (pouvoir blanchissant). Ce sont surtout les produits organiques moléculaires ou particules très fines qui sont attaqués. Les particules plus grosses résistent, mais sont blanchies en surface. Les tests effectués n'ont qu'une valeur qualitative.

L'eau de Javel est une solution basique dont le pH varie entre 11 et 12,5 pour les concentrations fortes. Du fait de ces pH très basiques, les oxydes de métaux (FeOOH, Mn_2O_3, et autres) ne sont pas mobilisés par l'eau de Javel. En revanche la solubilité de la silice augmente fortement aux pH basique, aussi un traitement à l'eau de Javel peut éventuellement entraîner une solubilisation (partielle) de la silice amorphe ou très faiblement cristallisée.

Une première série de tests a été effectuée *in situ* sur les parois des cavités non gravées par application répétée d'eau de Javel avec un coton-tige. Une seconde série a été faite sur des échantillons de taille centimétrique, précédemment observés à la loupe binoculaire, par immersion dans l'eau de Javel pendant 3 à 8 jours.

3. Composante organique des surfaces d'altération

3.1 Les indurations biologiques

Les composés organiques sont une part importante des surfaces d'altération des roches, et plus particulièrement des roches gréseuses, vraisemblablement en raison de leur nature poreuse. Les croûtes des roches liées à des facteurs biologiques sont appelées des BIRC (Biologically-Initiated Rock Crust)

(Grondona, et al., 1997 ; Alexandrowicz et al., 2014 ; Morillas et al., 2015 ; Slavík et al., 2017 ; Dorn et al., 2017 ; Gadd, 2017). Ce sont des bio-colonisations sur des surfaces gréseuses, communément formées par des champignons, des lichens, des cyanobactéries et des algues vertes. Ces organismes pénètrent entre les grains du grès, les cimentent entre eux, et à terme forment une induration de la surface du grés. Cette induration de surface forme une couche imperméable qui protège le matériel sous-jacent de la pluie et de l'érosion par ruissellement. Ces films et croûtes organiques forment aussi une barrière à l'évaporation des eaux porales du grès, ou concentrent l'évaporation sur des zones où la croûte est rompue. En carrière, des croûtes similaires se forment à la surface des grès blancs en une dizaine d'années après leur extraction des sables.

3.2 Tests à l'eau de Javel

Plusieurs tests ont été effectués pour : d'une part reconnaître le caractère organique de certains films et croûtes d'altération et d'autre part pour éventuellement révéler et distinguer des altérations minérales qui auraient été masquées par les composés organiques.

3.2.1 Tests *in situ*

Des tests d'attaque à l'eau de javel ont été pratiqués *in situ* sur plusieurs surfaces altérées dans des cavités annexes aux cavités gravées, en particulier Ségognole 5bis, Ségognole 5bis_amont et Ségognole 2_aval (fig. 24 et 25).

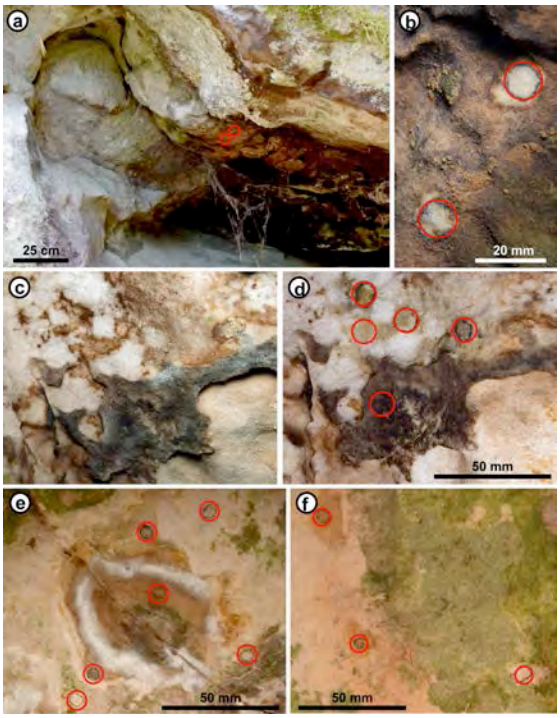

Figure 8 – La Ségognole 5bis : points d'attaque à l'eau de Javel des facies d'altération des grès. (a) et (b) le film brun est complètement blanchi par l'eau de Javel ; (c) et (d) les bariolages brun-rougeâtre sont attaqué à l'eau de Javel, mais subsiste une coloration grise, le cortex brun sombre n'est pas affecté. (e) les films algaires et les voiles gris clair sont blanchis, mais les cortex plus sombre ne sont pas affectés (voir fig. 7a pour faciès originel) ; (f) le film algaire est blanchi, en revanche le film brun clair n'est pas blanchi, mais la couleur est renforcée après attaque et diffuse sur toute la zone mouillée par l'eau de Javel (photos Médard Thiry).

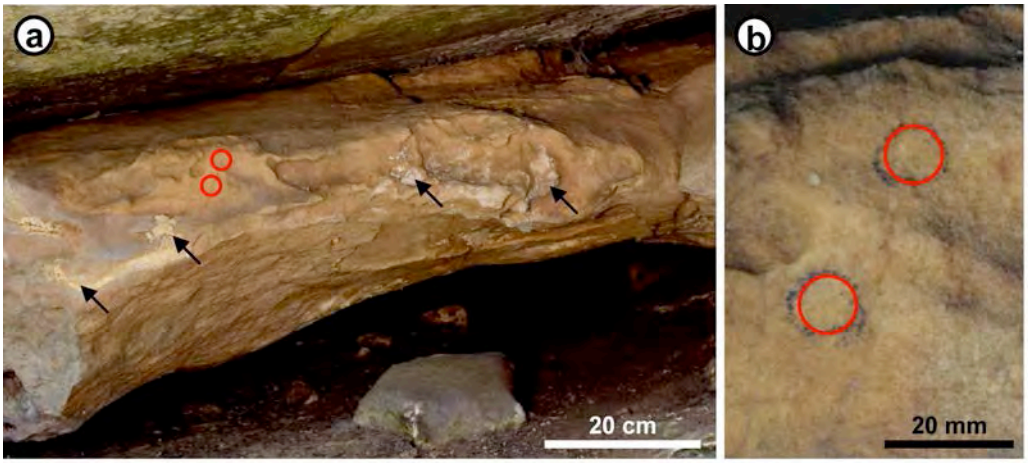

Figure 9 – La Ségognole 2_aval : attaque à l'eau de Javel des facies de grès brunâtre. (a) vue d'ensemble et position des points d'attaque ; les flèches pointent des pellicules blanches, probablement de la calcite (à vérifier) ; (b) détail : le grès n'est absolument pas décoloré, la couleur brune ne correspond pas à de la matière organique, mais vraisemblablement à des oxy-hydroxydes de fer (photos Médard Thiry).

Les attaques à l'eau de javel montrent des comportements variés vis-à-vis des différents faciès d'altération.

(1) Les films algaires sont rapidement blanchis et laissent généralement apparaître la granularité du grès sous-jacents, le film est entièrement dissout (fig. 8e et f).

(2) Les films brun clair et les croûtes gris clair sont également attaqués de manière sensible au bout de 3-4 applications (fig. 8b, d et e).

(3) Les cortex épais et plus sombres ne montrent pas d'évidence d'attaque (fig. 8e) ; pointant vraisemblablement une matière organique différente, plus importante, plus évoluée et plus résistante à l'oxydation.

(4) Certains faciès brun clair ne montrent pas de décoloration mais apparemment un renforcement de la couleur dans toute la zone imprégnée par l'eau de Javel (fig. 8f) ; on peut envisager une migration de particules fines sous l'effet de la capillarité ? ou une mise en solutions puis précipitation de pigments colorés ?

(5) Enfin, les faciès de grès ocre à brun, colorés dans la masse par des oxy-hydroxydes de fer (?) ne sont pas affectés par l'attaque (fig. 9).

Ces tests d'attaque à l'eau de javel confirment que les surfaces d'altération des grès présentent une importante composante organique.

3.2.2 Attaques prolongées par immersion.

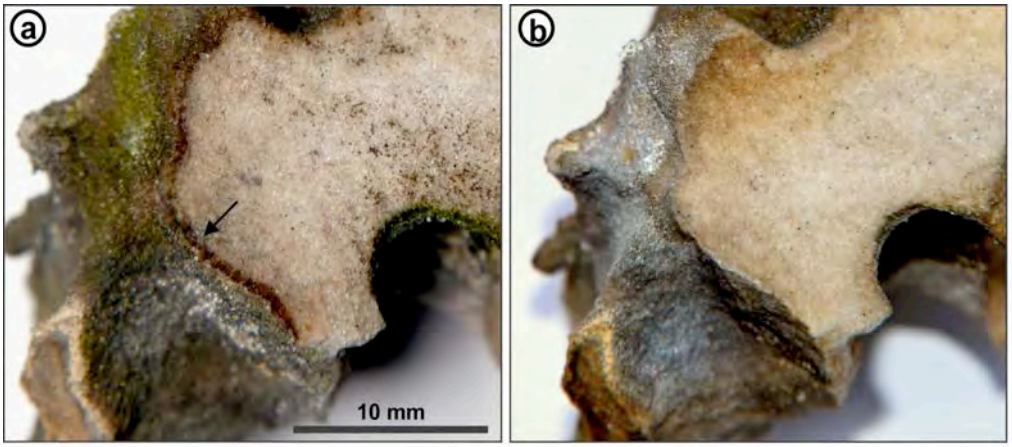

Figure 10 – La Ségognole 5bis (échantillon 9129) : cassure sur une structure d'altération alvéolaire (tafoni) sur la paroi extérieure. (a) cassure initiale, non traitée, la flèche indique le liseré brun sous-cortex ; (b) l'attaque à l'eau de Javel a complètement blanchi le liseré brun et des produits (concrétionné ?) blancs sont apparus sur le cortex extérieur (photos Médard Thiry).

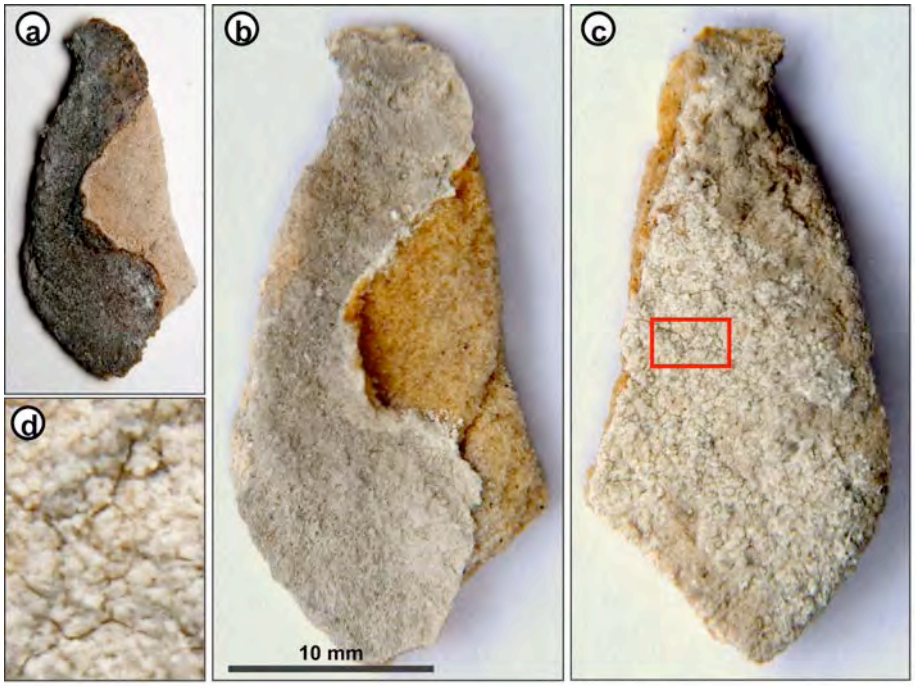

Figure 11 – La Ségognole 3est (échantillon 9117) : écaille de cortex sombre. (a) échantillon non traité montrant un décollement (desquamation) de la croûte noire ; (b) même face traitée à l'eau de Javel montre une granularité plus accentuée que la surface initiale ; (c) seconde face traitée avec granularité bien marquée (taille supérieure aux grains du grès ; (d) détail de (c) montre un réseau de fines fentes (retrait dessiccation ?) (photos Médard Thiry).

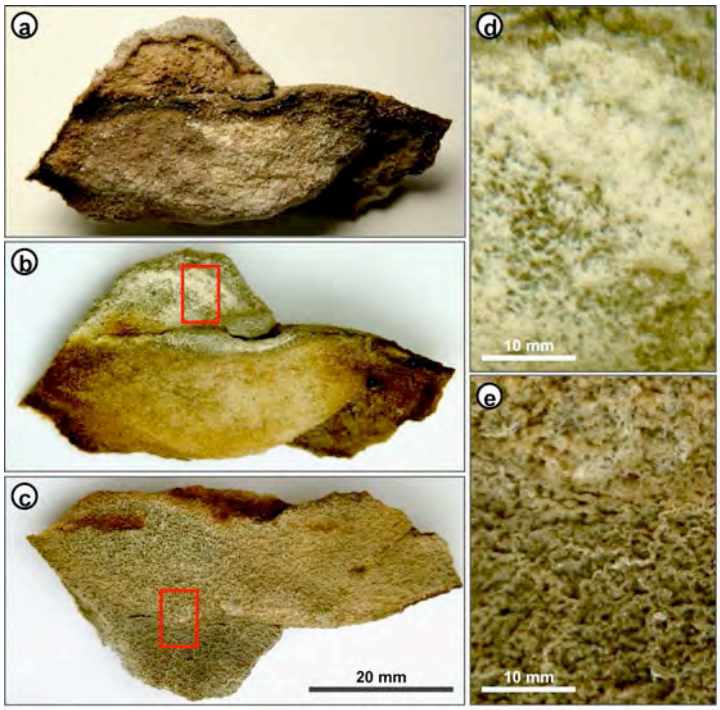

Figure 12 – La Ségognole 3est : écaille de cortex noir. (a) échantillon non traité montrant une surface de décollement entourée d'un bourrelet épaissi du cortex ; (b) même face blanchie à l'eau de Javel ; (c) verso blanchi à granularité bien marquée ; (d) détail de (b) avec apparemment des concrétionnements blancs. (e) détail de (c) montrant des réseaux contournés déterminant une structure alvéolaire (photos Médard Thiry).

Les attaques à l'eau de Javel sur des durées longues révèlent des structures sous-jacentes aux films organiques superficiels et occultés par ceux-ci.

(1) Tous les cortex noirs et épais sont attaqués plus ou moins intensément et il s'avère que les liserés bruns qui imprègnent le grès sous les cortex épais sont également attaqués et blanchis (fig. 10), ce qui confirme qu'il n'y a pas d'oxy-hydroxydes de Fe liés à ces cortex organiques.

(2) Comme pour les tests in situ, les grès beiges à ocre dans leur masse ne sont pas affectés par l'attaque (fig. 11) confirmant que ces colorations du grès sont dues à des oxy-hydroxyde de Fe.

(3) L'attaque de la matière organique de surface fait apparaître des structures nouvelles qui étaient cachées sous le voile organique superficiel, une granularité différente de celle du cortex sombre initial (Fig. 10b, 11d, 12d et e) ; des fentes de retrait (dessiccation ?) (fig. 11d), et apparemment aussi des dépôts ou concrétionnements minéraux (?) (fig12d).

Ces attaques prolongées à l'eau de Javel confirment l'importance des composés organiques dans les cortex sombres. Elles ne font pas apparaître d'oxy-hydroxydes de Fe associés aux composantes organiques, comme cela est souvent décrit dans la littérature. En revanche, elles révèlent des structurations internes des cortex qu'il convient de regarder à des grossissements plus forts au microscope électronique à balayage (MEB) pour leur analyse et interprétation.

4. Altération des grès en surface

Les surfaces des abris montrent des altérations d'intensité très variable, depuis les grès frais non altérés, les premières manifestation d'altération débutant par la formation de films infra-millimétriques,

quasi transparents, jusqu'aux croûtes indurées noires d'épaisseur millimétrique, qui masquent entièrement le grès sous-jacent. On a déjà évoqué plus haut (fig. 7b et c) comment ces films et croûtes d'altération superficielle se décollent localement. Elles sont donc susceptibles de dégrader les surfaces gravées. Il convient donc de reconnaître ces altérations et de comprendre où et quand se font ces dégradations et leur incidence éventuelle sur la préservation et la pérennité les gravures rupestres. Ces faciès sont présentés ici en allant de l'absence d'altération aux altérations les plus matures.

4.1 Les grès sans film ou croûte sur cassure fraiche

Figure 13 – La Ségognole 3est (échantillon 9117, sous croûte) : grès friable blanc vu à la loupe binoculaire. (a) les grès montrent des zones cimentées, denses et peu poreuses, et des zones plus relâchées, moins cimentées ; (b) dans les zones desserrées, plus poreuses, les grains de quartz montrent des faces cristallines résultant de leur nourrissage (photos Médard Thiry).

À la loupe binoculaire, les grès quelque peu friables montrent des grains de quartz translucides, relativement bien calibrés, d'environ 200 à 250 µm de diamètre (fig. 13a). Certains grains ont des formes géométriques qui correspondent à des faces cristallines du quartz et indiquent que les grains de sable ont été nourris par la silice des eaux lors de la cimentation des sables (fig. 13b). Quand le nourrissage devient plus important les grains se soudent et forment des amas compacts. Ce sont ces grains soudés entre eux qui donnent la cohésion au grès. Les zones moins cimentées, montrent des grains de quartz à faces de nourrissage. Le sable initial présentait éventuellement de la calcite mêlée aux grains de quartz. Les grains sombres sont des minéraux dits lourds qui accompagnent le quartz lors de la sédimentation.

4.2 Les voiles chlorophylliens

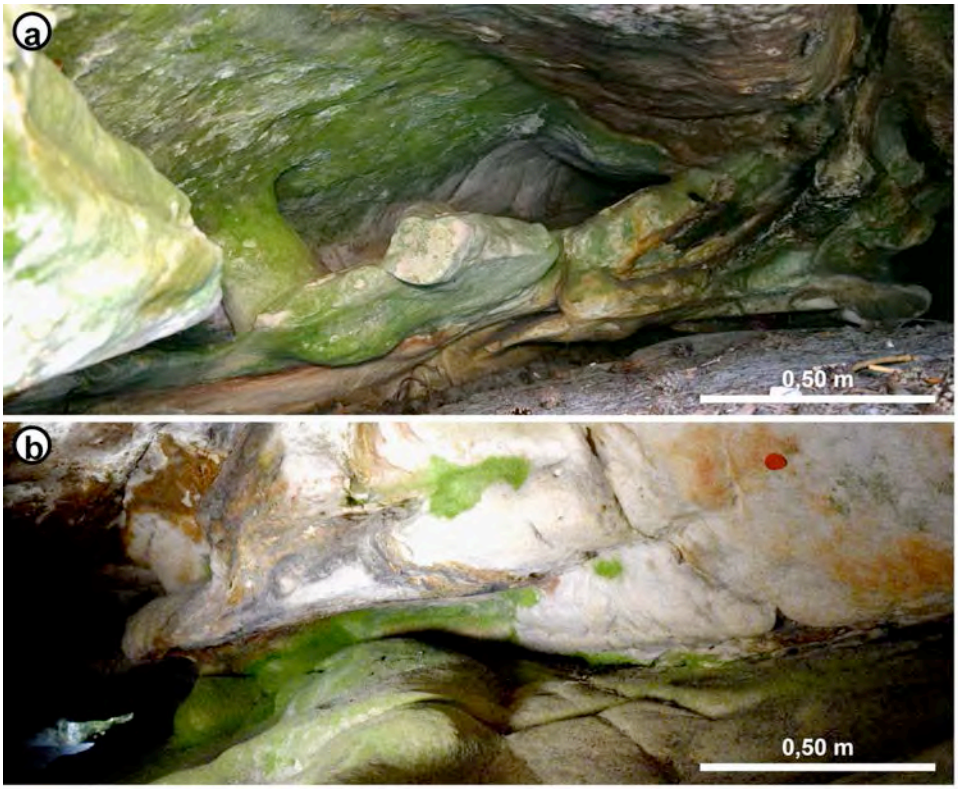

Figure 14 – La Ségognole 3 et 5 : voiles chlorophylliens sur les parois des abris. Ces voiles verts s'étendent très largement sur toutes les surfaces gréseuses relativement tendres et éclairées. (a) La Ségognole 5, paroi sud-ouest vers le fond (photo Médard Thiry) ; (b) La Ségognole 3, paroi nord-est : les voiles sont moins étendus, mais affectent aussi le plancher (photo *ARBap_2017_7857* ; F. Bellanger).

Des voiles verts, dus au développement de végétaux à chlorophylle, sont présents dans tous les abris, excepté la Ségognole 4 qui a été assombri quand les ouvertures ont été murées. Ces voiles chlorophylliens sont limités aux parois et protubérances qui ont une bonne exposition à la lumière (fig. 14). Néanmoins, la nature du support gréseux intervient aussi. Les voiles verts se développent préférentiellement sur les grès tendres poreux et présentant une certaine humidité, d'origine porale et/ou de condensation. Les surfaces gréseuses très quartzitiques, dures, sans porosité résiduelle ne sont jamais couverts (exemple Ségognole 3, paroi sud-est : fig. 3a).

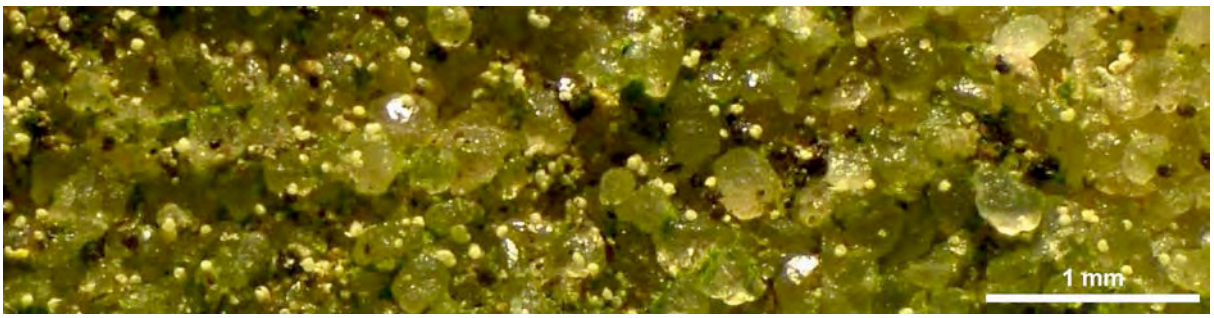

Figure 15 – La Ségognole 4 est, cavité au nord (échantillon 9126) : voiles chlorophylliens observés à la loupe binoculaire. Les grains de quartz sont bien reconnaissables. Les grains sombres sont des débris organiques décomposés/ Les grains ronds des pollens (pin ?) (photo Médard Thiry).

L'observation à la loupe binoculaire montre que les voiles sont relativement fins, quasi transparents (fig. 15). Ils se développent en profondeur dans le grès, jusqu'à la troisième ou quatrième épaisseur des grains de quartz, (0,5-0,8 mm), profitant de la transparence des grains de quartz des grès blancs. Ils donnent une cohésion entre les grains superficiels et les protègent de l'effritement. On reconnaît bien la forme des grains de quartz sous ces voiles algaires fins. Outre les voiles chlorophylliens, on y observe aussi les débris organiques divers (fils d'araignées, débris de plantes, etc.) des débris et tâches sombres qui correspondent à de la matière organique décomposée, et très souvent des éléments ronds inférieurs à 0,1 mm, appariés par 2 ou 3 et qui selon toute vraisemblance sont des grains de pollens.

De petites colonies vertes, non ou difficilement visibles à l'œil, existent souvent dans les creux à la surface des croutes indurées grises et noires (voir *infra*).

Il est communément admis que ces voiles chlorophylliens sont d'origine algaire. Cela reste à vérifier. Sûrement que d'autres organismes, comme des bactéries, des champignons, des lichens et des cyanobactéries fixatrices d'azote, voire des mousses, sont aussi associées à ces voiles chlorophylliens. Si ailleurs, à l'abri de la lumière, des organismes « non colorés » se développent dans des zones humides ils seront plus difficiles à détecter.

4.3 Les films bruns

4.3.1 Nature et origine

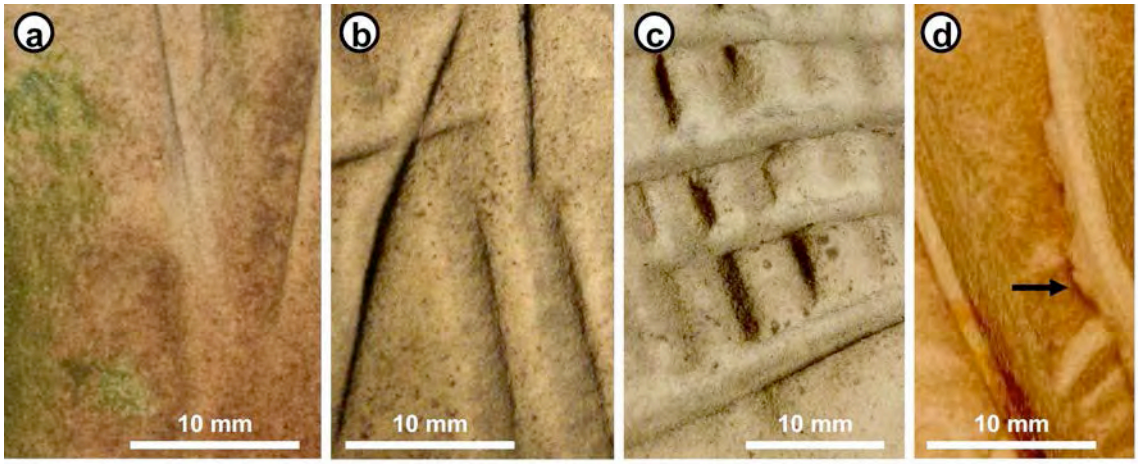

Figure 16 – La Ségognole 4 et 5 : film brun des surfaces gravées. (a) La Ségognole 5, paroi sud : détail de la granularité du parties les plus claires laissent transparaitre la granularité du grès (photo Médard Thiry) ; (b) La Ségognole 4, paroi nord : pigmentation et mouchetures caractéristiques des films bruns (photo *ARBap_2017_7979* ; F. Bellanger) ; (c) idem (photo *ARBap_2017_7982* ; F. Bellanger) ; (d) La Ségognole 5, paroi sud : détail de la granularité du film et cohésion donnée à la surface du grès soulignée par son écaillage (flèche) (photos Médard Thiry).

Des films bruns, plus ou moins accentués sont associés aux parois gravées et recouvrent souvent les sillons gravés. Dans le détail, le film est assez hétérogène et s'apparente à une « pigmentation » par petits grains qui est due à la granularité des grains de quartz du grès, mais aussi à une hétérogénéité de la matière brune qui forme souvent des points plus sombres (fig. 16a).

L'application d'eau de Javel avec un coton-tige attaque la pigmentation brune et les voiles chlorophylliens, et le grès apparaît clair comme il l'était à l'origine, lors de la mise à l'affleurement. C'est bien de la matière organique qui est à l'origine des films bruns, comme nous l'avons vu plus haut. Il s'agit probablement de résidus d'anciens voiles chlorophylliens décomposés, mais vraisemblablement aussi d'autres organismes comme des mycéliums de champignons, diverses bactéries, etc. et aussi des apports extérieurs par le vents (poussières minérales et organiques, spores, pollens, …). Des films plus épais et plus sombres, ou plutôt des croûtes dans notre dénomination, sont parfois associées aux parois à film brun. Elles sont aussi de nature organique comme le révèle le test à l'eau de Javel.

L'induration est très faible, à peine perceptible, mais donne néanmoins de la cohésion aux grains de surface comme le montre l'écaillage de la surface d'un sillon (fig. 16d). En ce sens ces films sont des BIRC (*Biologically-Initiated Rock Crust*), puisqu'ils s'accompagnent d'une induration de la surface du grès. Ces voiles organiques sont des amorces de bio-colonisations qui peuvent prendre plus de « tenue » si les conditions de développement perdurent.

Il a été plusieurs fois observé des films bruns qui se décollaient du support gréseux comme une peinture qui s'écaille en formant des films qui s'enroulent sur eux-mêmes. Ces écailles ont alors leur face interne couverte de grains de quartz arrachés au support gréseux et contribuent ainsi à l'effritement des parois, ou du moins des cortex poreux et friables sous-jacents aux films biologiques. L'enroulement des écailles indique que c'est la rétraction du biofilm lors de son séchage qui est le moteur de ces desquamations.

L'observation à la loupe binoculaire montre que ces films bruns sont bien des biofilms décomposés et probablement encore actifs pour certains. Ces biofilms sont composés d'une pellicule relativement homogène, d'aspect amorphe, sans organisation propre qui recouvre les grains de quartz du grès. Ils sont opaques et masquent les grains de quartz sous-jacents et en estompent les formes géométriques.

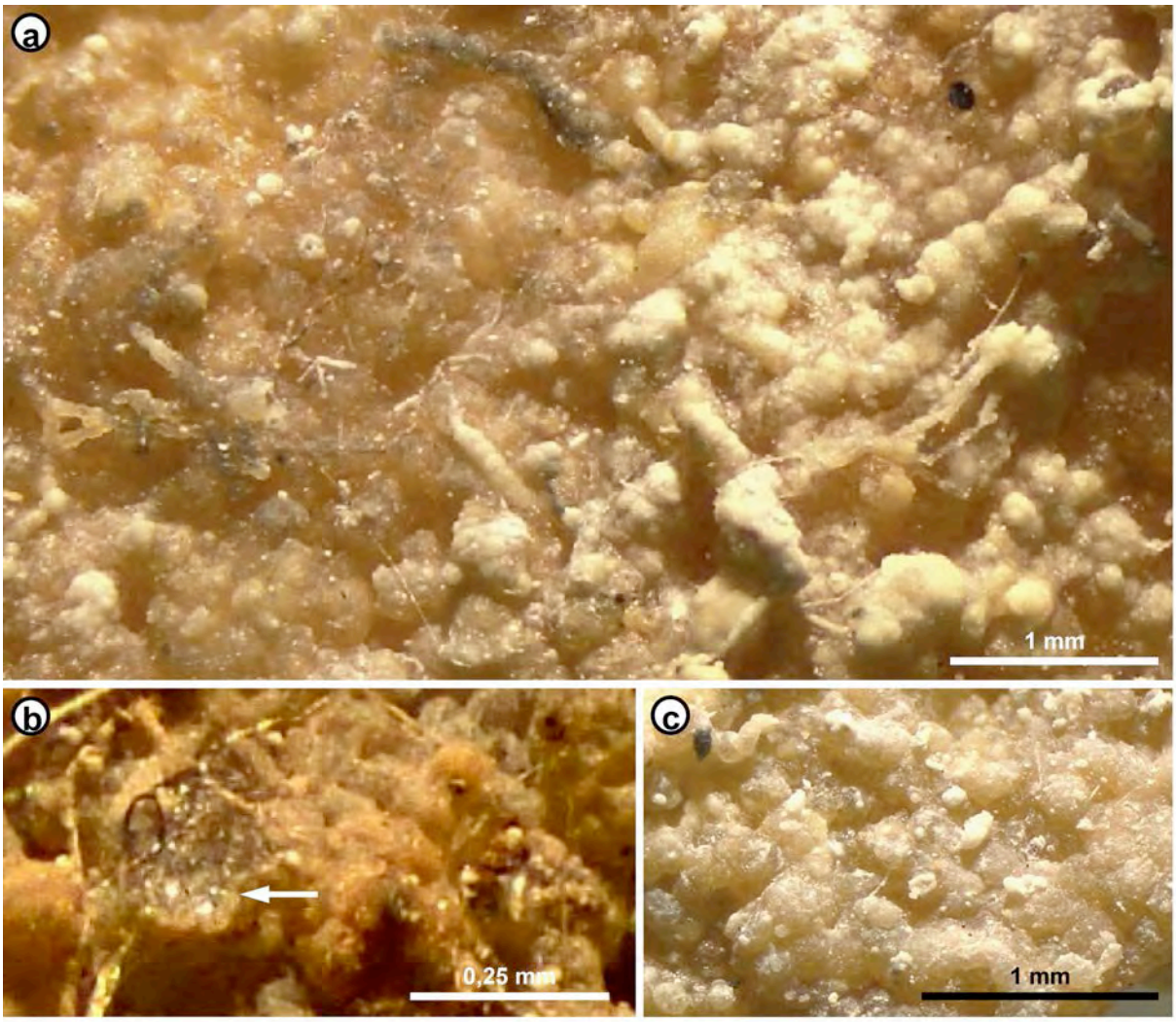

Figure 17 – La Ségognole 2 bis et 3 : films bruns vus à la loupe binoculaire. (a) La Ségognole 3est (échantillon 9114) : les grains de quartz sont enrobés et empâtés par le biofilm, de nombreux débris ou traces d'activité biologique sont préservés, petits grains ronds = pollens ; (b) La Ségognole 2bis conduit nord-ouest supérieur (échantillon 9122) : biofilm cassé (flèche) qui laisse entrevoir un grain de quartz et la faible épaisseur du film ; (c) La Ségognole 3est (échantillon 9121) : biofilm clair qui empâte des grains de quartz et débris organiques divers posés dessus (photos Médard Thiry).

Les couleurs plus ou moins sombres sont liées à l'épaisseur de ce biofilm. En même temps ces biofilms sont hétérogènes et complexes par les nombreux éléments figurés inclus ou posés dessus. Ce sont les éléments filamenteux qui sont les plus voyants, fils d'araignées sûrement, mais aussi débris végétaux, des traces de racines (?), des structures rondes correspondant à des nidifications d'insectes (?), des pontes (?), etc. Quelquefois ces éléments figurés sont littéralement encroûtés par le biofilm (fig. 17).

Selon toute vraisemblance, c'est la décomposition des voiles chlorophylliens et bactériens qui est à l'origine des films bruns organiques. Il serait intéressant qu'un naturaliste-biologiste examine et compare ces voiles vivants et décomposés. L'étude des pollens piégés par les voiles décomposés pourrait peut-être constituer un élément de datation relative.

4.3.2 Description et dispositions

Toutes les parois gravées de La Ségognole, en tout cas Ségognole 3, 4 et 5 sont affectées par le développement de ces films bruns. Ce film organique s'est développé après incision des sillons, puisque ces derniers en sont couverts. Cette disposition se retrouve dans de nombreux exemples, en particulier dans Ségognole 5, mais aussi dans Ségognole 4.

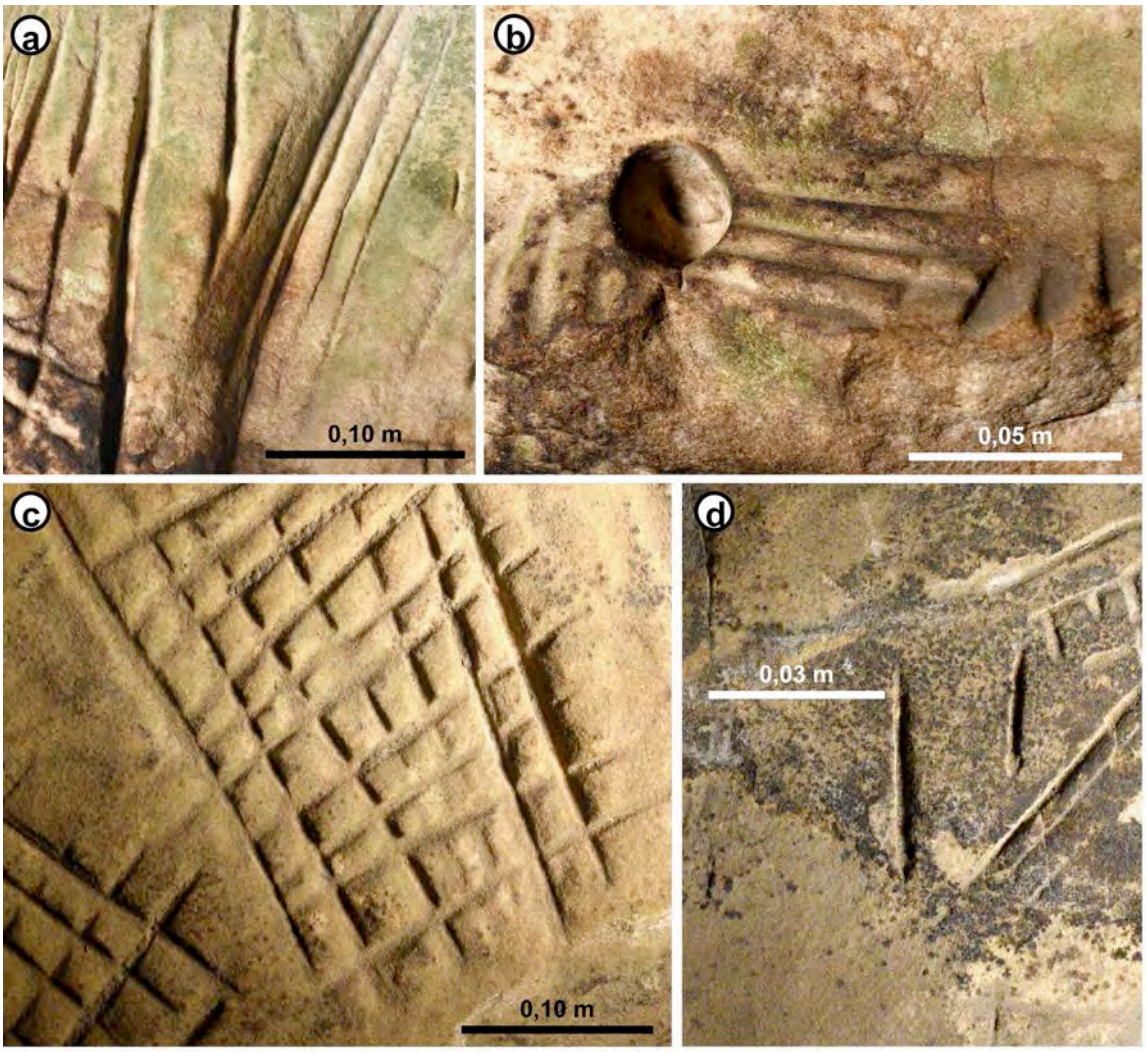

Figure 18 – La Ségognole 4 et 5 : films bruns. (a) La Ségognole 5, paroi sud milieu : films bruns plus ou moins intenses en travers des éléments gravés (photo *ARBap_2017_7931* ; F. Bellanger) ; (b) La Ségognole 5, paroi sud bas : variabilité du film brun sur des éléments gravés proches (photo *ARBap_2017_7942* ; F. Bellanger) ; (c) La Ségognole 4 : film brun, légèrement grumeleux, sur gravures au plancher (photo *ARBap_2017_7995* ; F. Bellanger) ; (d) La Ségognole 4 : film foncé, dense et grumeleux, sur plancher et dans sillons (photo *ARBap_2017_7992* ; F. Bellanger) .

Un bon exemple est associé à un groupe de sillon sur la paroi sud de Ségognole 5 (fig. 18a), où les pigments plus ou moins foncés recouvrent le sillon profond et dissymétrique au milieu du panneau. Un autre exemple, un peu plus bas sur cette paroi, montre l'influence probable de différents facteurs sur le développement des ces films bruns (fig. 18b). La lumière vient de la gauche, le bord de la cupule est plus sombre ainsi que les petits sillons sur la droite. On peut y voir un effet du à l'exposition à la lumière. Les sillons horizontaux sont surtout patinés sur leur rebord inférieur, peut-être un effet d'humidité ou de

dépôt de particules apportées dans l'abri. Enfin les sillons verticaux sur la gauche et le fond de la cupule sont plus clairs, on peut envisager qu'ils aient été retouchés ultérieurement.

Les gravures sur le plancher des abris présentent des caractéristiques un peu différentes. Les planchers gravés ne montrent pas de cortex friable et sont toujours lisses, sans marque de desquamation, d'altération, d'encroûtement. Ils ont à l'évidence été usés et érodés par la fréquentation des abris (voir *infra*). Néanmoins une patine brune, plus régulière et uniforme, recouvre plancher et sillons (fig. 18c) et, par endroits, elle peut devenir plus épaisse, former une croûte presque noire, d'aspect grumeleux, et pénètre aussi les sillons (fig. 18d). Ces patines sont également postérieures aux gravures.

4.1.3.3 Vitesse de développement et implications

Ces biofilms, peu épais, se sont surtout développés après gravure des abris. Il n'y a pas vraiment d'exemple qui montre que ce film brun est plus conséquent (foncé) sur la surface du panneau que sur les flancs des sillons (en dehors de quelques exemples de frottements des panneaux). Cela impliquerait que ce type d'altération/patine n'existait pas au moment de la gravure des parois, soit : (1) ces biofilms n'étaient pas encore formés, peut-être pour des raisons de durée de mise à l'affleurement ou de climat ; (2) soit les parois ont été frottées et blanchies avant gravure. En tout état de cause il faudrait chercher des évidences pour confirmer/infirmer ces hypothèses.

Apparemment, les planchers des abris étaient déjà différenciés, par altération ou abrasion, lors du développement du film organique brun. De toute évidence, ces films bruns constituent un repère chronologique important et ils permettent aussi de révéler des évolutions récentes comme nous le verrons plus loin.

4.4 Les croûtes indurés sombres

4.4.1 Description et nature

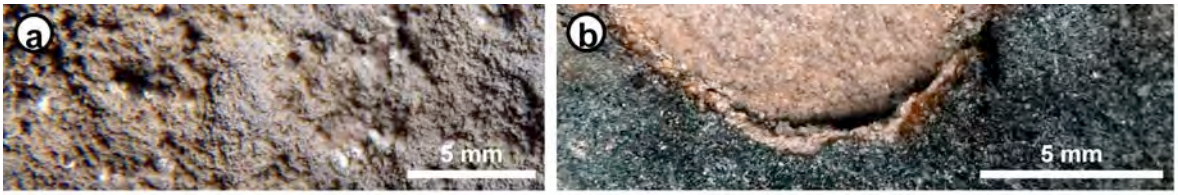

Figure 19 – La Ségognole 3 : aspect macroscopique des croûtes indurées sombres. (a) La Ségognole 3, conduit nord-ouest supérieur (échantillon 9111) : surface rugueuse et scoriacée ; (2) La Ségognole 3est (échantillon 9117) : écaillage d'une croûte sombre qui montre son épaisseur, sa cohésion et le grés clair sous-jacent (photos Médard Thiry).

Les croûtes sombres, grises à noires, se marquent surtout par leur induration, il n'y a aucun effritement des grains de quartz du grès sur ces altérations de la surface du grès. Le plus souvent elles montrent un surface régulière, voire même lisse, sur laquelle la granularité du grès ne transparait pas ou peu. Localement ces croûtes peuvent prendre un aspect rugueux, voire scoriacé, mais toujours cohésif (fig. 19a et b). Elles ont une épaisseur infra-millimétrique et se distingue bien à l'œil nu sur fracture.

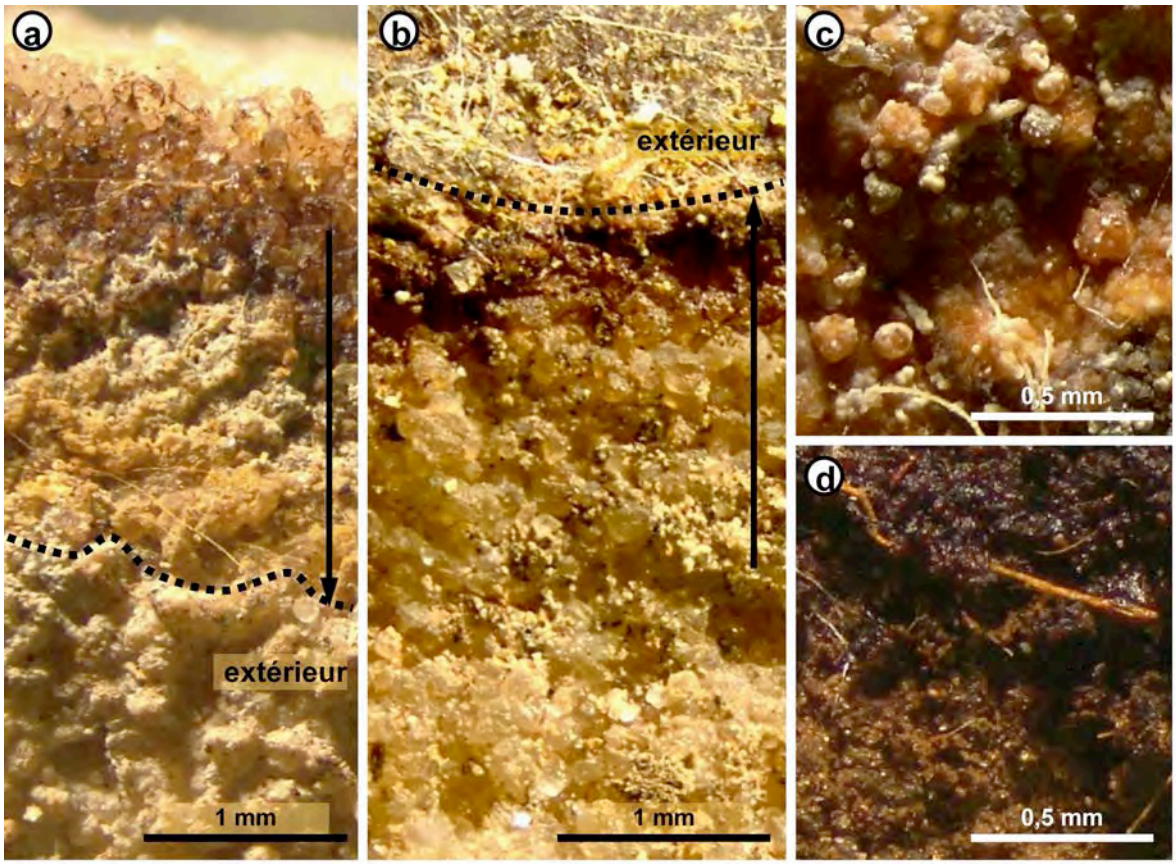

Figure 20 – La Ségognole 3 et 5 bis : croûtes indurées sombres vues à la loupe binoculaire. (a) La Ségognole 5bis (échantillon 9122) : croûte grise sur grès, coupe depuis grès blanc jusqu'à la croûte grise, montrant la surface empâtée par un biofilm, puis la matière organique interpénétré avec les grains de quartz, enfin un voile de matière organique évoluée sur les grains de quartz en profondeur ; (b) idem (échantillon 9129) avec croûte extérieure de matière organique évoluée, croûte organique liée à des tafonis (formes d'altération en alvéoles : cf. fig. 10a) ; (c) La Ségognole 3est (échantillon 9117) : croûte indurée brune en relief , (d) La Ségognole 3, conduit annexe nord-ouest échantillon 9122) : fente avec grès brun sombre sous croûte grise, importance de la matière organique et racines (introduite depuis le dessus du bloc ?) (photos Médard Thiry).

Le biofilm de ces croûtes sombres est bien plus épais que celui des films bruns. Sous la surface le matériel organique peut former une croûte de 0,1 à 0,4 mm d'épaisseur, dépourvu de grains de quartz (fig. 20a). Ce n'est que sous cette croûte superficielle que les grains de quartz se distinguent, plus ou moins encroûtés par le biofilm, puis la matière organique diminue en profondeur pour ne former que des voiles transparents sur les grains de quartz, avant d'atteindre le grès blanc non pénétré par le biofilm (fig. 20a et b). Les morphologies de surface de ces croûtes sont semblables à celles des films bruns, formés de microsphérolithes et amas de matière organique décomposée (fig. 20). Certaines croûtes montrent de la matière organique sombre, grumeleuse, parfois presque pulvérulente, noire à brunâtre, directement sous la croûte superficielle ou dans des fentes du grès. Ces matériaux paraissent infiltrés plutôt qu'accumulés sur place.

Ces croûtes sombres sont l'évolution ultime des biofilms bruns, avec accumulation et maturation de la matière organique (opaque et brun sombre à rougeâtre).

4.4.2 Dispositions

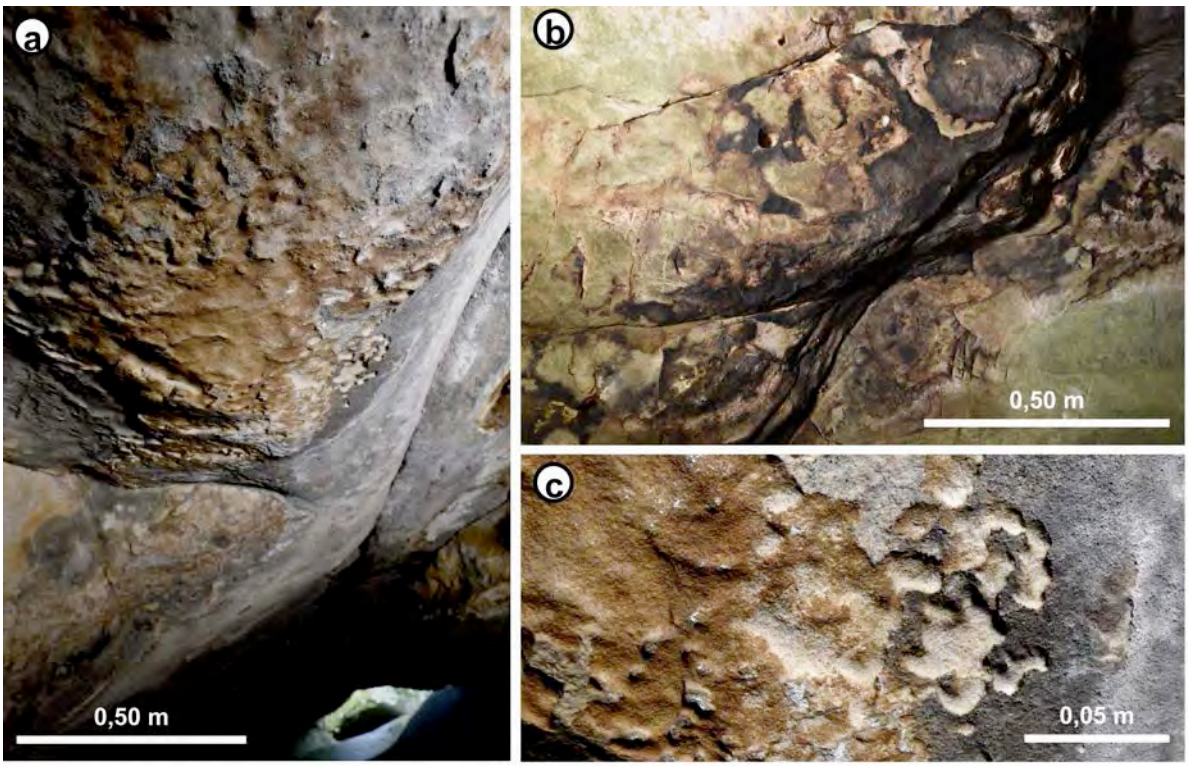

Figure 21 – La Ségognole 3 et 5 : croûtes. (a) La Ségognole 3, milieu du plafond, vue vers ouest, branche nord du conduit : fentes conjuguées (perpendiculaires) bordées d'une croûte grise (noire quand humide) (photo *ARBap_2017_7878* ; F. Bellanger) ; (b) La Ségognole 5, milieu du plafond : croûte noire, indurée, liée à des fentes conjuguées (photo *ARBap_2017_7944* ; F. Bellanger) ; (c) détail de (a) qui montre l'induration du grès par cette croûte (mise en relief par son altération) (photo *ARBap_2017_7881* ; F. Bellanger).

Des croûtes noires recouvrent quasi systématiquement les lèvres des fractures et fentes qui recoupent les abris de la Ségognole (fig. 21a et b). La largeur des lèvres affectées par ces recouvrements est très variable, de quelques centimètres jusqu'à recouvrir des parois entières. Ces croûtes correspondent très clairement à des zones de venues d'eau par les fentes qui recoupent le grès. Certaines de ces venues d'eau sont encore fonctionnelles actuellement, comme on peut le constater après une période de pluie, d'autres semblent taries, les circulations dans les fentes ayant évoluées au gré des altérations et de la couverture des blocs.

Ces croûtes se forment le plus souvent sur les grès durs, dépourvus de cortex friable ou dont le cortex friable a été altéré par des venues d'eau ou par la croûte elle-même. Les croûtes sont de couleur gris-sombre à noire et peuvent atteindre 0,5 mm d'épaisseur au voisinage des fentes et se réduire à un film gris plus ou moins soutenu en s'éloignant des fentes de venue d'eau. À noter que leur couleur varie beaucoup avec le taux d'humidité, sombres à l'état humide, plus claires quand elles sont sèches.

Très souvent ces croûtes s'altèrent dans les parties distales par rapport à la fente. L'altération la plus fréquente est leur effritement ou desquamation qui laisse apparaître le grès sous-jacent. Il apparaît alors que le grès sous-jacent à la croûte organique est imprégné par la matière organique (couleur brune), mais que cette imprégnation est très limitée et que sous les premiers grains de quartz colorés par la matière

organique le grès reste blanc (fig. 21c). La nature indurée et résistante des croûtes apparaît alors clairement par leur mise en relief par rapport au grès sous-jacent qui s'effrite (fig. 21c).

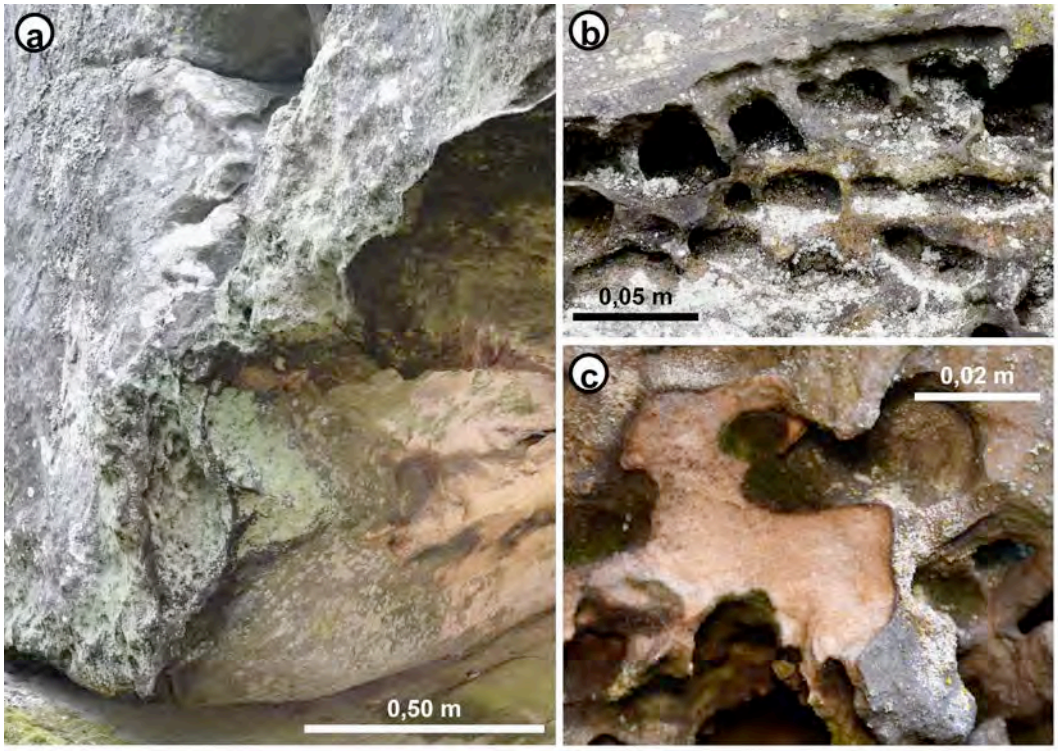

Figure 22 – La Ségognole 2bis et 5bis : croûtes noires et indurées, associées aux grès exposés aux intempéries. (a) La Ségognole 2bis, ouverture façade ouest : surface irrégulière du grés, noter la mise en relief de cette croûte par désagrégation du grès non couvert (photo *ARBap_2017_7831* ; F. Bellanger) ; (b) La Ségognole 5bis, extrémité ouest du conduit éventré alvéoles de désagrégation du grès (tafonis) séparées par des cloisons indurées par une croûte noire (photo *ARBap_2017_7948* ; F. Bellanger) ; (c) La Ségognole 5bis, extrémité ouest du conduit éventré : cassure sur structure scoriacée (tafoni) montrant le liseré de la croûte sombre qui renforce les alvéoles (contre-partie de fig. 10a), (photos Médard Thiry).

Des croûtes de nature similaire se développent aussi sur des surfaces extérieures des blocs et en particulier en bordure des conduits éventrés (fig. 22a). Là aussi l'induration de la croûte apparaît par la mise en relief de bourrelets et festons par désagrégation et altération du grès sous-jacent. Cette altération peut alors conduire à l'approfondissement des alvéoles de désagrégation et à l'épaississement et au renforcement des bourrelets, jusqu'à former des festons (fig. 22b et c), communément appelés « tafonis » par les géologues et les géomorphologues.

Ces croûtes organiques sont inexistantes sur les surfaces lustrées, dépourvues de porosité, comme les pellicules siliceuses qui couvrent certaines fractures. En revanche, elles sont mieux développées sur les grès poreux, probablement pour des raisons mécaniques d'accrochage, mais aussi par apport d'humidité à partir de l'eau porale entre les évènements pluviaux.

Comme indiqué plus haut, les croûtes organiques sombres sont souvent développées sur des faciès de grès durs, et de ce fait n'ont pas été entaillés par les gravures. Néanmoins, quelques sillons ont touché les croûtes moins dures et sur grès plus tendre en bordure d'extension des zones couvertes, généralement dans des zones où la desquamation s'est développée. On aurait pu imaginer que l'effet de

contraste entre la croûte sombre et le grès blanc sous-jacent ait eu une « attractivité » pour les graveurs, apparemment il n'en est rien.

4.5 Structuration interne des croûtes

En attaquant les particules fines, le traitement à l'eau de Javel met en relief les structures internes des croûtes indurées et révèle l'organisation et parfois la composition des croûtes indurées.

4.5.1 Structuration feuilletée

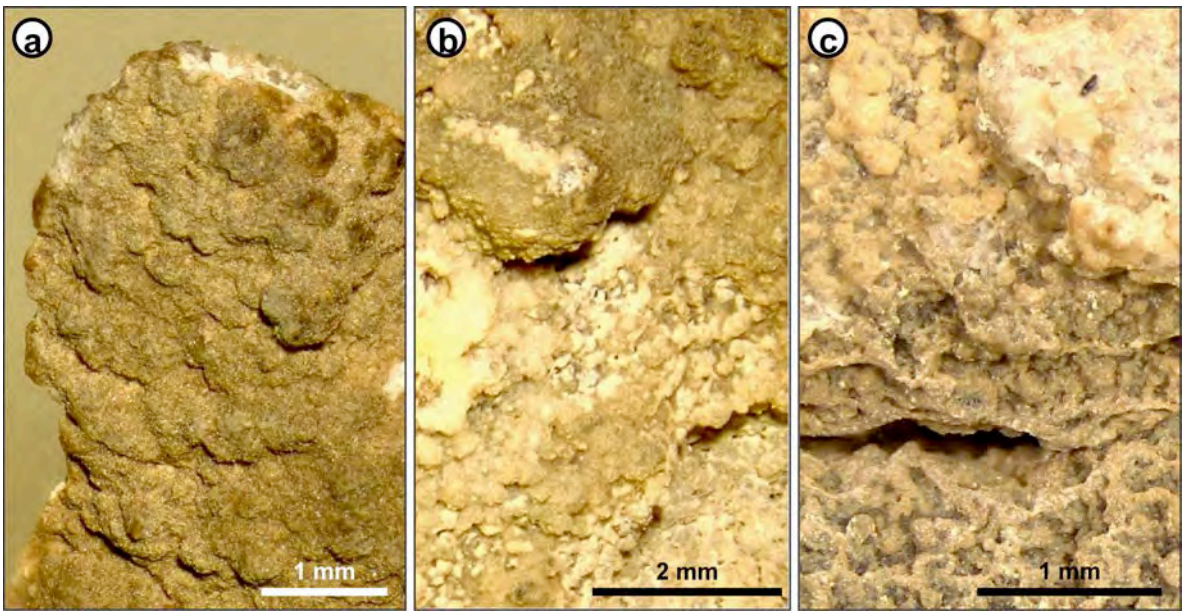

Figure 23 – La Ségognole 3 : structuration feuilletée des croûtes indurées vue à la loupe binoculaire. (a) La Ségognole 3, conduit nord-ouest supérieur (échantillon 9111b) : aspect écaillé de la surface d'une croûte indurée sombre ; (b) La Ségognole 3, conduit nord-ouest supérieur (échantillon 9111b) : desquamation de la croûte qui laisse voir sa structuration en couches différenciées ; (c) La Ségognole 3 est (échantillon 9122 : fig. 12e) : superposition de lamines de structurations différentes dans croûte indurée sombre. Échantillons traités NaClO (photos Médard Thiry).

L'aspect feuilleté des croûtes est une constante. Elle se manifeste directement lorsque les croûtes se desquament (fig. 7), formant quelquefois des feuillets qui s'enroulent. La structure feuilletée se traduit aussi par un aspect en écailles de poisson des surfaces encroutées (fig. 23a) et par des desquamations et cassures qui se font selon des plans en marches d'escalier (fig. 23b et c).

4.5.2 Pâtes aphanitiques

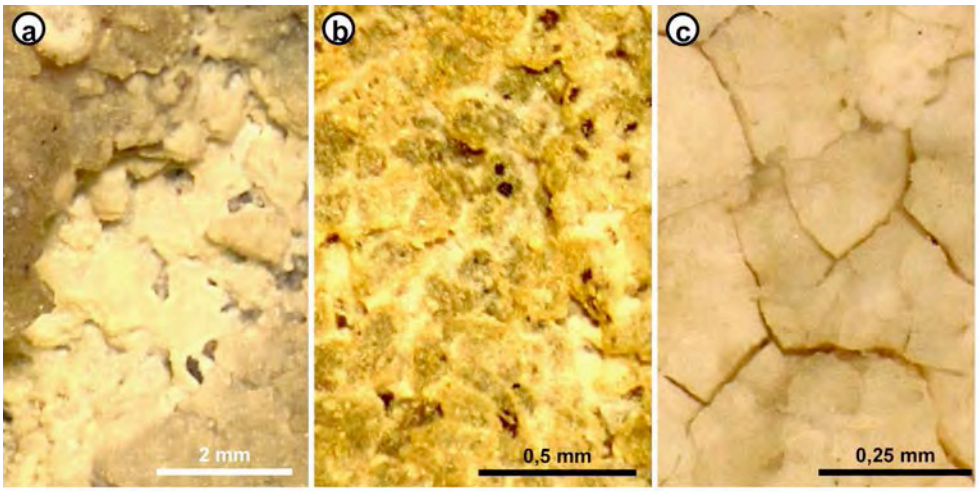

Figure 24 – La Ségognole 3 : matériaux aphanitique liées au croûtes indurées vus à la loupe binoculaire. (a) La Ségognole 3, conduit nord-ouest supérieur (échantillon 9111b) : matériel blanc sans structure apparente qui empâte les éléments arrondis sous la croûte sombre ; (b) La Ségognole 3, conduit nord-ouest supérieur (échantillon 9111b) : pâte blanche remplissant la porosité intergranulaire du grès sous une croûte sombre ; (c) La Ségognole 3est (échantillon 9117b) : matériel blanc non structuré enrobant des éléments organiques et recoupé par des fentes de déshydratation. Échantillons traités NaClO (photos Médard Thiry).

Sous les croûtes indurées plus ou moins sombres apparaît souvent un matériel blanc aphanitique, sans structuration visible, qui enrobe les structures glaebulaires et lamellaires de la croûte indurée (fig. 24a), mais aussi les grains de quartz du grès et en obture la porosité (fig. 24b). Quand le matériel aphanitique est plus important il peut former une couche individualisée d'environ 0,1 mm d'épaisseur et qui montre alors souvent des fentes de déshydratation (fig. 24c). En l'absence d'analyses de ce matériel il est difficile de préjuger de sa composition. Deux matériaux différents peuvent être envisagés : un macéra organique très fin, infiltré depuis la croûte, à la manière d'illuviations dans un sol ; ou un dépôt minéral à partir de solutions et en l'occurrence de la silice ? Il n'y a que l'analyse élémentaire à la microsonde qui puisse être déterminante.

4.5.3 Les oxydes de fer

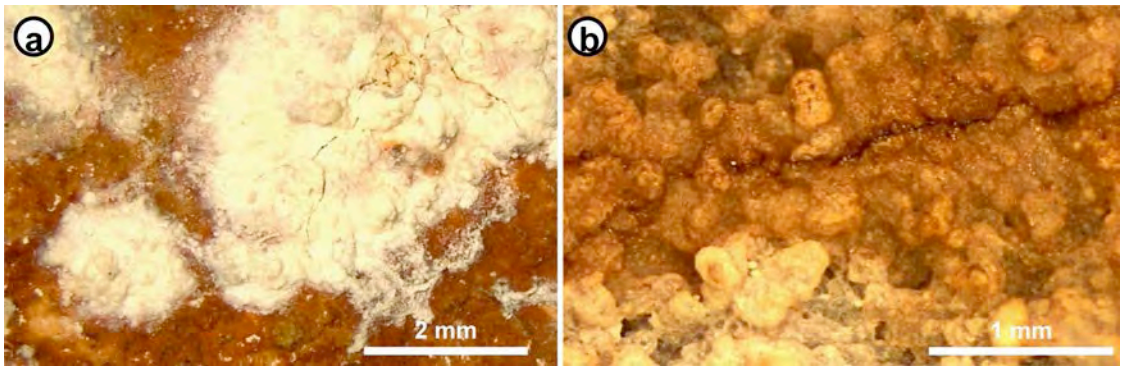

Figure 25 – La Ségognole 3 : oxydes de fer vus à la loupe binoculaire. (a) La Ségognole 3est (échantillon 9117c) : pellicule Fe (rouge-brun) sur laquelle se sont développés des organismes ou des colonies d'organismes (blanc) ; (b) La Ségognole 3est (échantillon 9122) : fente Fe au sein d'un grès faiblement cimenté, le grès des épontes est également imprégné de manière diffuse par le fer, sous croûte gris. Échantillons traités NaClO (photos Médard Thiry).

Les couleurs brunâtres sont fréquentes sur les parois gréseuses friables, elles sont pour leur grande majorité dues à de la matière organique, comme le révèle les tests à l'eau de Javel. Mais localement existent des surfaces revêtues par un enduit rouge-brun (fig. 25a) et des fentes rougeâtres (fig. 25b) et qui ne sont pas attaquées par l'eau de Javel. Il s'agit d'oxhydroxydes de fer. Ils sont très probablement liés à des migrations de complexes organiques provenant des sols podzoliques qui surmontent localement les blocs de grès. Les complexes ferriques migrent vraisemblablement sous forment acide et précipitent quand l'acidité est neutralisée au contact des grès calcareux.

4.5.4 La porosité sous-croûte

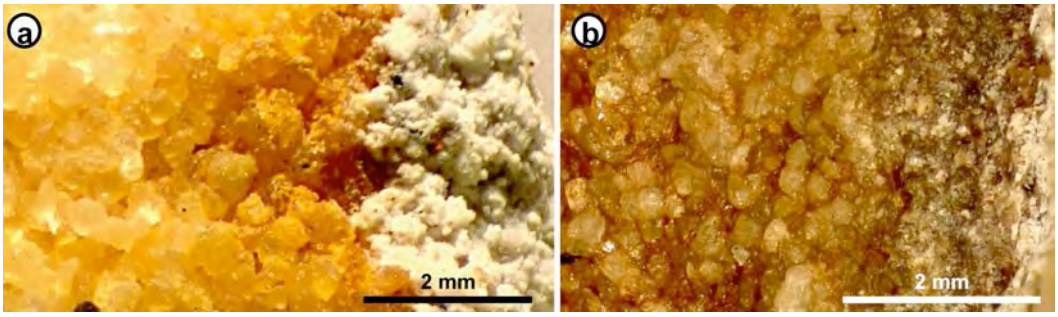

Figure 26 – La Ségognole 3 : grès poreux (friable) sous croûte vu à la loupe binoculaire. Le caractère grès friable se reconnaît à l'absence de nourrissage des grains de quartz (absence de faces). La croûte cimente et consolide ces faciès friables. (a) La Ségognole 3est (échantillon 9121b) ; (b) La Ségognole 3est (échantillon 9122). Échantillons traités NaClO (photos Médard Thiry).

Sous la croûte induré, et souvent pénétré par celle-ci,-peuvent subsister des faciès gréseux poreux, aux grains de quartz peu ou pas cimentés (fig. 26). Ces faciès poreux sont les reliques des faciès friables plus répandus sur les surfaces non-encroûtées de l'intérieur des abris. La croûte indurée biologiquement consolide ces facies friable et les protège de l'érosion.

4.5.5 Le profil de la croûte

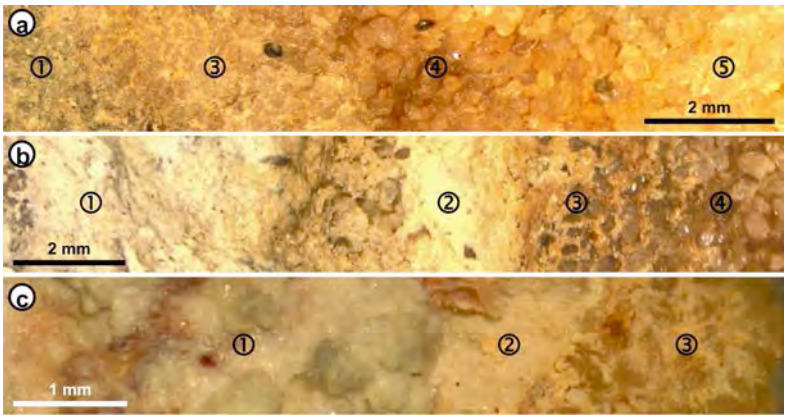

Figure 27 – La Ségognole 3 : succession des structures dans les croûtes indurées biologiquement (BIRC) vue à la loupe binoculaire. Les croûtes montrent tout ou parties des différentes structures reconnues, mais elles se succèdent toujours dans le même ordre de l'extérieur vers le grès sous-jacent : ① croûte indurée, ② matériel aphanitique en couche, ③ grès cimenté par du matériel aphanitique, ④ grès poreux (friable), ⑤ grès dur à grains nourris. (a) La Ségognole 3, conduit nord-ouest supérieur (échantillon 9111b) ; (b) La Ségognole 3est (échantillon 9122) ; (c) La Ségognole 3est (échantillon 9117c). Échantillons traités NaClO (photos Médard Thiry).

Les organisations décrites ci-dessus forment des successions spatiales qu'on retrouve pratiquement dans toutes les croûtes indurées. Elles s'organisent en séquence de la surface vers l'intérieur du grès (fig. 27). Tous les termes décrits peuvent s'enchaîner, mais le plus souvent un ou deux termes viennent à manquer, mais leur ordre de succession se fait toujours selon la même polarité. S'y succèdent :

- une croûte organique plus ou moins compacte, englobant les grains de quartz du grès, ou quasiment dépourvue de grains de quartz ;
- une pâte aphanitique formant un niveau individualisé et ne renfermant pas de grains de quartz ;
- une pâte aphanitique qui enrobe les grains de quartz et bouchant la porosité intergranulaire ;
- un grès poreux, à grains de quartz non ou peux nourris, correspondant aux cortex friables des abris ;
- le grès compact, à quartz nourris, à faible porosité.

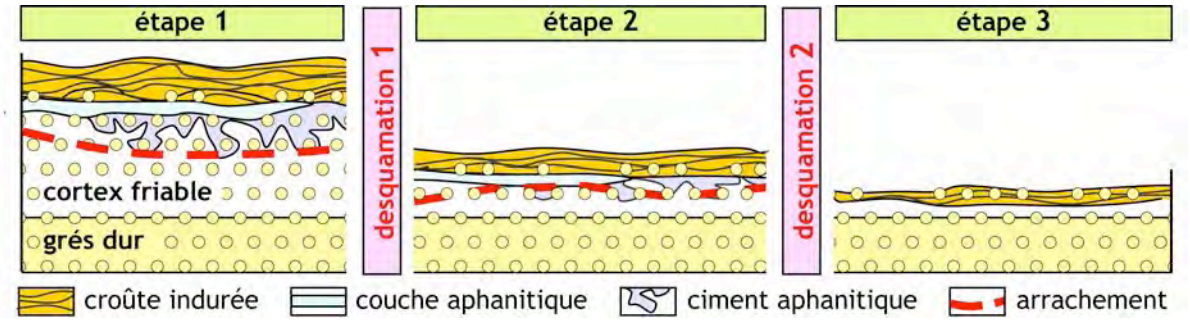

Figure 28 – Schéma de l'évolution de la croûte indurée biologiquement au cours du temps. La croûte s'épaissit au cours du temps. Mais, si une desquamation intervient, une nouvelle croûte biologique peut se développer. Les croûtes sont d'autant plus épaisses et matures qu'elles se sont développées plus longtemps. Les croûtes moins épaisses correspondent à un développement plus court. On peut considérer que sur un même panneau les croûtes moins épaisses sont plus jeunes (document Médard Thiry).

Cette succession s'apparente à une micro-séquence comparable aux horizons pédologiques d'un sol, depuis un sol organique en surface jusqu'à la roche mère. L'érosion par desquamation des croûtes peut conduire au développement d'une nouvelle croûte (fig. 28) et ainsi se former des séquences temporelles de croûtes qui s'enchaînent et se reconnaissent à leur maturité (épaisseur et différenciation interne) et qui peuvent être la base d'une datation relative de ces indurations successives.

On peut imaginer que ces croûtes indurées présentent, tout comme les horizons pédologiques, un gradient géochimique entre la surface et le grès. La géochimie liée à ces croûtes est potentiellement porteuse d'informations sur leur développement et leur évolution en fonction des changements environnementaux. Des croûtes similaires sur des pétroglyphes de Californie et d'Argentine ont montré que la croûte organique externe pouvait enregistrer jusqu'à 10 niveaux organiques successifs, correspondant à des variations climatiques, datables et corrélables entre les mégalithes (Liu, Broecker, 2008 ; Whitley et al., 2017). C'est une piste à tester.

5. Incidence des altérations sur les interprétations archéologiques

5.1 Interprétation paléoenvironnementale des altérations

Figure 29 – La Ségognole 5, paroi sud-ouest : variabilité des états de surface du grès à l'échelle d'un abri (photo Médard Thiry).

La grande variabilité des états de surface du grès (patines, films, croûtes et voiles végétaux) à l'échelle d'un abri interpelle. La paroi sud-ouest de l'abri de la Ségognole 5 est un bon exemple de cette variabilité à l'échelle métrique (Fig. 29).

- Une croûte brune sombre et épaisse occupe la partie inférieure du panneau ; elle est liée à une fracture qui a conduit des infiltrations ; des sillons y ont été gravés, la croûte est donc ante-gravures.
- Un film brun plus clair borde la croûte brune vers le centre du panneau, en s'éloignant de la fracture. Ce film recouvre les sillons gravés dans cette partie de la paroi ainsi que ceux gravés dans la croûte brune précédente ; ce film brun est donc post-gravure.
- La partie centrale du panneau est constituée d'un grès clair dépourvu de patine, les surfaces et sillons sont dénudés ; la limite entre film brun et grès blanc est jalonnée par une fissure qui apparemment délimite un bloc de grès aux conditions hydriques différentes (plus sec).
- La partie supérieure présente un important voile chlorophyllien et révèle un support plus humide (condensation ?).

Les états de surface du grés sont clairement conditionnés par :

- la nature du support gréseux, dur ou poreux ;
- l'état hydrique du grès, avec les zones humides de percolation et de condensation favorisant le développement de pellicules organiques ;
- l'exposition à la lumière favorise le foisonnement des voiles chlorophylliens.

Les états de surface constituent aussi des repères chronologiques :

- les croûtes sombres et épaisses sont des altérations anciennes, ante-gravures rupestres, qui se sont faites depuis la mise à l'affleurement des grès, or les récentes datations de calcites sableuses en amas et/ou incluses dans des grès (Thiry et al., 2013 ; Thiry, 2016) tendent à indiquer que

l'essentiel des reliefs bellifontains date de la dernière glaciation et les croûtes se seraient formées après celle-ci ;

- les films bruns, fins biofilms, sont plus récents, ils affectent et recouvrent les sillons et sont donc post-gravures ;
- les voiles chlorophylliens sont des biofilms actifs, en développement, ils sont conditionnés par l'exposition à la lumière et l'humidité actuelle des parois.

Il est difficile de se représenter ce qu'étaient les films bruns. On peut faire l'hypothèse qu'ils correspondent à d'anciens voiles chlorophylliens. Dans ce cas ils se seraient développés dans des conditions climatiques plus humides que l'actuel, puisqu'ils sont de répartition plus large que les voiles chlorophylliens actuels. Mais leur répartition très large indique peut-être aussi qu'ils ont pu se développer avec peu de lumière et qu'ils n'étaient peut-être pas dominés par des plantes chlorophylliennes. C'est une question à approfondir par une étude des restes biologiques en microscopie et peut-être les signatures biochimiques (ADN, etc …).

Il faut aussi avoir à l'esprit que les biofilms et les croûtes sont susceptibles d'avoir enregistré des données paléoclimatiques sous forme de lamines successives et dans ce cas pourraient constituer un outil de stratigraphie comme cela a été montré en Amérique du Nord (Whitley et al., 2017).

5.2 Limite d'une étude tracéologique des sillons

Figure 30 - La Ségognole 4 : le biofilm développé sur les sillons gravés présente une granularité et une épaisseur qui empêche de distinguer les traces éventuelles laissées par l'outil qui a gravé le grès (photo *ARBap_2017_7997* ; F. Bellanger).

Le développement naturel de biofilms sur les parois et dans les sillons gravés constitue un gros souci pour l'étude des surfaces gravées. Les observations à la loupe binoculaire montrent clairement que les surfaces couvertes par des biofilms ne laissent rien transparaître de la granularité primaire de la surface. Les biofilms forment en fait une granularité secondaire, apparemment indépendante de la structure de la surface gréseuse. Le détail d'une croix gravée à l'entrée de Ségognole 4 est parlant à ce sujet (fig. 30) : on distingue bien la granularité secondaire du biofilm et un écaillage permet d'en apprécier l'épaisseur. Les granularités secondaires sont à l'échelle des traces qu'on voudrait y étudier et de ce fait sont rédhibitoires pour les études tracéologiques.

5.3 Érosion naturelle des parois

L'érosion naturelle des parois est observable dans tous les abris. Elle est surtout la conséquence de l'évolution des biofilms et croûtes (BIRC - *Biologically-Initiated Rock Crust*). Des desquamations sont presque systématiques sur les croûtes sombres en bordure des zones d'infiltration. Elles se font par enlèvement d'écailles millimétriques à infra-millimétriques qui découvrent le grès sous-jacent qui est le plus souvent clair et non altéré sous la croûte (fig. 16c, 19b et 21). D'autres écailles, plus fines mais de taille centimétriques se détachent régulièrement à partir des films bruns relativement évolués (plus foncés) (fig. 12b et c ; fig. 16a).

Dans un premier temps les biofilms protègent la surface des roches de l'arrachage des grains de sa surface et de son l'écaillage. Quand le biofilm devient plus épais il protège aussi le grès des ruissellements et des infiltrations.

Mais au cours de l'évolution du biofilm divers mécanismes de désintégration du grès pourront apparaître.

(1) Des dommages biologiques provoqués directement par les organismes, comme l'augmentation de la pression intracellulaire de certaines micro-colonies de champignons, la pénétration des structures d'ancrage des lichens entre les grains des grès, l'attaque biogéochimique des éléments minéraux par excrétions spécifiques des lichens et d'autres organismes, tendront à créer une zone friable à l'interface biofilm/grés, (Gadd, 2017).

(2) Des dommages mécaniques induits par des dilatations/contractions du biofilm lors de cycles d'humidification/dessiccation des éléments végétatifs du biofilm (Chen et al., 2000). Ces mouvements de dilation/contraction entrainent une zone de tension à l'interface biofilm/grès qui à terme peut conduire au décollement du biofilm. Dans le cas général, la contraction du biofilm mène à son détachement du support, entrainant l'arrachement des grains du grès friable qui lui sont attachés. L'enroulement typique des écailles de desquamation est la traduction de la contraction du biofilm par rapport au squelette rigide des grains du grès.

Ces altérations par desquamation sont comparables à celles observées sur de nombreux appareillages de bâtiments. Elles peuvent conduire à des dommages visibles sur les roches et plus spectaculairement sur les appareillages des immeubles après quelques années (Gadd et al., 2014 ; Marszałek et al., 2014). Ces desquamations de biofilms s'accompagnent toujours de pertes de matière : la surface du grès est « rabaissée » de une à trois épaisseurs de grains du grès à chaque desquamation, c'est à dire de l'ordre de 0,2 à 0,5 mm.

Si l'on fait l'hypothèse que des desquamations peuvent se faire à l'échelle historique (de 1 à 5 siècles), 20 cycles pourraient se produire en 10 000 ans, et la surface du grès pourrait être érodée de 4 mm en 10 000 ans, c'est-à-dire de l'épaisseur moyenne des cortex friables des abris gravés.

Cette altération par desquamation n'est probablement pas sans conséquence sur la rareté des gravures paléolithiques dans les abris gravés du massif de Fontainebleau.

6. Le panneau au cheval de la Ségognole 3 revu à la lumière des croûtes d'altération

L'investigation des croûtes et l'analyse de leur fonctionnement et de leur évolution permettent de renouveler l'analyse des différents éléments constitutifs du panneau orné de l'abri du cheval.

6.1 L'arrangement pubien

Figure 31 – La Ségognole 3, panneau au cheval : évocation vulvaire (photo *ARBap_2017_7904* ; F. Bellanger).

Une croûte sombre est incorporée à la représentation vulvaire associée aux gravures de chevaux de l'abri Ségognole 3 (Bénard, 2010). La « toison pubienne » qui surmonte la vulve est une croûte organique (BIRC), qui selon toute vraisemblance est lié à des venues et remontées d'eau à partir des fentes qui délimitent la représentation vulvaire. Les remontées d'eau se lisent dans les franges de la « toison pubienne », soulignées par un liseré d'efflorescences blanches qui accentue le contraste (fig. 31). On peut penser que les « aménageurs » du Paléolithique ont intégré cette croûte dans leur « installation ». Il renforce à l'évidence la figuration sexuée. La croûte organique témoigne aussi que la grotte a connu, ou connaît périodiquement des régimes hydriques plus humides que ceux notés actuellement.

Les fentes qui dessinent la vulve ont été retaillées comme l'a souligné A Bénard Une fente plus importante « limite » le panneau gravé à droite. Elle recoupe toute la hauteur du panneau et son profil régulièrement évasé, avec une ouverture large a sûrement aussi été retaillée.

La retaille des fentes naturelles pour en renforcer l'effet (Bénard, 2010) procède d'une démarche qu'on peut comparer à celle du mouvement *Land Art* ou même aux « installations » de l'art contemporain.

6.2 La croûte indurée du panneau gravé

Les parois qui supportent les gravures de chevaux sont cohésives et ne s'effritent pas. Elles sont à l'évidence encroûtées et un test à l'HCl a montré qu'elles ne contenaient pas de calcite en surface (Bénard, 2010).

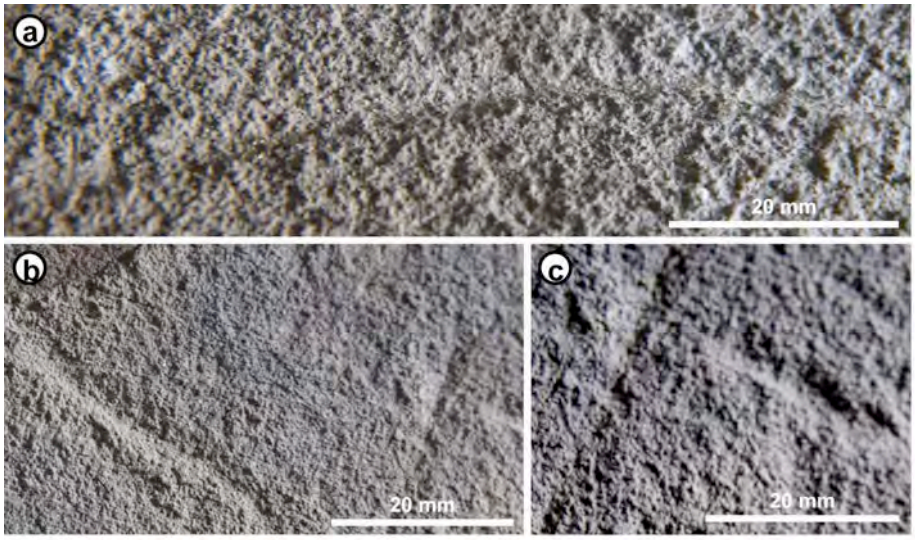

Figure 32 - La Ségognole 3, panneau au cheval : texture de la croûte indurée indifférenciée entre surface et sillons gravés sur le cheval principal. (a) Poitrail ; (b) Cuisse ; (c) Jointure ventre-cuisse (photos Médard Thiry).

La croûte est à l'évidence formée par un biofilm qui a consolidé et induré la surface du grès. Elle couvre la surface du panneau et le sillon de la gravure comme le montre la texture indifférenciée des surfaces et des sillons (fig. 32). L'encroûtement n'est absolument pas incisé par les sillons, il est à l'évidence post gravure. Il n'y a là plus aucune possibilité de reconnaître la trace d'une technique de gravure, tout a été oblitéré par un biofilm qui a encroûté tout le panneau.

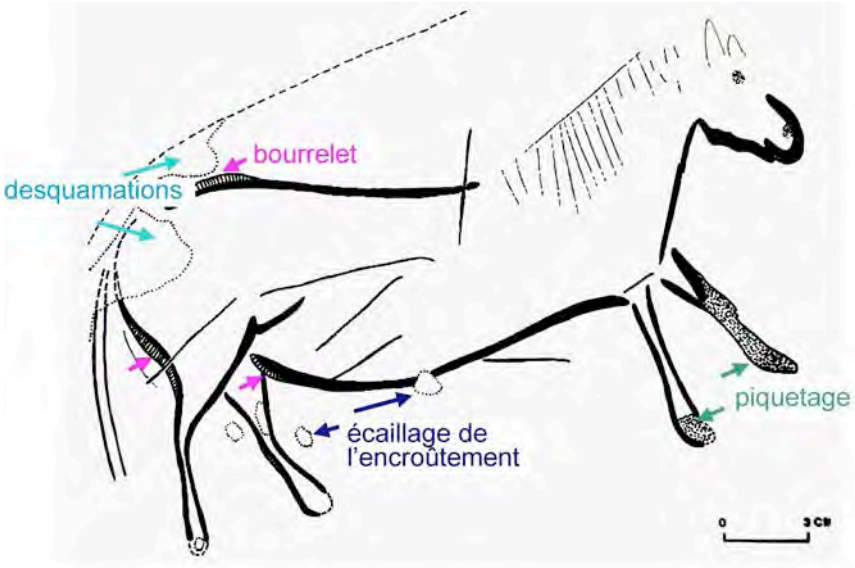

Figure 33 – La Ségognole 3, panneau au cheval : cheval principal d'après Bénard (2010). L'encroûtement de la paroi est écaillé par endroit et les sillons gravés présentent localement un bourrelet en relief par rapport à la surface.

De petits écaillages et desquamations (fig. 33) montrent que la croûte est relativement épaisse et correspond bien à une croûte dans notre nomenclature. Des écaillages et desquamations existent sur de nombreux endroits du panneau gravé. Nous en examinerons trois exemples :

- en bordure de la fente gauche qui délimite la vulve et le panneau orné gauche, avec même des écailles « résiduelles » en relief par rapport à la surface générale du panneau ;
- une grande desquamation sur l'arrière-train du cheval de droite ;
- de petits écaillages sur la partie ventrale et la patte arrière du cheval

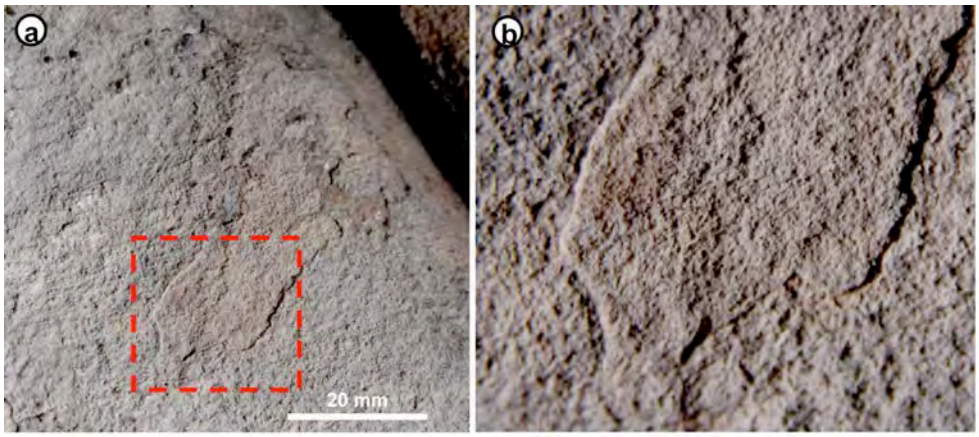

Figure 34 – La Ségognole 3, panneau au cheval : desquamations de la croûte indurée du panneau gauche en bordure de la fente pubienne. (a) Desquamation au contour très irrégulier qui affecte le panneau et la fente « réaménagée » ; (b) Détail du bord inférieur gauche de la desquamation qui montre la structure granuleuse relativement grossière de la surface supérieure (ancienne) et la structure beaucoup moins contrastée de la surface inférieure (photos Médard Thiry).

Les desquamations en bordure de panneau gauche sont multiples et étendues, de contours irréguliers et relativement peu profondes. La surface supérieure montre une structure bosselée prononcée (fig. 34), comparable aux croûtes indurées sombres examinées précédemment (figs. 11 et 12). La surface inférieure est plus lisse, à granularité plus fine, mais ne montre pas les grains de quartz du grès, c'est également une surface encroûtée. La surface supérieure ancienne montre une croûte plus évoluée que la surface inférieure plus récente. Il y a clairement là une corrélation entre âge et structuration de la croûte indurée.

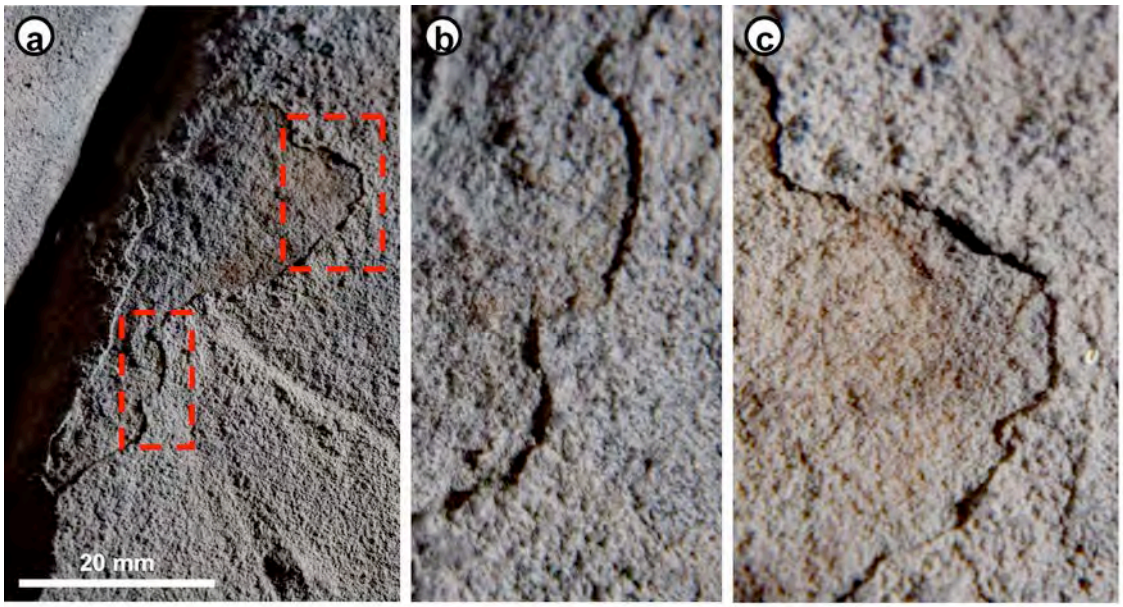

Figure 35 - La Ségognole 3, panneau au cheval : desquamation de la croûte indurée du panneau droit recoupant l'arrière train du cheval principal. (a) Vue d'ensemble de la desquamation qui mord légèrement sur la fente pubienne droite ; (b) Détail de la partie inférieure gauche avec granulation plus prononcée de la surface supérieure comparée à la surface inférieure. (c) Détail partie supérieure droite montrant la faible granularité de la surface inférieure (photos Médard Thiry).

La desquamation qui se superpose au train-arrière du cheval présente une disposition similaire, avec surface supérieure à structure bosselée prononcée et surface inférieure plus lisse, à granularité plus fine (fig. 35). Comme précédemment, la surface supérieure doit être interprétée comme ancienne et plus évoluée que la surface inférieure plus récente et moins évoluée. Dans le détail il faut noter que la surface inférieure montre un net gradient d'évolution depuis la queue jusqu'à la croupe du cheval. Au niveau de la queue la surface inférieure à une granularité relativement proche de celle de la surface supérieure, alors qu'au niveau de la croupe la surface inférieure est beaucoup moins évoluée que la surface supérieure. Il faut voir dans ce gradient une desquamation progressive de la croûte indurée supérieure depuis la queue jusqu'au-dessus de la croupe du cheval. **On perçoit ici le mécanisme d'érosion progressive de la surface gravée par desquamations successives des croûtes indurées.**

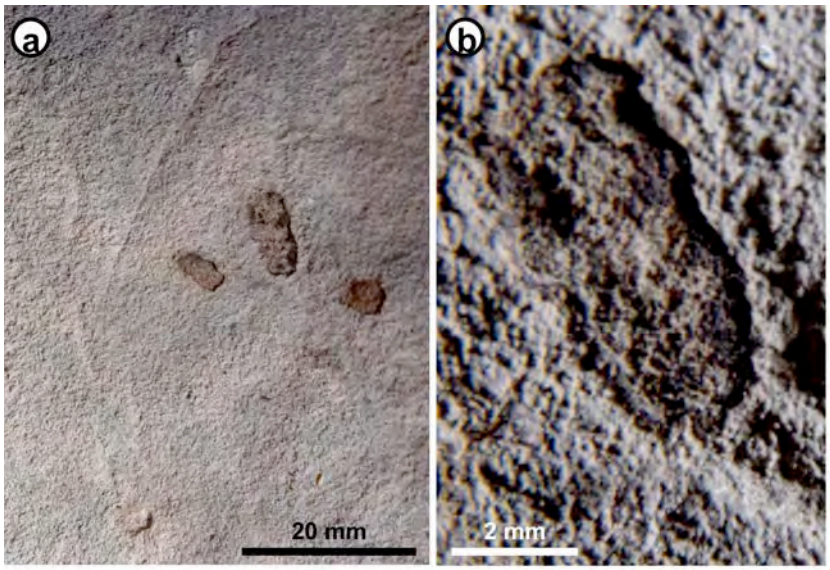

Figure 36 – La Ségognole 3, panneau au cheval : desquamations de la croûte indurée au voisinage de la patte du cheval principal. (a) Vue d'ensemble, l'écaille centrale se superpose à la patte arrière gauche du cheval ; (b) Détail qui montre la granularité de la croûte et la structure de la surface dénudée avec matériel blanc autour des grains de quartz ? (photos Médard Thiry).

La desquamation qui se superpose à la patte arrière du cheval présente un aspect différent des précédentes (fig. 36). La surface inférieure, mise à l'affleurement par la desquamation de la croûte indurée ne montre pas de croûte indurée, elle révèle la fabrique du grès sous-jacent avec la porosité intergranulaire des grains de quartz remplie d'un matériel blanc (fig. 36b), comme celle présentée figure 24b. Les desquamations sont relativement récentes (en tout cas ce sont les plus récentes de ce panneau) et n'ont pas encore été enrobées par un film biologique visible.

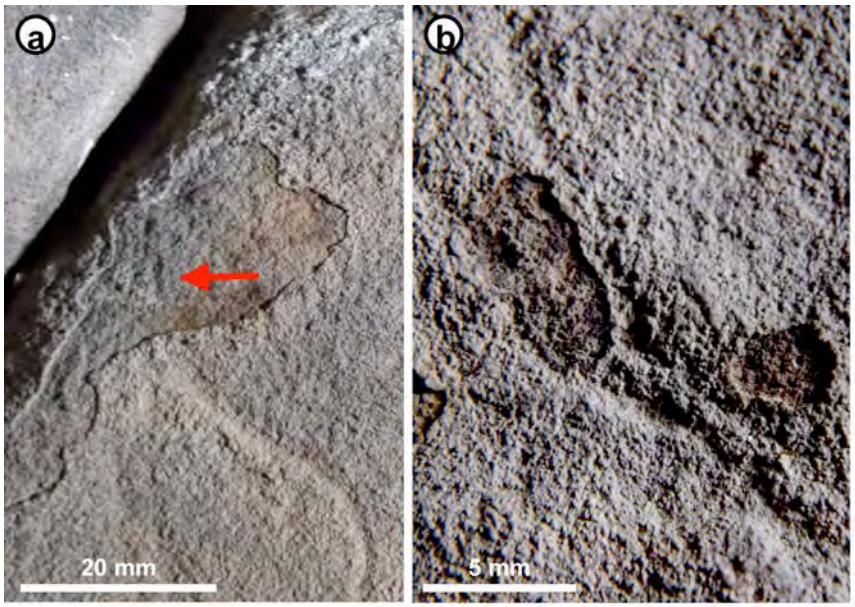

Figure 37 – La Ségognole 3, panneau au cheval : desquamation de la gravure du cheval principal. (a) arrière train, seule une petite trace (flèche) correspond éventuellement au tracé de la croupe. (b) base jarret, aucun des deux sillons délimitant le jarret ne se distingue dans le grès-sous-jacent (photos Médard Thiry).

Les desquamations qui affectent le tracé du cheval montrent que les sillons de gravure ne sont pas marqués dans le grès sous-jacent (fig. 37). Sur un tracé écaillé d'environ 15 mm, seule une trace de 1-2 mm imprimée dans le grès-sous-jacent pourrait correspondre au tracé de la croupe (Fig. 37a). La desquamation qui prend en écharpe la jointure jarret-canon ne montre aucune marque des sillons qui ont été enlevés par desquamation (fig. 37a).

Quel que soit l'histoire de l'induration, formée en une phase unique ou par indurations et desquamations successives, il apparaît clairement que la gravure est parvenue à son dernier "peeling" et qu'après la desquamation de la croûte indurée actuelle il ne subsistera probablement plus beaucoup de traces du cheval. C'est un avenir peut-être lointain, même très lointain, mais c'est l'avenir.

6.3 Nature et caractéristiques du support initial

La gravure du cheval montre localement des bourrelets (fig. 32) qui ont été interprétés comme des effets de fluage du support gravé sous la pression de l'outil, qui de ce fait n'aurait pas été complètement induré au moment de la gravure (Bénard, 2010). On peut essayer de conjecturer la nature de cette pellicule souple et malléable. Un liant plastique aurait été mêlé au cortex gravé. Il faut exclure l'idée d'un gel de silice déposé par les eaux qui suintent. De tels gels n'ont été observés que dans des environnements très chimiques et concentrés à des pH très élevés (>10 ?) et ne sont pas envisageables dans l'environnement des cavités. Il pourrait s'agir d'une pellicule argileuse qui est venue se mêler aux grains de sable lors du creusement des sillons. C'est peu probable, car la paroi gravée ne présente aucune trace de dépôts par des eaux d'infiltration. Reste la possibilité d'un voile algaire qui ait donné de la cohésion aux grains enlevés par l'outil. A notre connaissance un tel bourrelet n'a jamais été décrit dans d'autres sillons, bien que les voiles algaires sont relativement abondants dans les cavités.

La reconnaissance des encroûtements par biofilm permet de faire l'hypothèse que le bourrelet n'est pas une conséquence du tracé initial, mais provient d'une évolution post-tracé.

Il est probable que la surface gravée initiale n'était pas foncièrement différente des autres surfaces gravées, que c'est un cortex friable qui a été gravée comme pour toutes les autres gravures, éventuellement moins épais (?). En tout cas on ne peut pas envisager que c'est la croûte actuelle qui a été gravée. La croûte actuelle ne montre aucune marque d'incision, elle présente les mêmes irrégularités que la surface du panneau (fig. 36). La surface actuelle résulte d'une induration de la surface par un biofilm qui s'est formé après gravure et qui à terme a formé la croûte actuelle. Cette induration n'a pas obligatoirement été homogène sur toutes les parties du tracé. Il est possible que certaines parties du tracé plus profondes, plus exposées à la lumière ou plus humides ont été consolidées plus fortement par l'encroûtement. Les érosions, altérations et desquamations ultérieures ont préservé ces parties plus résistantes et les ont mises légèrement en relief, créant un bourrelet « secondaire ».

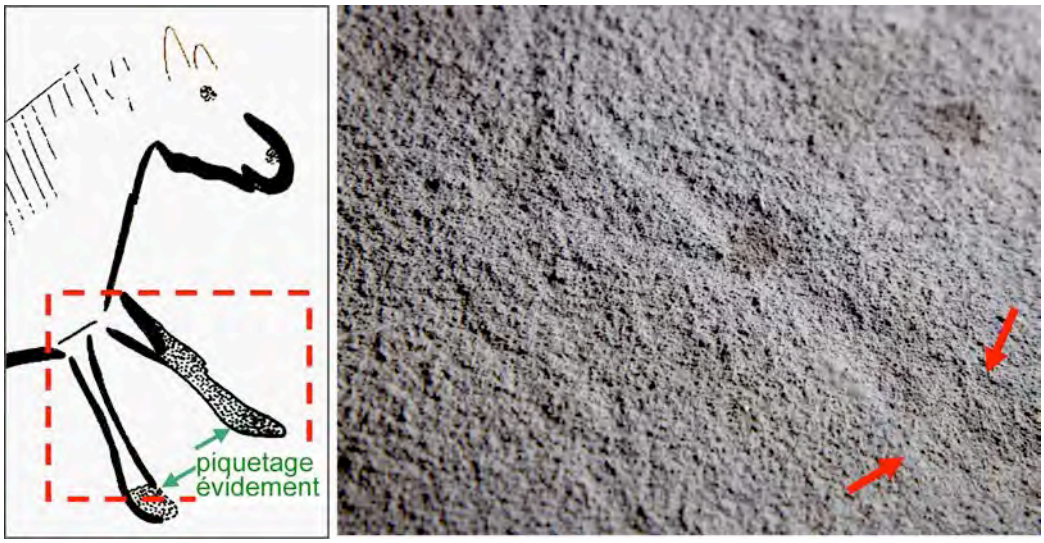

Figure 38 – La Ségognole 3, panneau au cheval : cheval principal d'après Bénard (2007). Les parties « piquetées » peuvent correspondre à un évidemment qui a pu être accidentel ou voulu lors de l'exécution de la gravure, les flèches pointent les côtés du sabot avant gauche (photo Médard Thiry).

Enfin, il faut évoquer le traçage par piquetage des pattes antérieures. Le piquetage n'est pas envisageable si la surface primaire était friable. Par ailleurs l'acquisition d'une croûte secondaire ne permet pas de se fier à l'aspect granuleux pour en déduire une surface piquetée. En fait l'interprétation du piquetage est basée sur l'évidemment de ces parties, mais aucune différence de granularité de surface n'est visible entre le sabot, les sillons et la surface du panneau (fig. 38). Une interprétation alternative est de considérer que ces parties étroites ont été évidées accidentellement ou volontairement lors de la gravure, ou même plus tard, par effritement de la crête entre les 2 sillons bordiers, ou que tout simplement il n'y avait pas assez de largeur pour y placer 2 traits séparés.

6.4 Effet des érosions sur les gravures

Les desquamations successives et l'enfoncement concomitant du biofilm dans le grès expliqueraient aussi que la gravure soit si peu marquée. Il est fort probable qu'initialement elle ait été plus profonde, comme les autres appliquée sur un cortex friable ou tendre, facile à entailler (technique similaire sur matériaux identiques que les gravures plus récentes). C'est l'évolution de la surface du grès, le développement d'un biofilm, mais sûrement aussi des desquamations successives et l'intervention de processus physiques comme le gel lors de périodes froides, qui ont contribué à l'érosion de l'essentiel du cortex friable initial et à la diminution de la profondeur des sillons gravés.

Si les gravures se réduisent par altération et desquamations successive , il faut aussi envisager que certaines ont été entièrement ou partiellement « rabotées ». Le cheval « inachevé » à gauche de la vulve mérite d'être reconsidéré sous cette perspective. Deux remarques préliminaires méritent d'être faites :

- il n'y aucun obstacle sur le panneau qui justifie que le tracé du cheval ait été interrompu vers la gauche ;
- il est étonnant que la courbe ventrale soit interrompue, alors qu'une ligne souple de ce type se trace typiquement d'un seul jet.

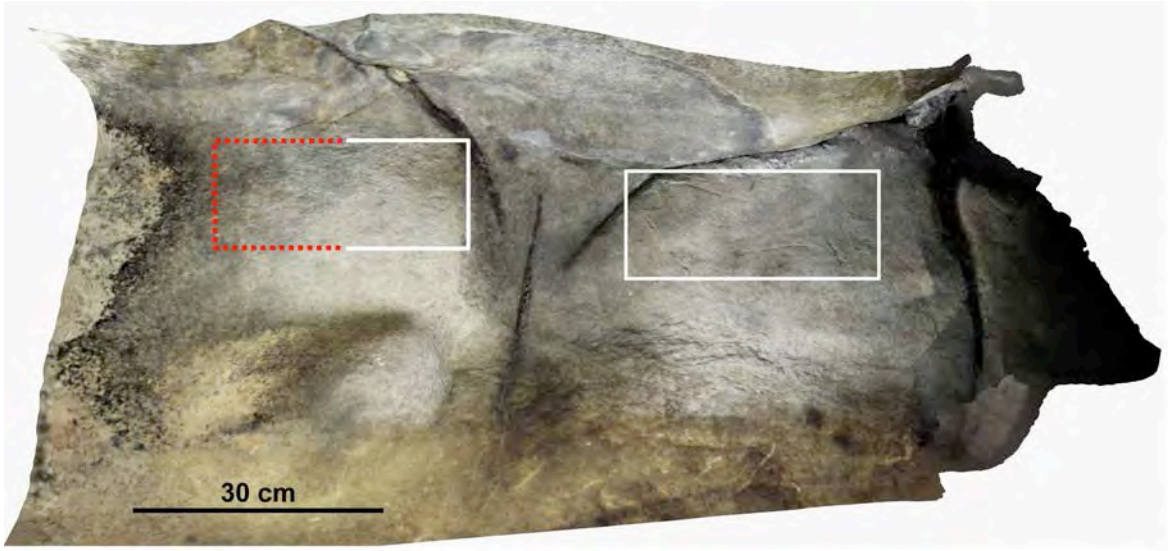

Figure 39 - La Ségognole 3, panneau au cheval : on reconnaît l'évocation vulvaire au centre, le cheval « achevé » à droite est encadré en blanc, le cheval « inachevé » à gauche est encadré en blanc pour sa partie tracée et le cadre rouge correspond à la partie manquante. On note clairement l'altération de la partie gauche du panneau (couvert d'un encroûtement organique) exposé aux arrivés d'humidité par l'ouverture ouest de l'abri (othophotographie d'après modèle numérique Aurélia Lureau).

Une hypothèse alternative à celle de l'ouvrage inachevé est de considérer que ce panneau gauche, proche de l'ouverture de l'abris, ouvert sur les vents dominants et les pluies, ait subit une altération plus forte que le panneau droit qui est en position plus abritée (fig. 39). Ainsi toute la partie manquante du cheval résulterait de son érosion et altération par encroûtements et desquamations successives et ne serait pas une gravure inachevée.

Voilà que la gravure sur ce panneau de La Ségognole 3 n'aurait initialement pas été différente des autres gravures, mais son évolution postérieure est beaucoup plus importante, plus aboutie. Le développement de cet encroûtement évolué post-gravure est un argument supplémentaire pour dater le cheval d'une période plus ancienne que les gravures non-figuratives des autres abris.

7. Singularités hydrologiques

Il faut encore souligner une singularité de l'abri 3 au cheval, c'est le seul des abris de la Ségognole qui retienne de l'eau par grande pluviosité, et je ne sais pas si on en connaît d'autres ailleurs. Deux flaques se forment, l'une amont du côté de l'entrée est se déverse dans la seconde au pied du panneau du cheval.

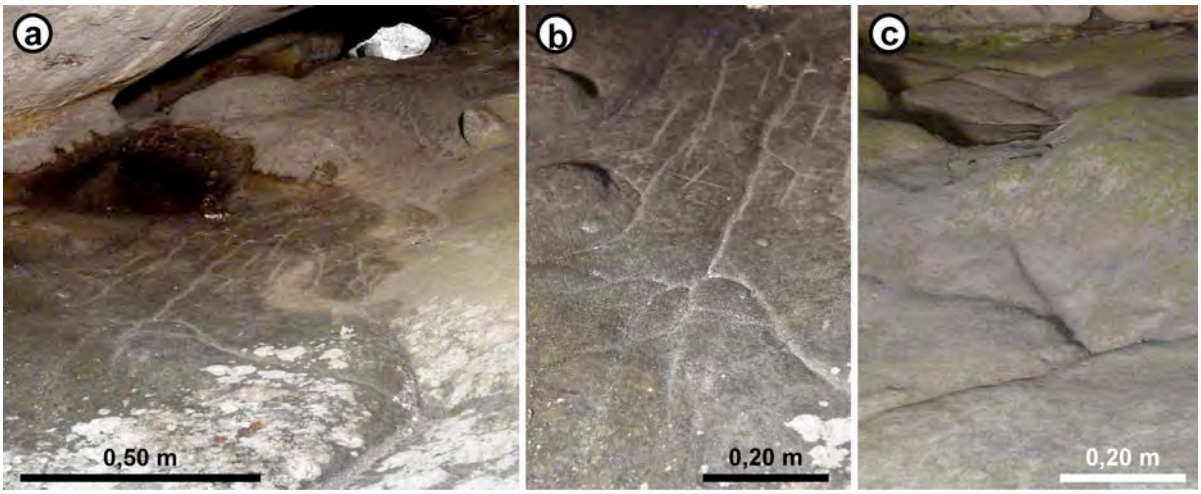

Figure 40 – La Ségognole 3est : réseau de cannelures au plancher photo ARBap_2017_7844. (a) vue d'ensemble du plancher humide après la pluie et flaque d'eau au fond (photo *ARBap_2017_7844* ; F. Bellanger) ; (b) réseau de cannelures qui convergent vers la le creux de l'abris (photo *ARBap_2017_7846* ; F. Bellanger) ; (c) cannelures convergentes au pied de la paroi nord (photo *ARBap_2017_7849* ; F. Bellanger).

Le plancher de l'abri côté est montre une série de fractures parallèles et obliques qui sont dans la direction et le sens des écoulements vers la flaque temporaire qui se forme par temps de pluie (fig. 40a). L'organisation de ce réseau, avec nombreuses confluences, sans direction à « à contre-courant » et le profil régulier des cannelures est singulier pour des fractures naturelles (fig. 40b). Les fractures observées au plancher des autres abris (à l'exception de Ségognole 4 ?) ne présentent ni cette organisation directionnelle, ni cette régularité. Ce sont souvent des fractures qui se recoupent, de directions variées et surtout d'ouverture variable, en particulier dans La Ségognole 5. D'autres cannelures convergentes et plus profondes existent sur la partie nord du plancher (fig. 40c). Leur tracé est également singulier, avec absence de recoupes et régularité des profils des cannelures.

Sans démontrer quoi que ce soit, j'ai l'impression que ces réseaux correspondent initialement à un réseau de fractures qui a été réaménagé, complété et recreusé pour régulariser les cannelures et favoriser les écoulements vers le creux à l'aval. C'est un point auquel il faut prêter attention dans les autres abris.

Figure 41 – Bloc à l'ouest de Ségognole 5bis. (a) bloc avec conduit étroit à voûte effondrée (photo *ARBap_2017_7971* ; F. Bellanger) ; (b) rainures en arcs de cercle concentriques et rainure collectrice à l'extrémité du dispositif(photo *ARBap_2017_7970* ; F. Bellanger).

Une autre singularité existe sur un abri à l'ouest de Ségognole 5bis. C'est un bloc qui montre un conduit éventré (dans la prolongation du conduit principal ?) et dont la voûte paraît effondrée (à vérifier) (fig. 41a). Le plancher de l'abri montre 6-8 rainures en arcs de cercle concentriques, reliés à leur extrémité sud par une rainure perpendiculaire (fig. 41b). Il n'est pas possible de considérer que ces arcs de cercle correspondent à des fentes courbes concentriques naturelles. Ce dispositif est à l'évidence artificiel et construit. Les profils des rainures ne sont pas plus naturels, profil à bords droits et fond relativement large, irrégulier, écaillé. Les rainures ont été creusées par l'homme avec un outil et celles qui sont extérieures à l'abri ont apparemment été altérées et érodées par les intempéries.

Si le dispositif a été taillé, il faut encore essayer d'en cerner l'époque. On ne peut rapporter ce dispositif à une fonction artisanale, liée aux carriers, car on ne voit pas à quoi il pouvait servir. Il a apparemment été creusé avant l'effondrement du toit du conduit, car il est difficile de considérer que la taille s'est faite avec une aussi faible hauteur disponible pour le travail. Mais peut-être que si. Resterait à apprécier la vitesse de l'érosion des sillons extérieurs. Difficile, car à notre connaissance certaines altérations peuvent être relativement rapides, du moins à l'échelle historique.

Reste à imaginer quelle pouvait être la fonction du dispositif. Les rainures qui rejoignent une rainure commune font évidemment penser à un écoulement, et donc un dispositif pour recueillir de l'eau ou un autre liquide (jus alimentaire, autre ?).

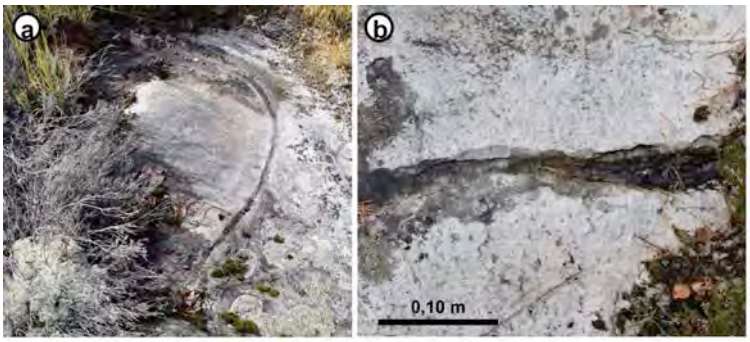

Figure 42 – La platière des Couleuvreux : rainure circulaire creusé autour d'un mamelon d'une dalle. (a) vue d'ensemble de la rainure ; (2) détail des bords écaillés de la rainure (photos Médard Thiry).

En tout état de cause, il est étrange de soupçonner deux dispositifs de type « hydraulique » sur le site de la Ségognole. Cela doit en tout cas attirer notre attention et nous inciter à chercher si des dispositifs comparables existent sur d'autres sites gravés. Un dispositif étrange de ce type a été remarqué par l'auteur sur la platière des Couleuvreux, sur la platière elle-même, hors de tout abri (fig. 42).

8. Les dégradations

La détérioration des abris gravés par les visites des archéologues amateurs et professionnels, les visites de « curiosité » individuelles ou organisées par différents groupes (randonneurs, naturalistes, varappeurs, …) constituent une préoccupation majeure. Crainte depuis longtemps, il apparaît que la pression est plus forte actuellement. Les vandalismes plus importants existent aussi : tags, mais aussi

martellements et même mutilation par prélèvement d'objets. Dans certains cas, les moulages des gravures (sauvages ou non) ont également été très dommageables.

Toutes ces catégories de dégradations existent sur les 2 principaux abris gravés de la Ségognole (abris 4 et 5). Nous allons les décrire et montrer comment l'observation attentive des patines, films et croûtes diverses peuvent révéler l'importance des détériorations et comment elles se sont faites.

8.1 L'usure des parois par circulation des personnes

8.1.1 Les abrasions récentes

Les films bruns sont de bons marqueurs de l'abrasion des cortex friables par frottements des parois lors des visites des abris. L'abri de Ségognole 4, classé Monument Historique, muré, puis forcée par l'ouverture d'une lucarne d'accès est un bon exemple des usures de motifs dues aux visites. Il faut souligner que cet abri avait au départ 3 ouvertures, il était donc initialement largement éclairé et comportait sûrement beaucoup de surfaces à voiles algaires qui ont disparu depuis. Il serait intéressant de voir s'il en existe une description de l'état des parois avant ou au moment de la fermeture des ouvertures.

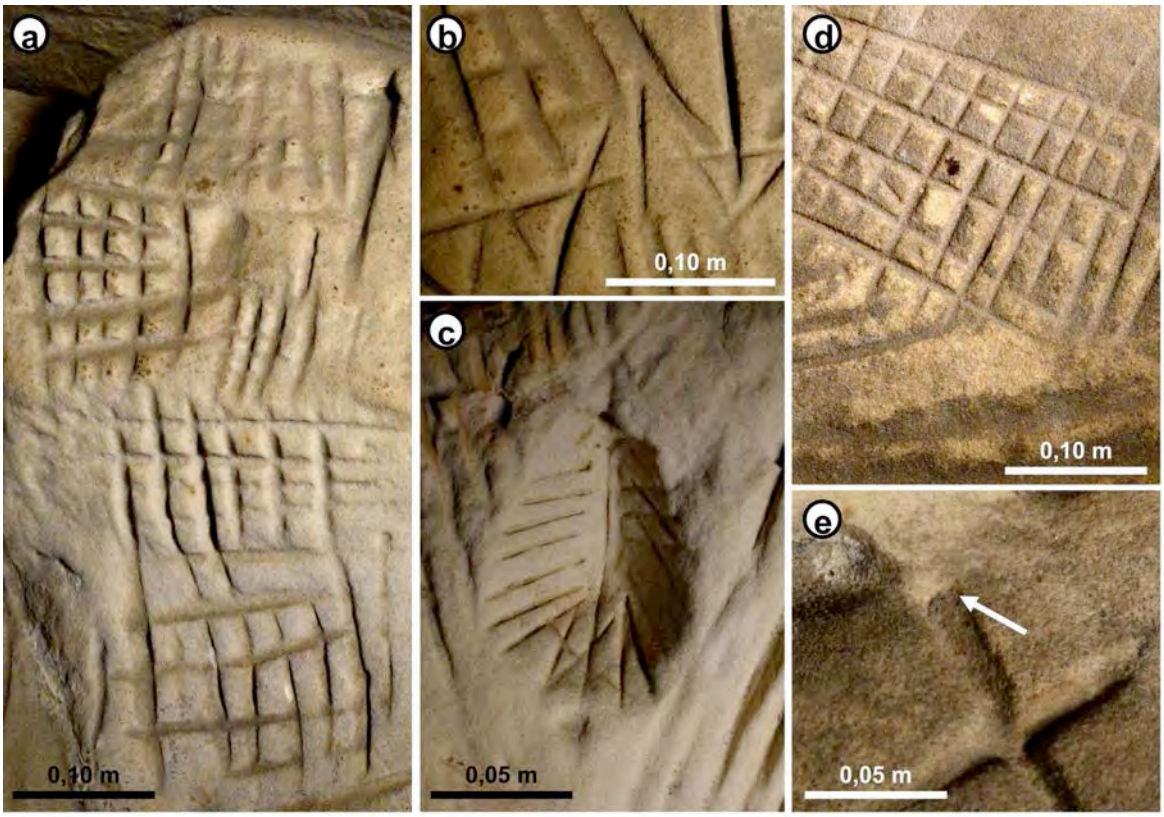

Figure 43 – La Ségognole 4 : abrasions récentes des gravures. (a) les parties en reliefs sont dépourvues de film brun, celui-ci ne subsiste que dans les sillons, les surfaces en relief et la base de la paroi sont les plus usées, les surfaces en retrait et près du plafond sont plus protégées (photo *ARBap_2017_7977* ; F. Bellanger) ; (b) sillons protégés qui ne montrent pas d'abrasion (photo *ARBap_2017_7979* ; F. Bellanger) ; (c) motif en creux abrasé, ainsi que la surface inférieure droite (photo *ARBap_2017_7985* ; F. Bellanger) ; (d) motif au plancher, dans grès plus dur, usé par le piétinement (photo *ARBap_2017_7986* ; F. Bellanger) ; (e) motif au plancher, parie haute abrasée (claire) et petite écaille de film brun desquamé (flèche) (photo *ARBap_2017_7997* ; F. Bellanger).

Quoi qu'il en soit, l'abri présente actuellement un film brun assez régulier sur l'ensemble des parois. En de nombreux endroits, ce film est abrasé par frottements. Les surfaces en relief, et en particulier la base de la paroi nord sont particulièrement usées (fig. 43a), alors que les surfaces en retrait et celles sous le toit sont moins ou pas abrasées (fig. 43b). Il faut noter que même dans les motifs en creux, comme celui dit « soleil » ou « vulve », le film brun ne subsiste que dans les creux des sillons (fig. 43c). Dans ce cas précis il ne peut s'agir de frottements accidentels, ce sont là clairement des frottements avec la main, pour un toucher sensoriel à la manière des enfants, de la forme et du grès au fond du motif !

Les motifs gravés au plancher sont beaucoup plus résistants, ne comportant pas de partie friable. Ils sont néanmoins usés par le piétinement, qui est d'autant plus abrasif que du sable traine sur le fond de l'abri (Fig. 43d). Quelques fois le biofilm induré s'enlève par petits éclats (Fig. 43e).

Les abrasions décrites ci-dessous s'inscrivent bien dans un schéma de circulation des visiteurs. L'abri est relativement étroit, à partir de 2 ou 3 personnes dans l'abri il est presque obligatoire de frotter les parois en se croisant. Le cervidé est « l'attraction » de l'abri. Il est au sol et pour le photographier il faut prendre un maximum de recul … et buter dans la paroi nord. C'est là que les abrasions sont les plus marquées.

8.1.2 Les abrasions anciennes

Figure 44 – La Ségognole 5 : plancher à l'entrée. L'opposition de la rugosité du plancher et du pied de la paroi nord est flagrante (photo Médard Thiry).

On a déjà évoqué que les gravures au plancher des abris présentaient des caractéristiques particulières. Elles sont sans cortex friable et les surfaces gravées sont lisses, sans rugosité, ni marque de desquamation, d'altération ou d'encroûtement. L'opposition entre l'état de surface du plancher et celle des surfaces latérales qui se raccordent aux parois est frappante : les surfaces latérales montrent des rugosités naturelles du grès alors que les planchers sont lissés par usure (fig. 44). Les planchers ont à l'évidence été usés et érodés par la fréquentation des abris. La présence d'une patine régulière brune à grise sur les surfaces et dans le sillons, ainsi que son usure locale permettent de dater cette usure des plancher comme

ancienne, probablement due à la fréquentation des graveurs préhistoriques. Si cette hypothèse était confirmée (par la multiplication des abris étudiés et la comparaison avec des abris moins fréquentés hors des grands circuits), elle donnerait un indice de fréquentation des abris aux temps préhistoriques … plus importante que la fréquentation « touristique » actuelle !

8.2 Les dégâts de moulage et la retaille des sillons

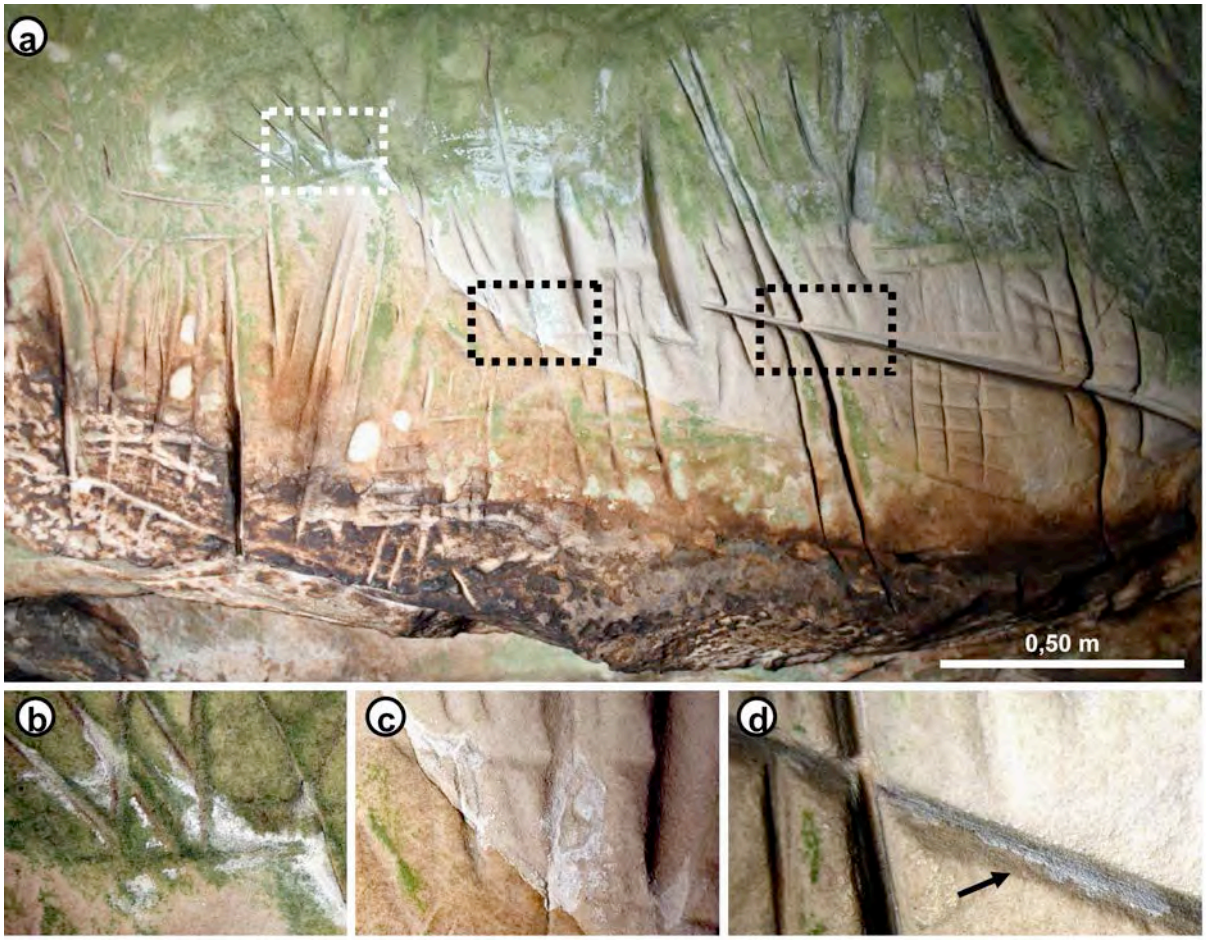

Figure 45 – La Ségognole 5, paroi sud-ouest : dégradations diverses de la paroi. (a) vue d'ensemble du milieu de la paroi. Noter 3 grands domaines, à film brun, à grès nu et à voile chlorophyllien ; (b) et (c) détails de résidus de latex ; (d) détails de sillons retaillés et résidu de latex (flèche) (photos Médard Thiry).

Les dégâts causés par des pratiques anciennes (?) d'étude des gravures peuvent être importants. Ils sont irréversibles, mais encore faut-il en être informé et conscient pour ne pas faire une mésinterprétation de certaines données, en particulier sur les états de surface et la tracéologie des gravures. L'abri de Ségognole 5 constitue presque un catalogue de ce qu'on peut trouver dans ce domaine.

Des traces blanches sur la paroi sud-ouest sont suspectes (Fig. 45a). Au premier abord on peut penser qu'il s'agit de patines blanches constituées des concrétions et efflorescences calcaires (?). Mais leurs dispositions sont suspectes :

(1) Sur le haut du panneau des traces blanches se superposent au voile chlorophyllien (Fig. 45b) et marquent les surfaces protubérantes, comme si un produit blanc avait été frotté sur la paroi.

(2) du produit blanc remplit des creux et fissures (Fig. 45c).

(3) De petites taches blanches sont posées sur la croûte sombre à la base du panneau et qui apparemment n'est pas un *locus* d'efflorescences.

(4) Des traces blanches existent aussi au fond de quelques sillons (Fig. 45d).

Ces observations de détail font penser que ces traces blanches correspondent à des résidus de produits de moulage (latex ou autre substance mêlé à des grains de sable). Le panneau aurait été moulé. On peut même se demander si la surface blanche n'a pas été pelée par le moulage. L'absence de biofilm sur les surfaces et dans les sillons résulterait d'un « peeling » du biofilm primaire qui transparait encore par endroit sous et entre le voile chlorophyllien actuel. Il n'y a là plus de garantie sur la signification des altérations de surface en tout cas de la surface de grès blanc.

Figure 46 – La Ségognole 5, paroi sud-ouest : les sillons verticaux sont couverts d'un film brun, ils sont anciens ; en revanche les sillons horizontaux sont à vif, ils ont à l'évidence été ravivés récemment (photo *ARBap_2017_7933* ; F. Bellanger).

Ce panneau montre aussi de nombreuses traces de sillons retaillés récemment, ou du moins après développement du film brun (fig. 46). Ces retailles de sillons ont pu être la conséquence du moulage, pour les nettoyer de résidus de latex, comme il en subsiste de petites traces sur la croûte sombre. Mais on ne peut exclure que certains sillons ont été « ravivés » pour les rendre plus visibles/évidents pour la photo. C'est aussi sur ce panneau qu'a été noté un biofilm écaillé/arraché en flanc de sillon sur la partie gauche du panneau (Fig. 16d).

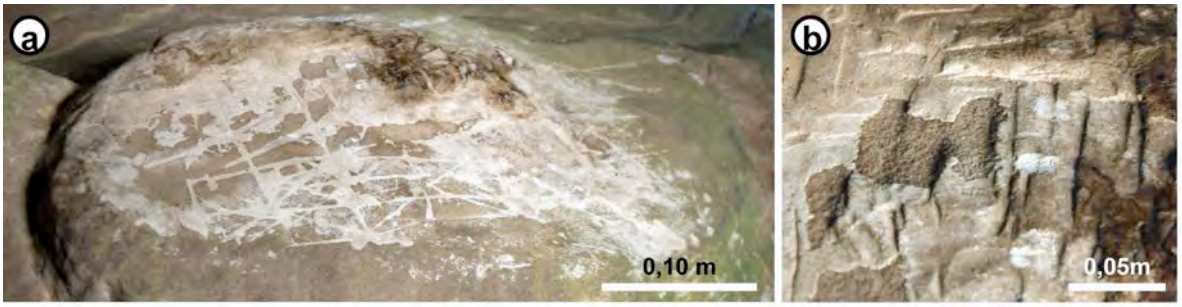

Figure 47 – La Ségognole 5 : salissures de latex sur un promontoire au plancher. (a) la couche de latex atteint près de 1 cm d'épaisseur sur la partie noircie (par de la paraffine de bougie) et les sillons gravés sont colmatés ; (b) traces de coups de spatule, probablement pour essayer d'enlever du latex avant qu'il ne soit complètement pris (photos Médard Thiry).

Enfin, d'importantes souillures de latex existent sur une protubérance du plancher qui a d'ailleurs été vandalisée précédemment (voir ci-dessous) (fig. 47a). La masse résiduelle de latex remplit et masque partiellement les sillons des gravures au sommet de la protubérance. Des traces de spatule ou burin montrent qu'on a cherché à dégager cette masse de latex (fig. 47b). Des traces de latex sont répandues tout autour de la protubérance. Il faut essayer d'interpréter cette structure. Le latex post-date le vandalisme de la protubérance. De toute évidence la surface n'a pas été traitée par un produit anti-adhésion, il n'y avait donc pas intention de faire un moulage de cette structure mutilée. Il est vraisemblable que cette souillure corresponde à l'endroit où était posé le récipient contenant le produit qui a servi au moulage de la paroi sud-ouest. Désastreux !

8.3 Les prélèvement d'échantillons

Les dégâts les plus importants subis par l'abri Ségognole 5 relèvent du vandalisme. Il s'agit de prélèvements de blocs gravés qui ont pu atteindre plusieurs kilos. Ce sont les protubérances de grès qui ont été ciblés, car plus facilement détachables.

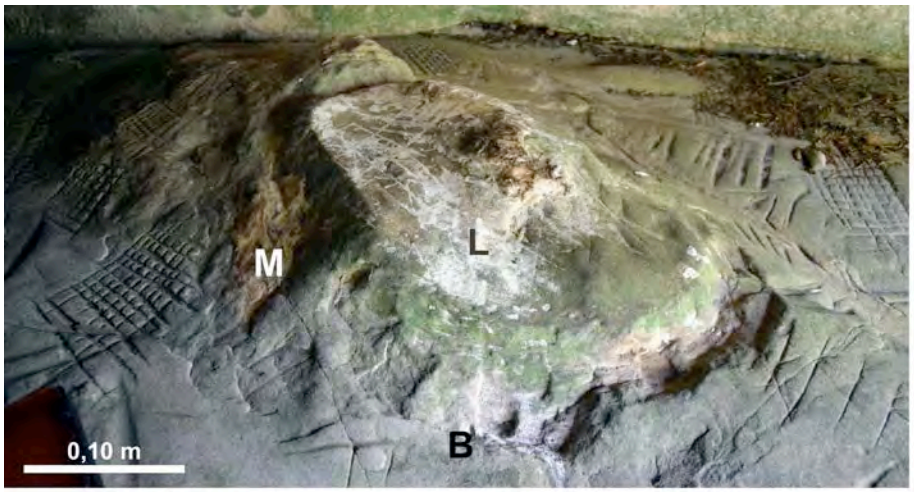

Figure 48 – La Ségognole 5 : protubérance au plancher entaillé par une saignée pour essayer de la prélever. On voit nettement les coups de burin (B), le latex (L) et le mortier (M) (photo Médard Thiry).

La protubérance au plancher, souillée par le latex, a été incisée au burin sur tout son pourtour, indubitablement pour en faire « sauter » la calotte (fig. 48). Les souillures de latex sont post-incision. Une partie de la saignée a été remplie de mortier en différents endroits et apparemment certains remplissages se sont écaillés depuis. De quand cette "réparation" cache misère ? On peut imaginer que cela a été fait au moment ou l'abri Ségognole 4 a été muré et que du mortier était disponible sur le site.

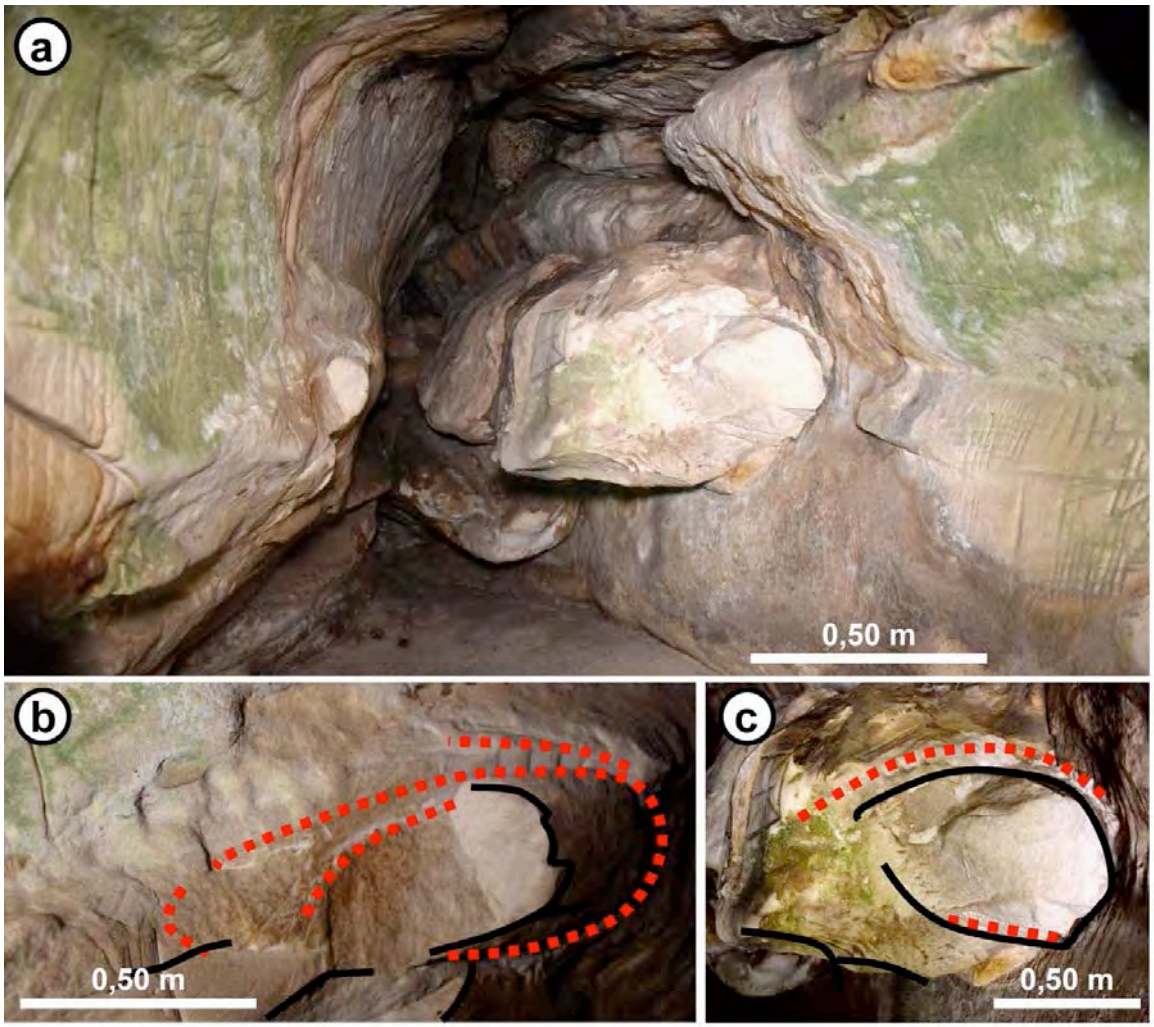

Figure 49 – La Ségognole 5 : vandalisme. (a) vue vers l'ouest des 2 fuseaux de grès en relief sur les parois latérales et qui ont été prélevés ; (b) détail du fuseau éclaté sur paroi sud, on voit clairement les coups de burin et la saignée ; (c) détail du fuseau éclaté sur paroi nord. Les traits noirs esquissent le contour des blocs enlevés, les pointillés rouges soulignent les saignées marquées par les coups de burin (photos Médard Thiry).

Vers le fond de l'abri ce sont 2 fuseaux de grès qui formaient protubérance qui ont été vandalisés et emportés (fig. 49). Là aussi une saignée a été creusée au burin autour des protubérances pour les dégager. L'opération a au moins partiellement échoué, puisque des saignées sont restées en place car les blocs se sont fendus en travers … et ont probablement éclaté en plusieurs morceaux. Opération désastreuse. Ceci est d'autant plus dommageable que ces fuseaux en relief sont souvent des grès plus tendres, et qui, de ce fait, ont pu supporter des gravures plus profondes et qui épousaient les morphologies.

9. Études complémentaires à faire dans la suite du programme

Les observations et les déductions présentées dans ce rapport sont des « remarques préliminaires », les faits décrits doivent être complétés et confirmés. Plusieurs aspects n'ont pas été abordés, surtout parce qu'ils nécessitent l'acquisition de données analytiques sur le terrain et en laboratoire.

Un gros travail d'analyse reste à faire pour caractériser et confirmer les biofilms décrits dans cette phase préliminaire, mais aussi pour analyser toutes les autres figures d'altération qui n'ont pas été décrites par manque de donnés. La seule connaissance des biofilms n'est pas suffisante pour caractériser l'altération des cavités. Il y a un besoin impératif d'inventorier et d'étudier les composantes minérales. Elles constituent les marqueurs des altérations géochimiques qui sont à l'œuvre dans les cavités.

9.1 Géomorphologie de la Butte de La Ségognole

Dans un but prospectif, de recherche/localisation d'abris gravés, il est intéressant d'essayer de cerner les particularités des abris qui ont fait l'objet de gravure sur la butte de la Ségognole. Dégager les caractères des grès, mais surtout les mécanismes de fracturation de la dalle primaire et la mise en place du chaos de rochers. C'est essentiellement une analyse géométrique de la disposition des blocs et de repérage des blocs qui se correspondent pour en déduire leur cheminement le long de pente, avant gravure, mais peut-être aussi retrouver des déplacements plus récents.

La base d'une telle analyse est l'image LIDAR qui permettra de mettra d'avoir un document donnant la position des blocs et qui constituera la base graphique pour reconstruire le cheminement des blocs pendant l'érosion progressive de la butte (voir B. Bouet, Première partie, chapitre 4, ce volume). Cette étude doit porter sur tout le flanc sud-est de la butte et, si possible, prendre en compte toute la butte. Une spatialisation de toutes les cavités (grandes ou petits) pourra se greffer sur ce canevas géométrique pour voir leur distribution est sous-tendu par une règle.

La couverture LIDAR étant annoncée pour fin 2017, l'étude pourra se faire lors de la prochaine année du programme.

9.2 Analyse pétrographique des biofilms

Les biofilms et les BIRC (*Biologically-Initiated Rock Crust*) sont une composante essentielle des cavités gravées et il est primordial d'en appréhender leur évolution … pour la préservation dans le futur, mais aussi comme archive du passé. Il faut aller plus loin pour caractériser les composantes biologiques et minérales de ces encroûtements.

Il faut envisager une analyse des géométries, plus fine que la loupe binoculaire utilisée dans l'approche préliminaire. Il faut passer par des inclusions/consolidations avec des résines pour confectionner des lames minces polies non couvertes. Ces préparations permettront une étude pétrographique classique pour étudier les interactions du biofilm avec le substrat gréseux et pourront être utilisés pour des analyses chimiques ponctuelles.

Les biofilms devront aussi faire l'objet d'observations d'éclats et de desquamations au Microscope Électronique à Balayage (MEB) pour avoir un premier inventaire des différentes composantes organiques de ces revêtements organiques. Pour aller plus loin il faudra envisager une collaboration avec un biologiste des sols.

9.3 Caractérisation des matériaux d'altération

(1) La composition des grès doit être précisée, en particulier leur teneur en carbonate. Une analyse systématique par Diffraction des Rayons X (DRX) est l'outil adapté. On peut prévoir l'analyse d'une cinquantaine d'échantillons sur les équipements de l'École des Mines.

(2) Les diverses croûtes indurées devront être reconnues par l'analyse chimique ponctuelle. Si on sait qu'elles sont essentiellement organiques, il faut vérifier si des accumulations minérales leurs sont associées, la silice est une question majeure, mais aussi Fe et d'autres éléments accompagnants, notamment Si, Al, Mn et Pb. Le plomb pouvant éventuellement être un marqueur de l'époque romaine. Ils sont des indicateurs des environnements géochimiques de ces altérations, la piste pour savoir comment cela fonctionne, ce qui vient de l'extérieur, ce qui vient de l'intérieur du grès. Il essentiel de caractériser cette interface atmosphère/roche si on veut comprendre comment évoluent les cavités. C'est aussi un point obligatoire si on vise une publication de rang international pour l'équipe sur ce sujet. On peut envisager qu'une semaine de travail au Microscope Électronique à Balayage (MEB) sera nécessaire. Il ne faut pas exclure des analyses sur l'accélérateur de Saclay pour obtenir des cartes géochimiques sur l'épaisseur totale des croûtes (zonation) qui permettront de préciser si des précipitations minérales sont associées aux composés organiques et renforcent la croûte, plus particulièrement de la silice qui est souvent évoquée parce qu'en milieux siliceux, mais très rarement mise en évidence.

(3) Les efflorescences blanches sur les parois n'ont pas été prélevées/étudiées. Il faut les caractériser car elles sont des traceurs de la chimie des eaux de pore du grès qui s'évaporent en donnant ces précipitations. La difficulté réside dans leur prélèvement, sachant qu'il s'agit souvent de films extrêmement fins. Il faudra sûrement recourir à des analyses chimiques ponctuelles au MEB.

(4) Les imprégnations ferrugineuses doivent être inventoriées et analysés. Les analyses minéralogiques par DRX sont une première approche. Mais la méthode est peu sensible pour les oxydes du fer, il faudra passer pour des analyses chimiques ponctuelles au MEB.

(5) Pour les patines très fines et les efflorescences il ne sera en général pas possible d'obtenir des échantillons assez gros et manipulables pour des analyses *ex situ*. Il faut envisager le recours à des analyses *in situ*, en particulier par spectrométrie Fluorescence X (FX) portable qui donne la composition chimique de la roche, ce qui, dans le cas des matériaux, est d'interprétation relativement simple. C'est une méthode relativement lourde et qui nécessite une autorisation de posséder et transporter une source radioactive et manipulable qui n'est accordée qu'à un personnel formé et accrédité par les services de la radio-protection. Néanmoins il n'est pas exclu d'avoir accès à une FX portable via un groupement de laboratoires associées à l'École des Mines. C'est en tout cas l'équipement idéal pour « balayer » les différents faciès des surfaces des abris et faire l'inventaire des matériaux d'altérations sous différentes conditions d'exposition, environnements locaux, etc.. Il faut en tout cas essayer de mettre sur pied une campagne de mesure sur la Ségognole et sur d'autres sites gravés.

Remerciements :
MT tient à remercier toute l'équipe qui a participé à la campagne de terrain du 13 au 24 mars 2017 et en particulier F. Bellanger, A. Bénard, E. Levignes, A. Lureau, E. Robert, V. Romero Godofredo, R. Touquet et B. Valentin. Leur sympathie et facilité de contact, toutes les discussions autour du grès gravé et même l'ouverture à mon regard iconoclaste de géologue. C'était une grande expérience personnelle de coopération scientifique.

Bibliographie

ALEXANDROWICZ Z., MARSZAŁEK M., RZEPA G.
2014 – « Distribution of secondary minerals in crusts developed on sandstone exposures », *Earth Surf. Process. Landforms*, 39, p. 320–335.

BÉNARD A.
2007 – *L'abri orné paléolithique de la Ségognole (Noisy-sur-Ecole, Seine-et-Marne). Mémoire de master Quaternaire et Préhistoire*, Muséum National d'Histoire Naturelle, 66 p.

BÉNARD A.
2010 – « L'abri orné de la Ségognole, Noisy-sur -Ecole, Seine-et-Marne. Description des gravures et proposition d'attribution chronoculturelle », *Bulletin de la Société préhistorique française*, 107/3, p. 521-536.

CHEN J., BLUME H. P., BEYER L.
2000 – « Weathering of rocks induced by lichen colonization—a review », *Catena*, 39(2), p. 121-146.

DORN R. I., MAHANEY W. C., KRINSLEY D. H.
2017 – « Case hardening: Turning weathering rinds into protective shells », *Elements*, 13(3), p. 165-169.

GADD G. M.
2017 – « Fungi, rocks, and minerals », *Elements*, 13(3), p. 171-176.

GADD G. M., BAHRI-ESFAHANI J., LI Q., RHEE Y. J., WEI Z., FOMINA M., LIANG X.
2014 – « Oxalate production by fungi: significance in geomycology, biodeterioration and bioremadation », *Fungal Biology Reviews*, 28(2), p. 36-55.

GRONDONA I., MONTE E., RIVES V., VICENTE M. A.
1997 – « Lichenized association between Septonema tormes sp. nov., a coccoid cyanobacterium, and a green alga with an unforeseen biopreservation effect of Villamayor sandstone at 'Casa Lis' of Salamanca, Spain », *Mycological Research*, 101(12), p. 1489-1495.

LIU T., BROECKER W.S.
2008 – « Rock varnish evidence for tatests Pleistocene millenial-scale wet events in the dryl ands of western United States. Geology, 36, p. 403-406.

MARSZAŁEK,M., ALEXANDROWICZ Z., RZEPA G.
2014 - « Composition of weathering crusts on sandstones from natural outcrops and architectonic elements in an urban environment », *Environmental Science and Pollution Research*, 21(24), p. 14023-14036.

MORILLAS H., MAGUREGUI M. MARCAIDA I., TREBOLAZABALA J., SALCEDO I., MADARIAGA J.N.
2015 - « Characterization of the main colonizer and biogenic pigments present in the red biofilm from La Galea Fortress sandstone by means of microscopic observations and Raman imaging », *Microchemical Journal*, 121, p. 48–55.

MORILLAS H., MAGUREGUI M., TREBOLAZABALA J., MADARIAGA J.M.
2015 – « Nature and origin of white efflorescence on bricks, artificial stones, and joint mortars of modern houses evaluated by portable Raman spectroscopy and laboratory analyses », *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 136, p. 1195–1203.

SLAVÍK M., BRUTHANS J., FILIPPI M., SCHWEIGSTILLOVÁ J., FALTEISEK L., ŘIHOŠEK J.
2017 – « Biologically-initiated rock crust on sandstone: Mechanical and hydraulic properties and resistance to erosion », *Geomorphology,* 278, p. 298-313.

THIRY M.
2007 – « Siliceous karst development in the Fontainebleau Sandstone (France) », *Nature Conservation*, 63, p. 77-83.

THIRY M.
2016 – « Les Calcites de Fontainebleau : occurrence et genèse », *Bull. Ass. Natur. Vallée Loing*, 89(3), p. 111-133.

THIRY M., LIRON M.N.
2012 – « Evolution géomorphologique périglaciaire du Massif de Fontainebleau », *Bull. Ass. Naturalistes de la Vallée du Loing et du Massif de Fontainebleau*, 88/3, p. 102-118.

THIRY M., PANZIERA J.P., SCHMITT, J.M.
1984 – « Silicification et désilicification des grès et des sables de Fontainebleau. Evolutions morphologiques des grès dans les sables et à l'affleurement », *Bull. Inf. Géol. Bass. Paris*, 21(2), p. 23-32.

THIRY M., SCHMITT J.-M., INNOCENT C., COJAN, I.
2013 – « Sables et Grès de Fontainebleau : que reste-t-il des faciès sédimentaires initiaux ? », *14ème Congrès Français de Sédimentologie, Trois excursions géologiques en région parisienne, Livre d'excursions*, Paris 2013, Publ. ASF, n°74, p. 37-90.

WHITLEY D.S., SANTORO C.M., VALENZUELA D.
2017 – « Climate change, rock coatings, and the archeological record », *Elements*, 13, p. 183-186.