



HAL
open science

**Programme collectif de recherche (2018-2020) coordonné
par Boris VALENTIN (UMR 7041 – Université Paris 1).
Rapport de synthèse (2020).**

Médard Thiry, Fantine Bellanger, Michel Rey, Patrick Dubreucq

► **To cite this version:**

Médard Thiry, Fantine Bellanger, Michel Rey, Patrick Dubreucq. Programme collectif de recherche (2018-2020) coordonné par Boris VALENTIN (UMR 7041 – Université Paris 1). Rapport de synthèse (2020).. [Rapport de recherche] UMR 7041 – Université Paris 1, Mines-ParisTech - Centre de Géosciences. 2020, pp.39-74. halshs-03065690

HAL Id: halshs-03065690

<https://shs.hal.science/halshs-03065690v1>

Submitted on 14 Dec 2020

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 (2018-2020)
coordonné par Boris VALENTIN (UMR 7041 – université Paris 1)

Travaux d'Alain BÉNARD, Fantine BELLANGER, Béatrice BOUET, François BOUGNÈRES,
Alexandre CANTIN, Laurent COSTA, Isabelle DE MIRANDA, Patrick DUBREUCQ,
Colas GUÉRET, Émilie LESVIGNES, Camilla MUÑOZ, Samuel PRAIZELIN,
Michel REY, Éric ROBERT, Médard THIRY, Benoit TOUCHARD,
Boris VALENTIN, Laurent VALOIS & Lydia ZOTKINA

Rapport de synthèse (2020)

DRAC Île-de-France, Service régional de l'archéologie
INRAP Centre Île-de-France,
UMR 7041 & 7194,

Muséum National D'histoire Naturelle & Université Paris 1

COMPLEMENTS A L'ETUDE DES ENCROûTEMENTS SUR PANNEAUX GRAVES

Médard Thiry, *Mines ParisTech, PSL Research University*

Fantine Bellanger

Michel Rey, *GERSAR*

et Patrick Dubreucq, *Membre des Amis de la Forêt*

1 Enjeux de l'étude des encroûtements du grès

Les cavités qui existent dans les grès de Fontainebleau, appelées abris par les archéologues, ont leurs parois couvertes par des encroûtements (*sensu lato*) plus ou moins importants qui, d'une part occluent le grès et, d'autre part, sont à l'origine de desquamations qui arrachent des pellicules superficielles du grès sous-jacent. Le caractère commun de ces encroûtements est leur granularité et texture très différentes de celle du grès. Contrairement aux grès, les encroûtements ne s'égrainent pas, leur cohésion est liée à une pellicule qui recouvre de la surface du grès. Les croûtes se forment de longue date, depuis la mise à l'affleurement des blocs, ou peu de temps après.

Certaines croûtes ont été gravées de façon indubitable par l'Homme, d'autres recouvrent les sillons gravés par l'Homme et se sont donc développées après les gravures. Les plus épaisses sont liées aux parties humides des abris (fentes qui drainent les eaux de pluie et qui en humidifient les lèvres). Dès les premières inspections des abris ces croûtes n'ont cessé d'être mises en avant au nom du « meilleur et du pire ». Le pire quand ces encroûtements masquent le grès et donc les éventuelles traces du travail de gravure, et surtout lorsqu'elles « mangent » les panneaux gravés par exfoliation. Le meilleur quand on fait l'hypothèse que leur formation cumulative dans le temps pourrait servir à la datation relative d'encroûtements qui touchent des objets d'âge différent. C'est en tout cas une voie à explorer pour éventuellement obtenir des indications d'âge complémentaires aux arguments archéologiques ou une estimation même imparfaite en l'absence d'autres arguments. Pour cela il s'est avéré nécessaire de comprendre comment se font et se défont les croûtes.

Nous résumons ici les observations qui ont été faites sur les encroûtements des abris gravés depuis le début du PCR ARBap en 2017 et qui ont été présentées de manière dispersée dans les rapports des années précédentes. L'étude des croûtes s'est faite en trois étapes : les premières analyses ont été faites sur échantillons prélevés dans des abris non gravés (2017) avec reconnaissance des morphologies à la loupe binoculaire ; une seconde étape (2018-2019) a consisté à préciser les organisations micro-

morphologiques et les compositions chimiques des composantes à l'aide du Microscope Electronique à Balayage (MEB) ; enfin la troisième étape (2020), qui fait l'objet du présent rapport, a cherché à mettre au point une méthode d'observation directe *in situ* des croûtes liées aux objets archéologiques.

2 Méthodologie

Les observations à la **loupe binoculaire** sur des éclats et pellicules de desquamation des grès ont été faites avec une loupe binoculaire *Leica EZ4HD*® avec caméra numérique intégrée. Certains échantillons ont au préalable été traités à l'eau de Javel (NaClO, hypochlorite de sodium) en solution diluée pour les débarrasser des particules fines organiques (vivantes ou détritiques) qui couvrent parfois les surfaces et gênent l'observation. Les séquences d'images enregistrées à différentes profondeurs de mise au point ont été compilées par le logiciel *Helicon Focus*® qui permet de compiler ces prises de vues (clichés partiellement nets) pour recomposer des vues nettes même sur des profondeurs de champ qu'on ne peut atteindre par le seul dispositif optique (*focus stacking*).

Les observations et analyses chimiques au Microscope Électronique à Balayage (MEB) ont été faites sur un microscope JEOL équipé d'un détecteur Rayons-X EDS-BRUKER Xflash 4010 133eV et d'un système de microanalyse Quantax 400. Le détecteur utilisé et sa configuration permettant la détection d'éléments jusqu'au Bore. Les échantillons ont été métallisés à l'Or-Palladium

Les observations morphologiques *in situ* des encroûtements ont été réalisées avec un dispositif optique souvent appelé « **loupe digitale** » d'utilisation relativement facile sur le terrain. Le matériel utilisé est de marque DINO-LITE®, modèle EDGE AM7915MZT, grossissement de 20 à 200, éclairage par 8 LED avec variateur d'intensité et de direction, polariseur et possibilité d'enregistrement d'images en *Extended Dynamic Range* (EDR). Pour ces loupes, la mise au point dépend de la distance à l'objet et du grossissement. Outre les grossissements selon un gradient continu, obtenus par le déplacement d'une molette, on peut aussi fixer le grossissement en l'ajustant à une distance de travail définie correspondant à un tube « allonge » fixé au bout de la loupe. Ainsi on peut régler la mise au point en maintenant la loupe fixe et en jouant légèrement sur le grossissement. C'est la méthode de travail qui a été adoptée pour faciliter les opérations et surtout obtenir une relative stabilité de la loupe. Mais la limitation majeure du matériel est sa très faible profondeur de champ et les surfaces naturelles observées ne sont pas planes. Aussi les images ne présentent qu'une partie limitée qui est nette, le plus souvent moins de 50% de la photo, parfois seulement 15%. Pour contourner cette difficulté, plusieurs images ont été enregistrées à des profondeurs différentes en jouant sur le grossissement (car il y a liaison entre grossissement et distance focale) puis ces séquences d'images ont été compilées par le logiciel *Helicon Focus*® (*focus stacking*). On a opté de travailler avec un tube allonge court qui donne accès à 2 grossissements, l'un à x65 et l'autre à x170 qui correspondent respectivement à des tailles d'objet d'environ 6 et 2 mm sur la largeur totale des images et qui conviennent bien aux objets observés.

3 Encroûtements des abris dans les Grès de Fontainebleau

3.1 Description générale

Les encroûtements d'altération de couleur brune, grise et noire couvrent presque systématiquement les parois des cavités ou abris qui existent dans les blocs de grès. Ils se remarquent surtout par leur induration qui se distingue par l'absence d'effritement des grains de quartz du grès sur ces surfaces altérées. Leur surface peut être régulière, voire même lisse, avec la granularité du grès complètement ou partiellement masquée, ou au contraire présenter un aspect rugueux voire pustuleux, mais toujours cohésif (fig. 1A).

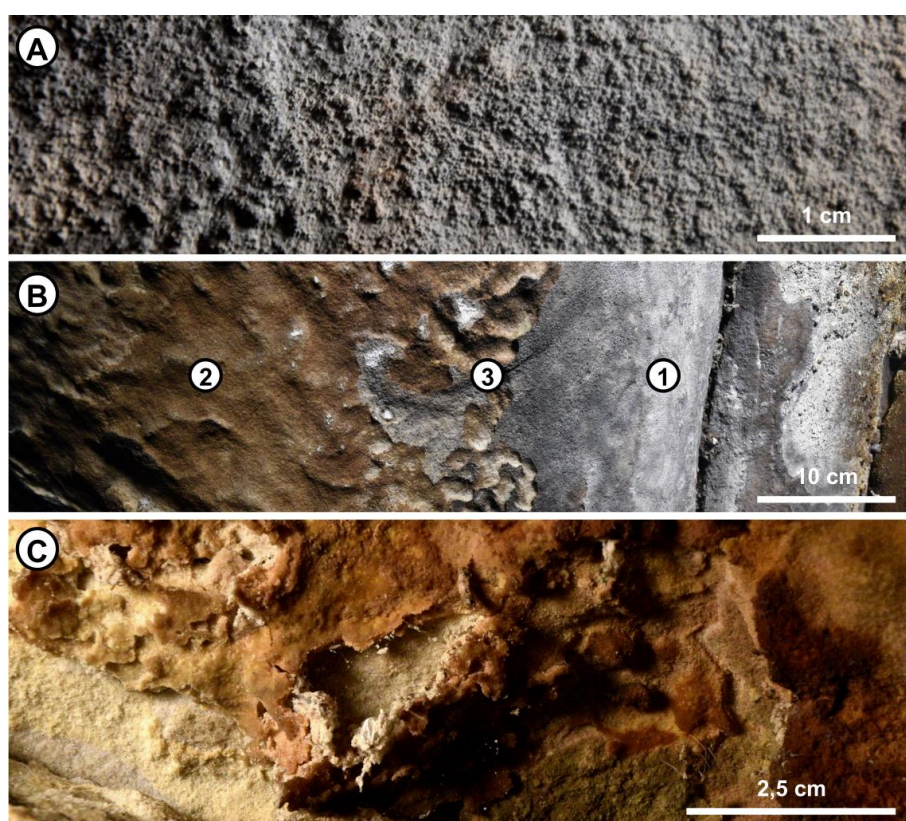


Figure 1 – Aspect macroscopique des croûtes indurées. (A) croûte épaisse à surface rugueuse et scoriacée ; panneau aménagé de La Ségognole 3 à Noisy-sur-École (Seine-et-Marne). (B) variation latérale des croûtes ; (1) épaisse croûte sombre le long d'une fente, (2) passage latéral à croûte brune moins épaisse, (3) alvéoles d'altération avec grès clair sous-jacent ; voûte La Ségognole 3. (C) desquamation d'une croûte brune avec mise à nu et effritement du grès clair sous-jacent ; voûte de La Saboterie 1 à Buno-Bonnevaux (Essonne).

Des indurations sombres plus épaisses s'observent le long des fentes à l'intérieur des abris et passent latéralement aux patines brunes à blondes des surfaces friables gravées (fig. 1B). Souvent les croûtes s'altèrent et se décollent par desquamation du support gréseux mettant à nu le grès clair et friable sous-jacent (fig. 1C). Ces desquamations sont éminemment destructrices quand elles affectent des gravures. Les croûtes ont en moyenne 0,1 à 0,4 mm d'épaisseur.

3.2 Agencement général

L'observation à la loupe binoculaire montre que ces surfaces encroûtées sont constituées de micro-sphérulites et incluent des débris organiques (débris végétaux, pollens, mais aussi de nombreux débris d'insectes, de leurs pontes, etc.). Elles sont composées d'une pellicule relativement homogène, d'aspect amorphe, sans organisation propre, qui recouvre et masque les grains de quartz du grès sous-jacent ou, du moins, en estompe les formes géométriques quand la croûte est moins épaisse (fig. 2A). Les fractures et les bords des écailles de desquamation permettent d'observer leur organisation interne. Ce n'est que sous la croûte superficielle que les grains de quartz se distinguent, plus ou moins cimentés par celle-ci, puis le matériel d'aspect amorphe diminue en profondeur pour ne former que des voiles transparents sur les grains de quartz, avant d'atteindre le grès blanc à grains de quartz translucides et à facettes nourries (fig. 2B).

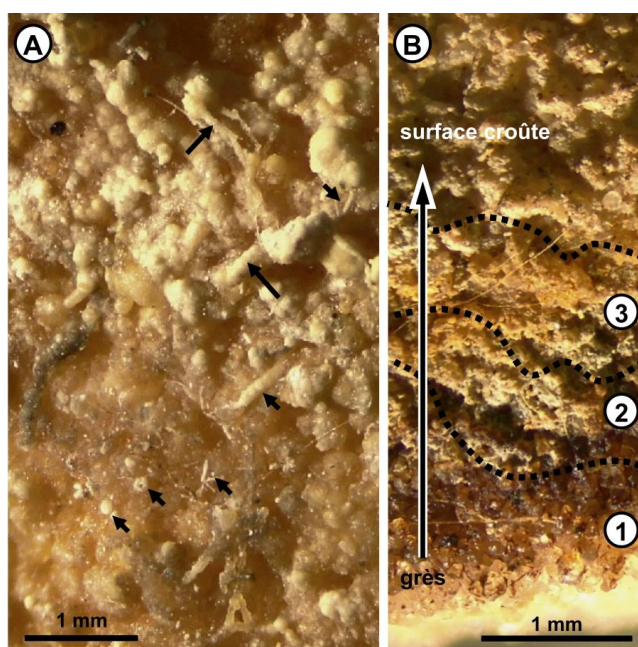


Figure 2 – Croûte brune, observation à la loupe binoculaire. (A) la croûte ne montre pas de grains de quartz, en revanche de nombreux débris ou traces d'activité biologique sont préservés, en particulier des grains de pollen et d'autres débris organiques divers (flèches) ; voûte est de La Ségognole 3 à Noisy-sur-École (Seine-et-Marne). (B) coupe oblique d'une croûte sur grès : (1) grès à grains de quartz à facettes nourries, (2) la croûte interpénétrée entre les grains de quartz, (3) croûte granuleuse sans grains de quartz visible ; auvent de bloc à proximité de La Ségognole 5. Echantillons traités à l'eau de Javel pour les débarrasser du voile de particules organiques.

L'abondance de éléments d'origine biologique nous avait conduit à comparer ces croûtes aux croûtes indurées biologiquement (BIRC : Biologically Indurated Rock Crust) décrites dans la littérature (Alexandrowicz et al., 2014 ; Morillas et al., 2015 ; Dorn et al., 2017) et interprétées comme des bio-colonisations des surfaces gréseuses par des champignons, des lichens, des cyanobactéries et des algues vertes. L'évolution par accumulation depuis la surface nous avait conduit à comparer ces croûtes des abris du Bassin de Paris aux croûtes organiques recouvrant des pétroglyphes de Californie et d'Argentine et pour lesquelles il a été montré qu'elles pouvaient enregistrer jusqu'à 10 niveaux successifs d'accumulation

correspondant à des variations climatiques, datables et corrélables entre les différents mégalithes d'un site (Liu, Broecker, 2008 ; Whitley et al., 2017). De plus, nous avons observé que de fines croûtes similaires peuvent se former en une dizaine d'années à la surface des grès blancs après leur extraction des sables (Cantin et Thiry, 2017).

Ces premières interprétations étaient corroborées par l'observation de desquamations de croûtes avec développement d'une néo-croûte après desquamation de la croûte primaire. On aboutit dans certains cas à l'effacement du sillon gravé, comme sur l'arrière-train du cheval gravé de l'abri de La Ségognole 3 (Thiry, 2017). Ainsi les croûtes ouvraient des perspectives de datation, sinon absolue, du moins relative entre éléments proches sur un panneau gravé.

3.3 Micromorphologie et composition

Les croûtes observées au MEB révèlent aussi une grande diversité de traces d'activité biologique telles que de petits insectes et leurs mues, des fils d'araignées accrochés à la croûte, des débris végétaux (fig. 3A et B), tous posés sur la croûte. Souvent des filaments segmentés, de 2-3 μm de diamètre, qui s'apparentent à des mycéliums de champignons, sont plaqués sur la croûte et pénètrent entre les éléments constitutifs de celle-ci (fig. 3B). Dans ce cas, l'interaction avec la croûte est sûrement plus forte que pour les précédentes traces d'organismes.

Les encroûtements sont surtout composés de cristaux de gypse aplatis, comparables à ceux des roses des sables (fig. 3C) et qui forment souvent des lépidosphères de cristaux interpénétrés (fig. 3D). On distingue essentiellement deux types d'agrégats de cristaux de gypse (fig. 3E) : (1) des lépidosphères de 50 à 1000 μm de diamètre, formés de cristaux automorphes entrecroisés et (2) des pellets formés par l'agglomération de débris de cristaux de gypse, qui sont donc secondaires et apparemment d'origine biologique. Ces agrégats cristallins sont à l'origine de la granularité des encroûtements gypseux. Les agrégats sont cimentés entre eux par des cristaux de gypse microcristallins, sans faces cristallines différenciées. Les cristaux de gypse pénètrent aussi le grès sous-jacent, s'y enracinent en quelque sorte, avec cristallisation de cristaux automorphes dans la porosité entre les grains de quartz (fig. 3F & G). Enfin, la surface des encroûtements est toujours plus compacte, généralement dépourvue de porosité, par comparaison avec les charpentes très « aérées » des agrégats internes de la croûte (fig. 3H et I). Chaque « pustule » de la croûte correspond à une lépidosphère plus ou moins enrobée (encroûtée) par des dépôts de gypse. C'est littéralement un « encroûtement » de la croûte par dépôts et cristallisations de gypse microcristallin qui viennent encapsuler des lépidosphères (fig. 3H). Ailleurs, l'encroûtement superficiel montre des microfissures (fig. 3I) qui correspondent à des tensions de retrait, comme dans une boue qui sèche.

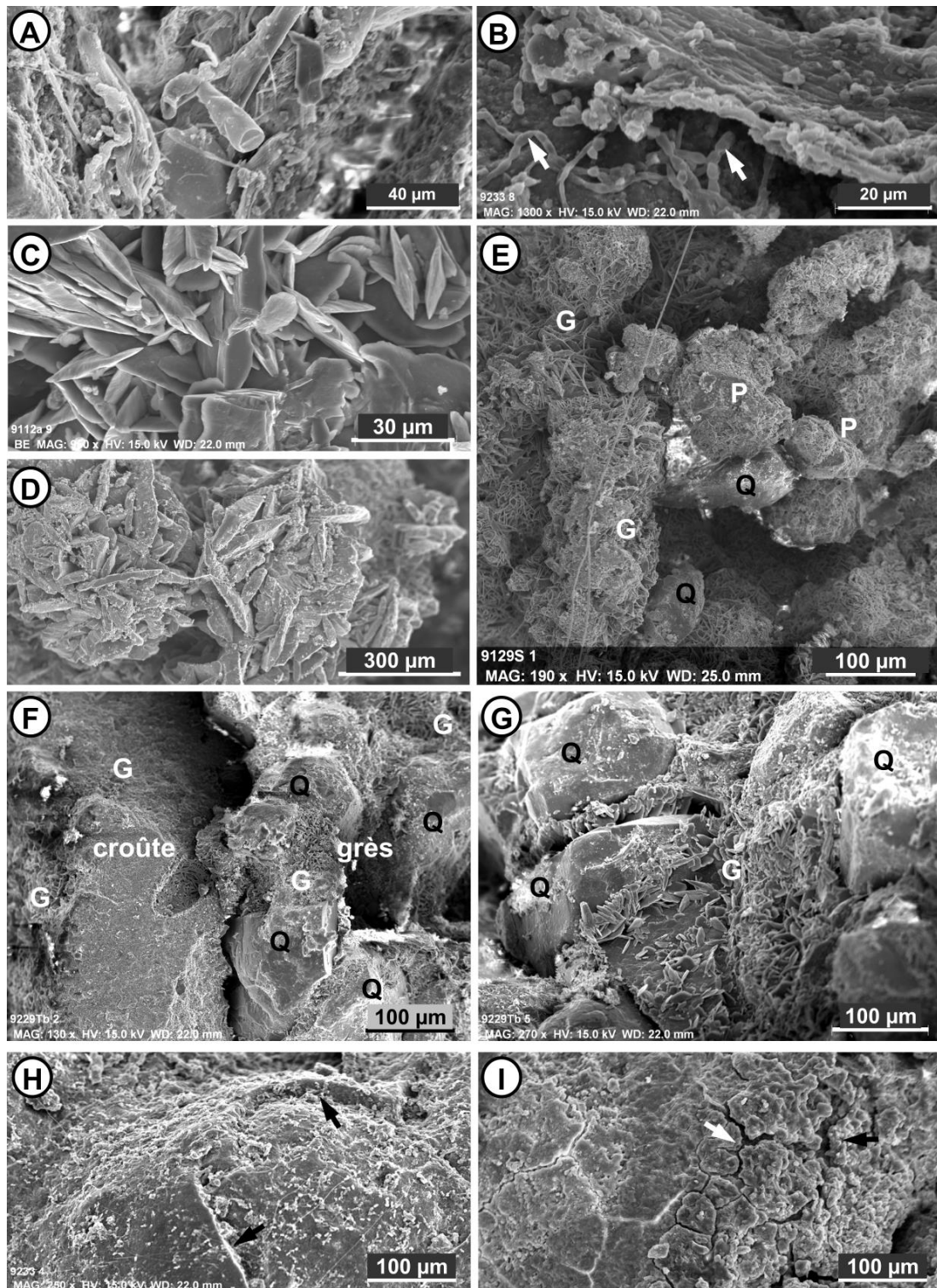


Figure 3 – Micromorphologie de la croûte au Microscope Electronique à Balayage (MEB). (A) éléments biologiques hétérogènes et ciment minéral en arrière plan. (B) structure cellulaire d'un débris végétal (?) et filaments de mycélium plaqués sur l'encroûtement (flèches). (C) cristaux de gypse entrecroisés qui forment l'essentiel de l'encroûtement du grès. (D) lépidosphères de cristaux de gypse. (E) Croûte de gypse montrant des pellets et des lépidosphères de cristaux de gypse entre lesquels transparaissent des grains de quartz. (F) passage de la croûte superficielle au grès pénétré et cimenté par des cristaux de gypse. (G) Détail de la cimentation des grains de quartz du grès par des cristaux de gypse. (H) croûte microcristalline superficielle (flèche) enrobant les structures internes. (I) fentes de retrait (flèches) dans la croûte superficielle. G : cristaux de gypse, P : pellets de cristaux de gypse agglomérés, Q : grains de quartz.

Les cristaux de gypse automorphe et leur assemblage en lépidosphères témoignent de croissances cristallines dans un espace ouvert ménageant de la place pour leur développement. Mais, en même temps, la croissance des cristaux doit être nourrie par des solutions, soit par immersion totale dans la solution, soit par des films capillaires de solution qui entourent les cristaux. Dans les deux cas, la solution doit migrer ou s'écouler pour renouveler les éléments précipités et assurer la continuité de la croissance. Ce sont les eaux des pores du grès qui nourrissent la précipitation des cristaux de gypse. En revanche, l'encroûtement laminaire de gypse qui recouvre les lépidosphères de gypse est probablement nourri par des dissolutions qui se font périodiquement par humidification de la surface puis re-précipitation de tout ou partie du gypse dissous lors de l'assèchement qui suit. Les fentes de retrait qui affectent la croûte laminaire superficielle sont vraisemblablement induites par des recristallisations des agrégats microcristallins, qui diminuent ainsi de volume et génèrent les tensions en retrait.

L'essentiel des encroûtements est formé de gypse de formule chimique $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Le phosphate peut localement être combiné au sulfate et former des minéraux « mixtes » entre ces deux pôles. Du potassium, de l'aluminium et dans une moindre mesure du fer et du sodium, et parfois du manganèse, sont liés à ces minéraux sulfatés et phosphatés. L'aluminium est plus particulièrement associé à la croûte lamellaire superficielle.

4 Interprétation des croûtes de gypse

4.1 Formation de la croûte de gypse

L'évaporation de l'eau des pores du grès est le moteur de l'accumulation du gypse (fig. 4). L'eau de pluie infiltre le grès et percole en faisant le tour des cavités. Le film d'eau porale en arrière de la paroi des abris est soumis à l'évaporation. Celle-ci est surtout importante pendant la saison estivale et elle est accrue si un courant d'air traverse la cavité. L'évaporation augmente progressivement la concentration en éléments dissous de l'eau porale, puis précipite le gypse quand la concentration dépasse la solubilité de ce dernier.

Les grands cristaux de gypse précipitent en présence d'un film d'eau continu tandis que le gypse microcristallin qui cimente les lépidosphères précipite en fin de séquence dans les films d'eau résiduels. La localisation des précipitations au sein de l'ensemble grès-croûte n'est pas figée, elle est réglée par l'équilibre entre apport en eau et potentiel évaporatoire, et elle fluctue au gré des conditions météorologiques, la saturation d'un minéral pouvant intervenir plus en profondeur quand la teneur en eau du grès est faible et au contraire plus près de la surface quand la teneur en eau du grès est plus forte. L'évaporation est la plus forte à la surface même du grès ou de la croûte, c'est là que précipitent et grandissent les lépidosphères de gypse.

À la surface de l'encroûtement, l'eau de condensation, pauvre en éléments chimiques, va induire des dissolutions, jusqu'à être à l'équilibre avec ces minéraux. Il y a dissolution de matière. Au retour des conditions évaporitiques, ces solutions reprécipitent les éléments chimiques précédemment dissouts qui

vont progressivement former la pellicule superficielle qui régularise et cimenter la surface, lui conférant sa structure feuilletée et sa compacité, sans égrainage des lépidosphères et des débris allochtones.

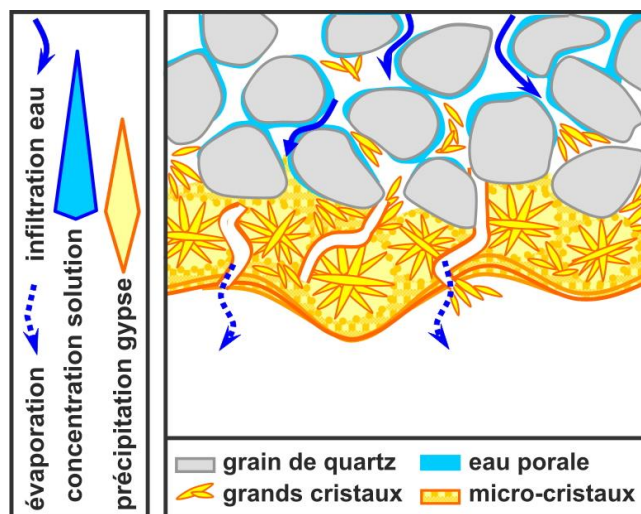


Figure 4 – Schéma de la dynamique du système hydrochimique qui est à l'origine de la formation de l'encroûtement gypseux par évaporation des eaux porales qui percolent dans le grès en arrière de la surface.

Les éléments solubles proviennent du grès lui-même ou de son environnement. L'essentiel du calcium est probablement hérité de la calcite toujours en trace dans les grès primaires. Localement existent des concentrations en phosphate qui sont probablement en rapport avec la diagenèse d'ossements fossiles dans le grès primaire. Mais dans le cas général, phosphate, sulfate, aluminium et potassium associés au gypse sont étrangers au grès et sont probablement liés à l'environnement des grès.

Pour les blocs de grès nus, ce sont les apports à la surface des blocs, par la pluie et le vent ou la végétation, qui peuvent être la source de ces éléments. Les eaux de pluie contiennent toujours des traces de soufre provenant soit de l'incorporation d'embruns marins dans les nuages, soit des combustibles fossiles (charbon, lignite et pétroles). Phosphate et potassium sont des composants mineurs, mais vitaux, des plantes supérieures. Ils sont vraisemblablement issus de la décomposition des matières végétales au-dessus des blocs. L'aluminium est probablement lié aux sols podzoliques, riches en matière organique, qui remplissent les fentes et les dépressions au sommet des blocs.

On peut encore souligner que soufre, phosphore et potassium sont des éléments relativement solubles qui s'accumulent de manière absolue quand les solutions se concentrent ; en revanche l'aluminium est relativement insoluble, il s'accumule de manière relative par dissolution des éléments plus solubles. C'est ce comportement géochimique qui explique l'accumulation de l'aluminium dans la croûte lamellaire superficielle sous forme de sulfates ou phosphates d'aluminium, mais aussi et peut-être surtout par accumulation des fines particules argileuses apportées par les solutions ou le vent.

4.2 Morphologies *versus* intensité des encroûtements

L'intensité d'un encroûtement dépend de l'arrivée de solutions et de leur évaporation. Dans le grès, l'eau d'infiltration est soumise aux forces de capillarité qui la retiennent collée aux grains et à la

gravité qui l'entraîne vers le bas (fig. 5). Les forces capillaires retiennent l'eau et l'empêchent de s'écouler ou goutter d'une paroi ou même d'un plafond. Ainsi, les cavités sont contournées par les infiltrations et leurs parois ne sont jamais humidifiées depuis l'intérieur du grès. Les eaux porales circulent, s'infiltrent dès que le système est alimenté par les pluies. La gravité l'emporte sur la retenue capillaire dès que les ménisques grossissent. Ce n'est que quand l'eau porale s'accumule et saturé les pores au-dessus d'une barrière imperméable que la force de gravité l'emporte sur les forces de retenue capillaire et que l'eau peut s'écouler (fig. 5). Si les parois des cavités sont humides, cette humidité provient de l'extérieur : éventuellement par engouffrement de la pluie, mais surtout par condensation de l'humidité de l'air sur les parois froides du grès lors d'épisodes de redoux météorologique.

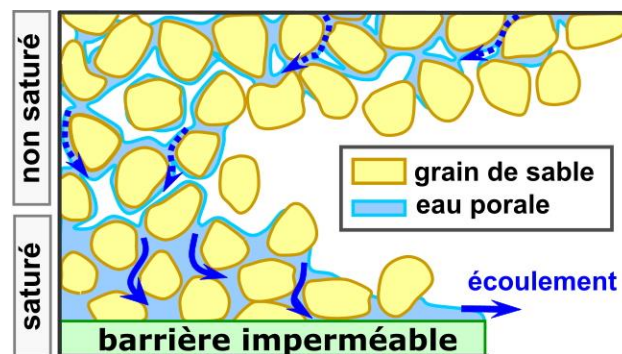


Figure 5 – Schéma des circulations de l'eau porale d'un grès autour d'une cavité : l'eau contourne la cavité.

Quand les conditions de circulation sont remplies, c'est l'évaporation de l'eau porale du grès qui entraîne la précipitation de différents sels, et en particulier du gypse. Les circulations d'air dans les abris accentuent l'évaporation. Mais, ce ne sont que les parois nourries en eau porale qui précipitent des sels. Ainsi, les infiltrations d'eau de pluie au sommet des blocs descendent par gravité, verticalement, dans le grès. A la rencontre d'une cavité, les eaux porales sont retenues par la capillarité et s'écoulent collés aux grains tout contre la paroi. C'est là, à proximité de la paroi qu'intervient l'évaporation et les précipitations qui s'en suivent. Quand la paroi n'est plus en surplomb ou verticale, simplement inclinée par rapport à l'horizontale, les infiltrations sont à nouveau commandées par la seule gravité et descendent verticalement, éloignées de la paroi, puis rejoignent le sable à la base des blocs (fig. 6). Ce cheminement explique que les planchers des abris et leurs bordures basses ne sont jamais encroûtés. Les morphologies ont une importance fondamentale sur la répartition et l'épaisseur des croûtes dans un abri.

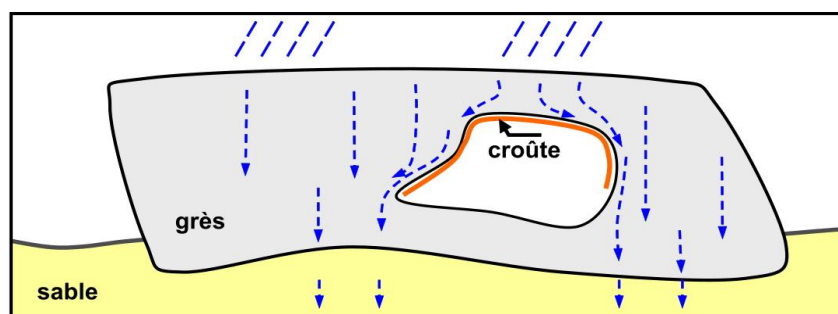


Figure 6 – Relations entre les infiltrations des eaux porales dans les blocs de grès et le développement d'encroûtements dans les cavités.

Ce sont les abris qui débouchent aux deux extrémités des blocs de grès qui ont souvent des croûtes relativement épaisses et régulières. En revanche, les abris aux morphologies compliquées - surtout s'ils ne débouchent pas aux deux extrémités - et les auvents/abris sous-roches présentent souvent des croûtes moins épaisses et surtout variables en épaisseur. Dans certains cas les croûtes peuvent s'atténuer et disparaître sur 50 cm de distance autour d'une morphologie qui présente un côté exposé aux courants d'air qui favorisent les précipitations et l'autre côté à l'abri des courants d'air qui de ce fait est peu soumis à l'évaporation avec des précipitations réduites, voire inexistantes.

4.3 Écaillage des croûtes

Comme on l'a évoqué plus haut, les cristallisations au sein de la croûte et sous la croûte (à l'interface avec le grès) développent des forces liées à leur croissance qui tendent à fragmenter et décoller la croûte du support gréseux (fig. 7A). La croûte se desquame en petites écailles et boursoufflures qui dans des endroits protégés peuvent exceptionnellement former des voiles décollés sur plusieurs dm² ! L'écaillage touche assez régulièrement la croûte post-gravure des sillons (fig. 7B & C).

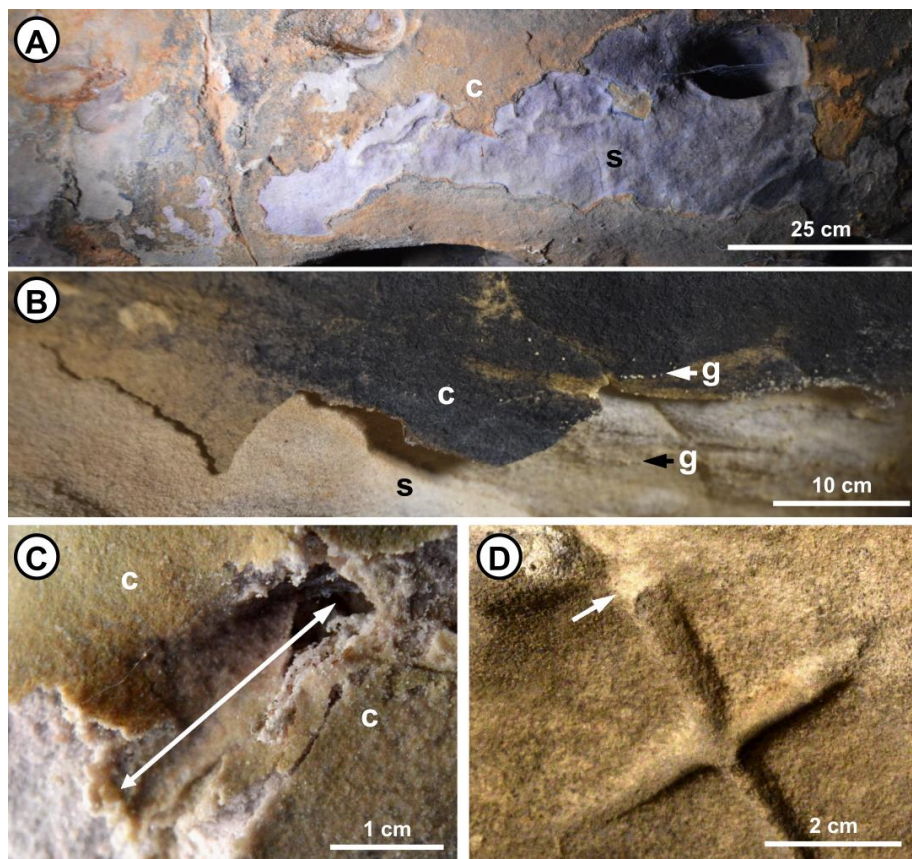


Figure 7 - Desquamations des croûtes de gypse. (A) desquamations multiples mettant à nu le grès blanc ; La Saboterie 1 à Buno-Bonnevaux (Essonne), voûte boyau principal. (B) desquamations décollant une pellicule de croûte de plusieurs dm² ; abri La Saboterie 1, au-dessus du panneau à l'aurochs. (C) détérioration d'un sillon gravé (flèche) par desquamation de la croûte de gypse ; petit auvent au sud de La Saboterie 1. (D) petite desquamation à la terminaison d'un sillon gravé (flèche) ; abri La Ségognole 4 à Noisy-sur-École (Seine-et-Marne). s : grès, c : croûte, g : gypse. Photos Fantine Bellanger.

Ce sont des cristallisations de gypse au sein de la croûte qui conduisent au décollement et à l'éclatement de cette dernière. Les desquamations se font dans les zones où l'arrivée d'eaux porales est plus importante, en particulier le long de joints stratigraphiques ou de fissures (fig. 8). Il faut noter que ce sont les épais cortex friables qui sont particulièrement sensibles aux desquamations (fig. 7B). Dans ces épais cortex, l'évaporation et la concentration de l'eau porale se fait le long d'un gradient étalé en profondeur, le gypse y cimente les grains de quartz avant même qu'une croûte superficielle ne soit clairement individualisée. Par la suite, si la croûte se renforce et qu'une desquamation intervient c'est une épaisseur importante du cortex friable qui est arrachée, d'autant plus que ces épais cortex friables sont souvent moins cohésifs au départ. La mise à nu du grès entraîne la formation d'une nouvelle croûte qui va s'épaissir progressivement et éventuellement être desquamée à son tour (fig. 9).

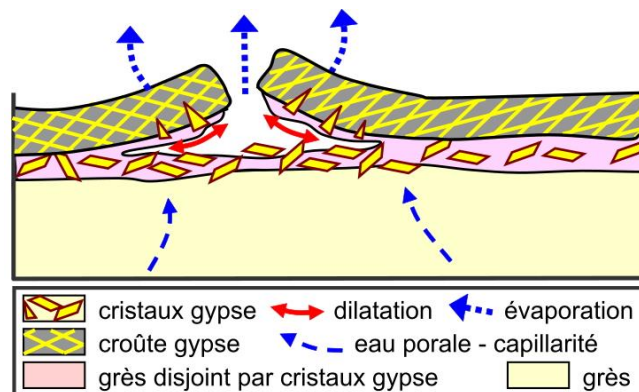


Figure 8 - Mécanisme de desquamation de la croûte par les cristallisations de gypse. Les cristallisations de gypse sont favorisées par les fissures de la croûte par où se fait l'évaporation de l'eau porale.

Ainsi, les croûtes seraient d'autant plus épaisses et matures qu'elles se sont développées plus longtemps, les croûtes moins épaisses correspondraient à un temps de formation plus court et sur un même panneau les croûtes moins épaisses seraient plus jeunes (fig. 9). Les croûtes matures se distinguent par le fait qu'elles occluent entièrement les grains de quartz du grès, alors que les plus récentes sont plus fines et peuvent laisser apparaître ou disparaître les grains de quartz du grès sous-jacent. Les desquamations successives conduisent à l'érosion du cortex friable.

Les sillons gravés dans le cortex friable sont aussi des surfaces d'évaporation et subissent les mêmes altérations et encroûtements que les surfaces des panneaux. Ils se couvrent d'une croûte qui se raccorde à la croûte corticale de la surface avec les cristaux de gypse qui s'interpénètrent et soudent les deux entités. La croûte des sillons est également cumulative et s'épaissit donc avec le temps. Si une desquamation de la croûte intervient, surface et sillon sont arrachés simultanément. C'est un important processus de dégradation des gravures de certains abris, en particulier ceux à cortex plus friable et plus épais comme on l'a commenté ci-dessus.

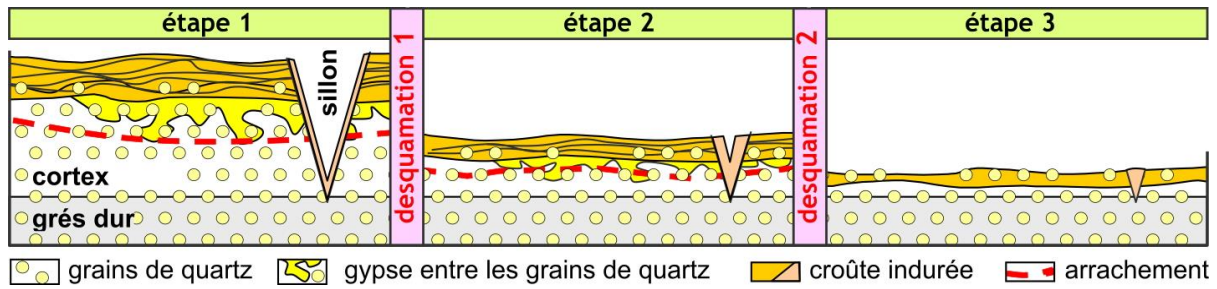


Figure 9 - Schéma de l'évolution de la croûte indurée par desquamations successives qui à chaque étape érodent le grés friable sous-jacent et les sillons qui y sont gravés.

Néanmoins il faut noter que les surfaces de panneau et les fonds de sillons ont des équilibres et des potentiels évaporatoires différents. D'une part le fond des sillons est souvent gravé dans un cortex plus cohésif et donc moins poreux et d'autre part le fond des sillons est relativement protégé des courants d'air par rapport à la surface. On peut faire l'hypothèse qu'il en résulterait une croûte moins épaisse au fond des sillons qu'à la surface des panneaux. Corrélativement, le creux des sillons est moins exposé aux condensations en cas de redoux météorologique et de ce fait est plus protégé des dissolutions occasionnelles. Dans le même ordre de considérations, les sillons tendraient à accumuler et préserver plus de débris organiques et minéraux qui viendraient "nourrir" leur croûte et ainsi augmenter leur épaisseur.

5 Croûte indurée du panneau gravé de La Ségognole 3

Les encroûtements et desquamations décrits ci-dessus se retrouvent sur les deux chevaux gravés de part et d'autre de la représentation sexuée féminine du panneau orné de l'abri de La Ségognole 3. Les sillons gravés sont encroûtés, des cicatrices de desquamations successives y sont visibles et la partie gauche du panneau montre des altérations plus fortes de la gravure de cheval qui figure à cet endroit (fig. 10).

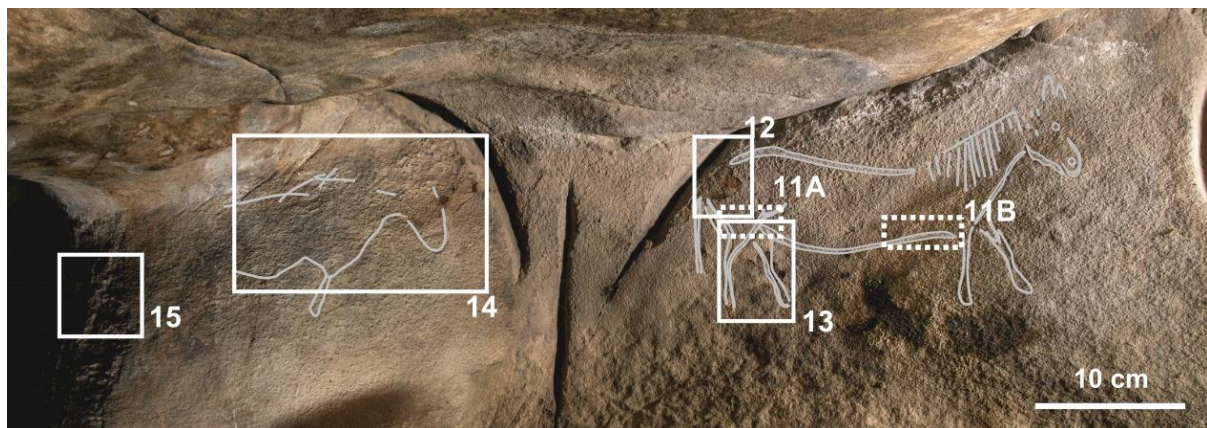


Figure 10 - Vue d'ensemble du panneau gravé de l'abri de La Ségognole 3 à Noisy-sur-École (Seine-et-Marne) avec encadrement des zones d'encroûtement et de desquamation qui sont présentées en détails. Les numéros réfèrent aux numéros des figures qui détaillent ces zones. Photo de Émilie Lesvignes/PCR ARBap et dessin des chevaux d'après Bénard 2010.

5.1 Encroûtement des sillons gravés

Le panneau gravé est couvert d'une croûte indurée typique à surface rugueuse et pustuleuse, cohésive, sur laquelle ne transparait pas la granularité des grains de quartz du grès (fig. 11A & B). La croûte couvre la surface du panneau tout autant que les sillons de la gravure comme le montre la texture indifférenciée des surfaces et des sillons. L'encroûtement n'est absolument pas incisé par les sillons, il est à l'évidence post-gravure. Il n'y a plus aucune possibilité de reconnaître la trace d'une technique de gravure, tout a été oblitéré par la croûte de gypse.

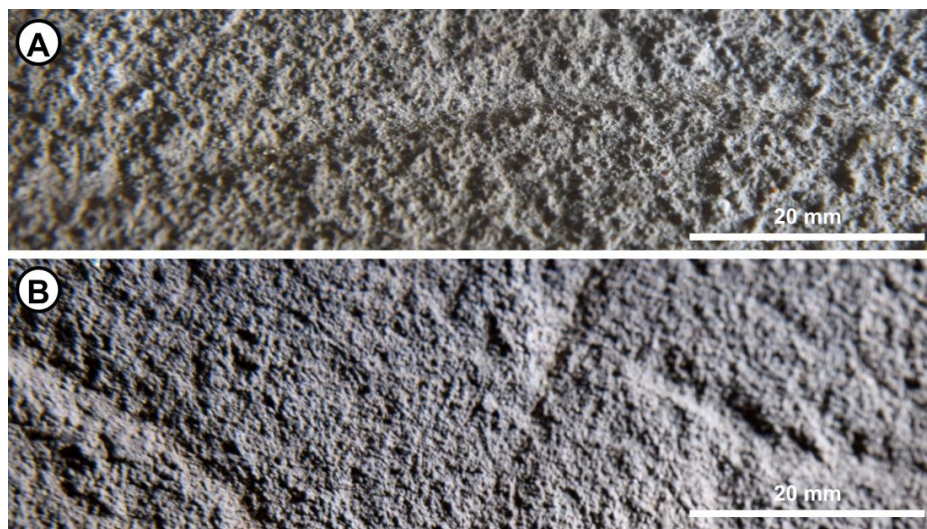


Figure 11 - Texture indifférenciée de la croûte de la surface du panneau et des sillons gravés du cheval de l'abri La Ségognole 3 à Noisy-sur-École (Seine-et-Marne). (A) sillon du poitrail. (B) sillons à la jointure ventre-cuisse. Voir cadrage des photos sur figure. 10.

5.2 Desquamation de l'arrière-train du cheval de droite

La desquamation qui se superpose à l'arrière-train du cheval est de contour irrégulier et relativement peu profonde (fig. 12). La surface supérieure montre une structure bosselée prononcée (fig. 12A), comparable aux croûtes indurées examinées précédemment. La surface inférieure est plus lisse, à granularité plus fine, mais ne montre pas les grains de quartz du grès, elle est également encroûtée. 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 gradient d'évolution depuis la queue jusqu'à la croupe du cheval. Au niveau de la queue la surface inférieure a une granularité relativement proche de celle de la surface supérieure (fig. 12B), alors qu'au niveau de la croupe la surface inférieure est moins évoluée (plus lisse et plus claire) que la surface supérieure (fig. 12C). 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. Il y a une corrélation entre âge et structuration de la croûte indurée.

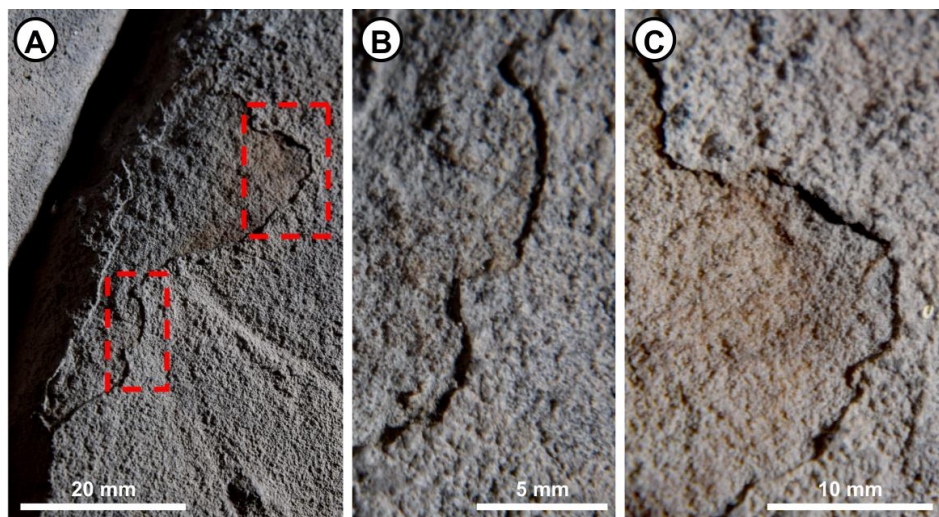


Figure 12 - Desquamation de la croûte indurée du panneau droit recoupant l'arrière-train du cheval de l'abri La Ségognole 3 à Noisy-sur-École (Seine-et-Marne). (A) vue d'ensemble de la desquamation qui mord légèrement sur la fente pubienne droite ; les cadres sont relatifs aux deux photos suivantes. (B) détail de la partie inférieure gauche avec granulation plus prononcée de la surface supérieure comparée à la surface inférieure. (C) détail de la partie supérieure droite montrant la faible granularité de la surface inférieure. Voir cadrage des photos sur figure 10. Photos Fantine Bellanger.

La desquamation qui se superpose à la patte arrière du cheval présente un aspect différent des précédentes (fig. 13). La surface inférieure, mise à l'affleurement par la desquamation de la croûte indurée ne montre pas de croûte pustuleuse, elle révèle la fabrique du grès sous-jacent avec la porosité intergranulaire des grains de quartz cimentée par un matériel blanc (fig. 13B). Sous la croûte ne subsiste plus trace du sillon gravé. Ces desquamations sont relativement récentes (en tout cas, ce sont les plus récentes de ce panneau) et elles n'ont pas encore été re-encroûtées.

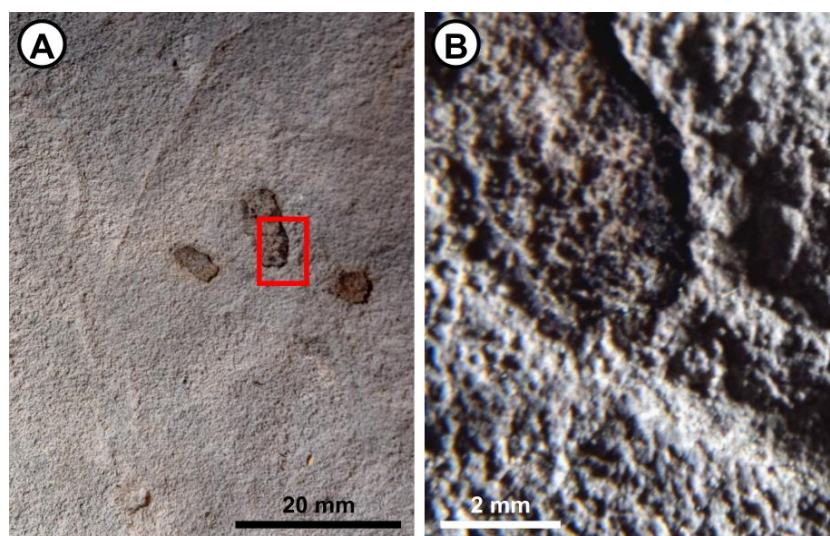


Figure 13 – Desquamations de la croûte indurée au voisinage de la patte du cheval de l'abri La Ségognole 3 à Noisy-sur-École (Seine-et-Marne). (A) vue générale ; l'écaïlle centrale se superpose à la patte arrière gauche du cheval ; voir le cadre de la photo sur figure 10. (B) détail qui montre la granularité de la croûte et la structure de la surface dénudée avec ciment blanc autour des grains de quartz.

Les desquamations qui affectent l'arrière-train du cheval (fig. 12) ainsi que celle qui prend en écharpe la patte du cheval (fig. 13) montrent que les sillons de la gravure ne sont pas marqués dans le grès sous-jacent. 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, mais c'est le devenir de la gravure.

5.3 Desquamation et altération du cheval de gauche

Les desquamations en bordure du panneau gauche sont multiples et étendues, en particulier entre la tête du cheval de gauche et la fente pubienne gauche. De la tête du cheval ne subsiste que le museau, tout le haut de la tête a selon toute vraisemblance été altéré par des desquamations et des encroûtements successifs (fig. 14A). L'aspect de surface de la croûte révèle trois zones avec une compacité et des aspérités qui vont en diminuant depuis le museau vers le haut du panneau (fig. 14B). Par comparaison avec les desquamations et les encroûtements secondaires qui ont été décrits plus haut, on est porté à interpréter ces zones comme des zones d'encroûtements secondaires intervenus après une ou des desquamations successives liées à la proximité de fentes. Des traces obliques sont visibles dans une des zones interprétées comme altérée (fig. 14A) et il est difficile de savoir si ces traces sont des reliquats de sillons gravés (crinière ?) ou si elles correspondent à des hétérogénéités dans le grès sous-jacent.

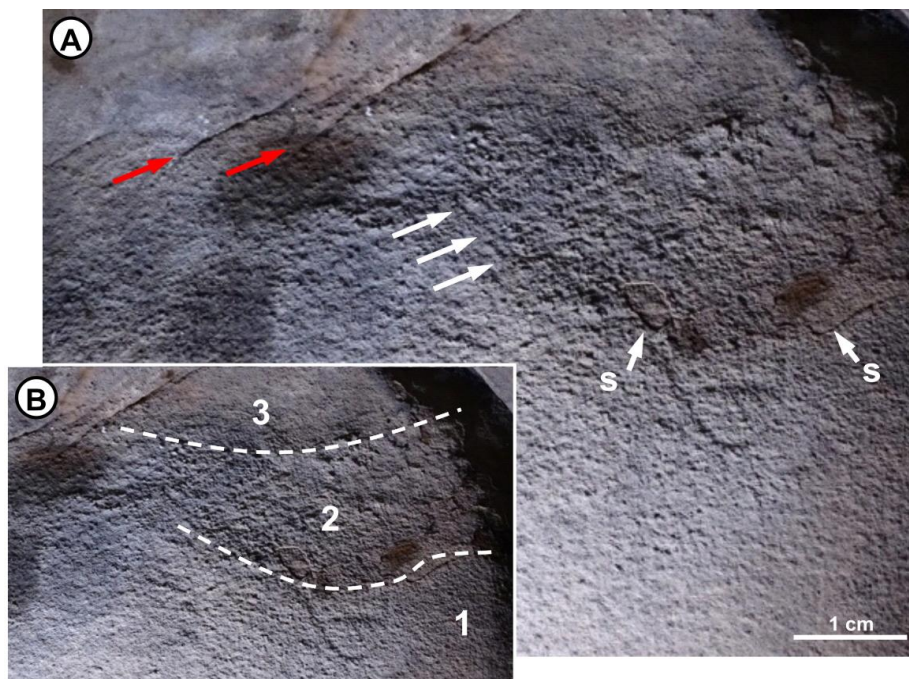


Figure 14 – Desquamation de la tête du cheval de gauche de l'abri La Ségognole 3 à Noisy-sur-École (Seine-et-Marne). (A) Seul le museau est préservé ; plusieurs desquamations (s) affectent la tête ; les flèches rouges pointent de fines fissures et les flèches blanches des traces énigmatiques de la même direction inscrites dans la croûte. (B) Zones montrant des faciès variés de la croûte moins rugueuse de 1 à 3. Voir cadrage des photos sur figure. 10. Photos Patrick Dubreucq/PCR ARBap.

L'altération du panneau est renforcée sur sa gauche, ouverte aux intempéries qui pénètrent l'abri par son ouverture NW. À cette extrémité, la croûte de gypse et le grès sous-jacent sont creusés par des alvéoles d'altération de 1 à 3 mm de profondeur (fig. 15).

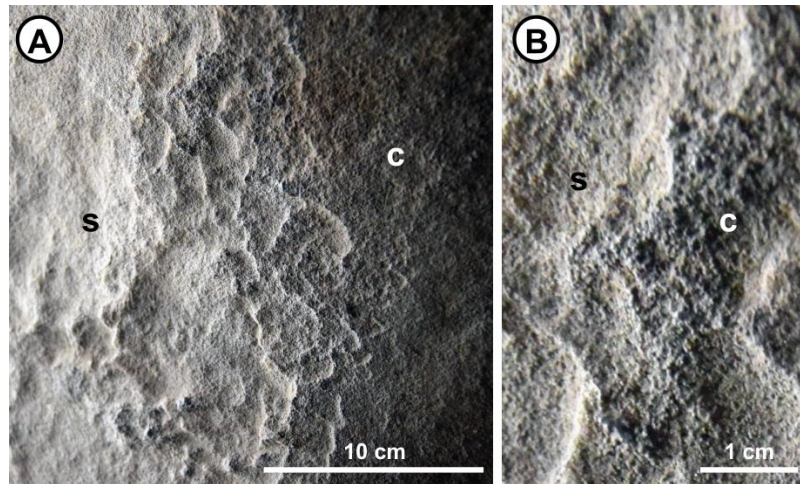


Figure 15 – Altération de l'extrémité ouest du panneau gravé de l'abri La Ségognole 3 à Noisy-sur-École (Seine-et-Marne). (A) encroûtement gypseux vers l'intérieur de l'abri (à droite) et profondes alvéoles d'altération creusées dans le grès sous-jacent vers l'extérieur de l'abri (à gauche). (B) détail des alvéoles d'altération creusées dans le grès nu qui contrastent avec les surfaces encroûtées qui sont en relief. s : grès nu, c croûte gypseuse. Voir cadrage des photos sur figure 10.

6 Croûtes du panneau à l'aurochs de la Saboterie 1

6.1 Problématiques

Le panneau à l'Aurochs de la Saboterie 1 se distingue par plusieurs caractères des autres panneaux gravés des grès de Fontainebleau.

- Il présente une surface très régulière, apparemment non friable, presque lisse. Belle couleur brune homogène sur l'ensemble du panneau qui pourrait faire penser à une surface apprêtée.
- Les sillons altérés aux deux extrémités du panneau, qui ont été décrits dans le rapport 2019 (Thiry et al., 2019), mettent en relief une pellicule superficielle indurée qui forme un escarpement au-dessus du grès sous-jacent altéré et érodé, à grains discernables et qui s'effritent (fig. 16). L'altération est dissymétrique et n'affecte toujours qu'un flanc des sillons et présente une double polarité : dans la partie gauche du panneau ce sont les flancs droits des sillons qui sont altérés (fig. 16A et B) et dans la partie droite ce sont les flancs gauches (fig. 16 C à D).

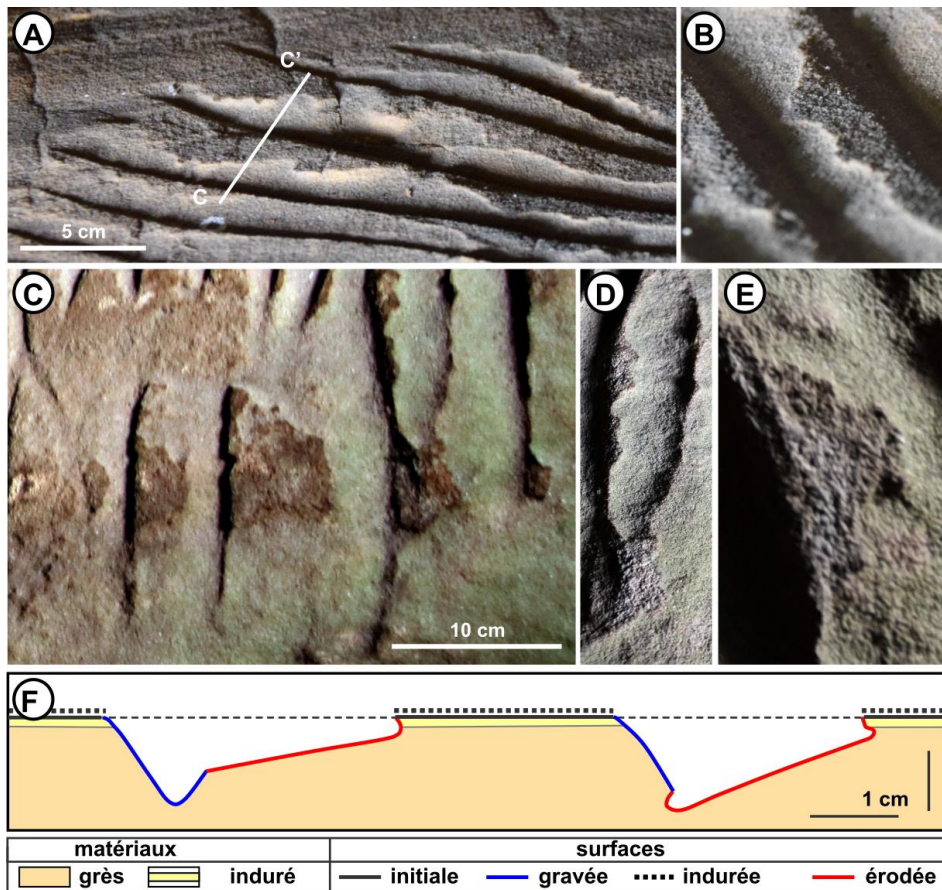


Figure 16 – Altération dissymétrique des sillons gravés du panneau à l'aurochs de l'abri La Saboterie 1 à Buno-Bonnevaux (Essonne). (A) et (B) sillons avec mise en relief d'une pellicule indurée superficielle sur le replat de la bordure gauche du panneau. On note aussi l'encroûtement granuleux sur la surface initiale et son absence sur la surface érodée du sillon. (C), (D) et (E) idem sur les gravures du second animal sur la partie droite du panneau. (F) coupe schématique à travers deux sillons le long du trait figuré en (A). Photos Fantine Bellanger.

Une telle pellicule n'a pour l'heure été observée dans aucun autre abri et interpelle quant à sa nature. La première interprétation est de considérer qu'il s'agit d'un encroûtement gypseux comme ceux observés dans les abris de La Ségognole (fig. 1) et aussi à l'abri de La Saboterie 1 dans le boyau largement ouvert sur l'extérieur attendant au boyau à l'aurochs (fig. 7A) et directement au-dessus du panneau à l'aurochs (fig. 7B). Mais, dans ce cas, il y a une contradiction géochimique entre l'altération plus active du grès à ciment siliceux peu soluble et la préservation d'une pellicule superficielle cimentée par du gypse aisément mis en solution par l'eau. L'hypothèse la plus vraisemblable est que la pellicule indurée corresponde à une cimentation ou imprégnation siliceuse de la surface du panneau. L'hypothèses doit être argumentée.

- Un second point est la présence de pustules et plaquages blancs sur l'avant de la gravure de l'aurochs (fig. 17). L'analyse des relations spatiales entre les enduits blancs et les gravures avait montré leur caractère tardif, après gravure. Les produits blancs paraissent posés sur la surface indurée du panneau avec une base rétrécie à la manière d'un ménisque qui évoque un contact repoussé, comme sur une surface hydrophobe (Thiry et al., 2019). Cette observation avait amené

à poser la question d'éventuelles traces de plâtre de moulage sur une surface traitée par un hydrofuge imperméabilisant.

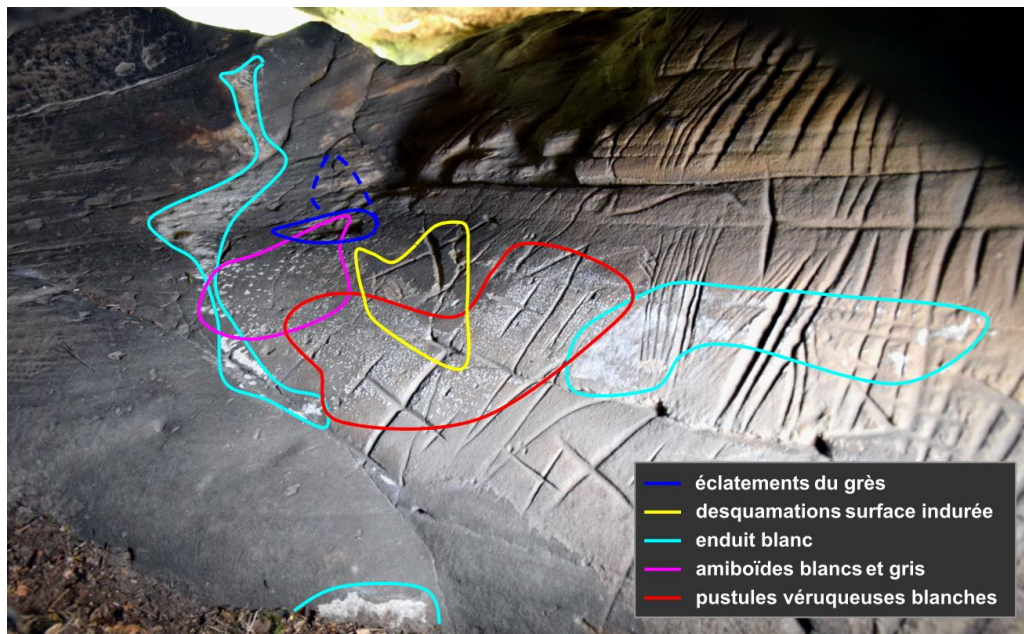


Figure 17 – Divers enduits et remplissages de sillon repérés sur le panneau à l'aurochs de l'abri La Saboterie 1 à Buno-Bonnevaux (Essonne). Photo Médard Thiry, 10/07/2018.

- Enfin, le panneau à l'aurochs est infiltré par les eaux de pluie à travers le raccord entre voûte et panneau sur sa partie droite (fig. 18). En revanche, la partie gauche du panneau est détachée de la voûte et si elle reçoit des infiltrations elles ne peuvent provenir que de la partie droite. C'est probablement une hétérogénéité supplémentaire qui vient s'ajouter à la double polarité mise en évidence par l'altération des sillons et qu'il convient peut-être de prendre en considération dans l'interprétation des altérations qui touchent le panneau.
- Dans ce dispositif spatial il faut encore noter la structure pendante à la voûte sur la partie gauche du boyau. Cette structure « piège » les eaux porales à sa base dont le grès peut à terme se saturer et s'égoutter de la voûte. Ces égouttements contribuent probablement à l'altération du grès du seuil de la fenêtre qui mène au boyau n°1 au nord-ouest (voir description détaillée de la morphologie de l'abri dans Thiry et al., 2019).

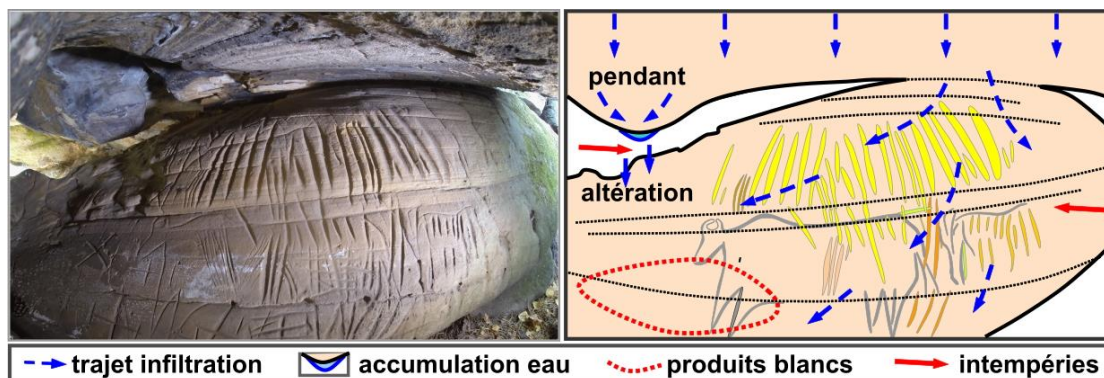


Figure 18 – Schéma de l'hydrologie interne du panneau à l'aurochs de l'abri La Saboterie 1 à Buno-Bonnevaux (Essonne). Les eaux d'infiltration porale pénètrent le panneau par l'ombilic qui le relie à la voûte de la chambre sur sa partie droite. La partie gauche du panneau ne reçoit pas d'eau d'infiltration, plutôt des égouttements à partir de la structure pendante à la voûte quand elle arrive à saturation. Cette hydrologie influence éventuellement sur la cristallisation de gypse ; les ouvertures aux intempéries sont à l'origine de l'altération des sillons. Photo Pascal Crapet.

6.2 Analyse des surfaces à la loupe digitale

Une première séance d'observation des croûtes *in situ* à la loupe digitale DINO-LITE® a été faite cette année sur le panneau à l'aurochs pour tester le matériel, mettre au point les procédures optimales de travail et préciser les observations macroscopiques. Plusieurs zones test ont été choisies (fig. 19) :

- (1) surface de grès altéré/érodé, dépourvu de croûte ;
- (2) replat subhorizontal du panneau ;
- (3) unité supérieure de grès plus grossier, avant du panneau ;
- (4) unité inférieure de grès plus fin avec plaquages blancs ;
- (5) unité inférieure de grès plus fin, proche de la zone d'altération ouverte sur entrée arrière ;
- (6) unité supérieure de grès plus grossier, arrière du panneau ;
- (7) surface profondément altérée exposée aux intempéries ;
- (8) surface plus résistante ou encroûtée (?) à la base du panneau.

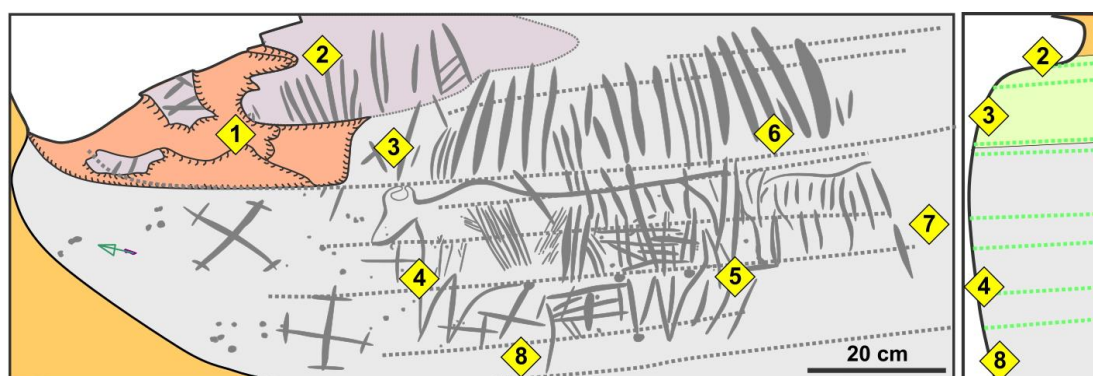


Figure 19 – Zones du panneau à l'aurochs de l'abri La Saboterie 1 à Buno-Bonnevaux (Essonne) qui ont été examinées avec la loupe digitale DINO-LITE®.

Trois principaux faciès de croûte ont été différenciés : (1) des grès nus dépourvus d'encroûtement, (2) des surfaces recouvertes, comme enduites, sur lesquelles on ne distingue pas les grains du grès sous-jacent et (3) des surfaces moins couvertes à travers lesquelles transparait le grès. Il a

également été possible de préciser la nature des mouchetures blanches qui parsèment l'avant du panneau et pour lesquelles on n'avait pas d'argument convainquant pour trancher entre efflorescences de gypse ou traces de plâtre de moulage. Enfin, l'examen à la loupe digitale a révélé l'importance des éléments exogènes qui parsèment la surface du panneau et/ou sont incorporés à la croûte.

Les grès nus

On distingue relativement bien les grès nus à la loupe digitale. Ils se reconnaissent aux grains de quartz anguleux et plus et moins translucides (fig. 20). On n'y discerne pas de ciment particulier entre les grains de quartz suturés lors de la formation du grès. Entre les grains se distingue plutôt un semis de petits grains ou amas blancs qui correspondent vraisemblablement à des cristallisations de gypse, ancrés sur les pores par où l'eau s'évapore. Les surfaces sont aussi parsemées de petits grains sombres (environ 50 µm de diamètre). Des algues sont implantées dans les espaces intergranulaires sur les surfaces exposées à la lumière.

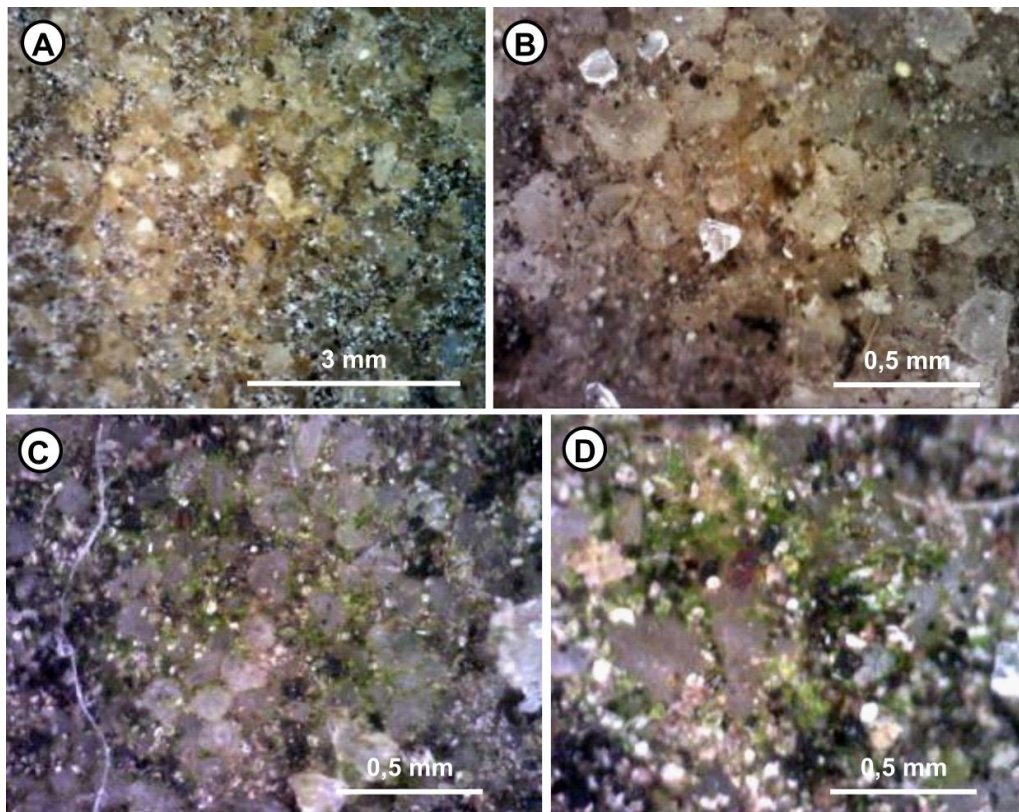


Figure 20 – Agencement des grès nus du panneau à l'aurochs de l'abri La Saboterie 1 à Buno-Bonnevaux (Essonne). (A) hétérogénéité de la surface avec îlot central de grès complètement dégagé et autour de celui-ci des grains de quartz plus empâtés dans de fines cristallisations de gypse à droite et un film brunâtre à l'extrême gauche. (B) grains de quartz translucides bien dégagés, grès apparemment relativement friable, pas ou peu de matériel intergranulaire, petits éclats de quartz hyalins posés sur la surface (poussières), nombreux grains sombres. (C) grains de quartz plus arrondis, petits cristaux ou poussières de gypse éparpillés sur la surface. (D) algues vertes dans les creux entre les grains de quartz (peut-être directement nourries par l'eau porale) et petits cristaux de gypse aux formes cristallines qui apparemment sont préférentiellement liés aux dépressions (évaporation ou protection mécanique des poussières). Photos (A) et (B) zone 1 sur le replat de l'avant du panneau et photos (C) et (D) zone 7 altérée de la partie droite du panneau ; voir position des zones sur figure 19.

Surface indurée du panneau gravé

La surface indurée du panneau gravé à l'aurochs et toute différente des surfaces à encroûtements pustuleux de gypse reconnues par ailleurs à la loupe digitale (fig. 2A). Contrairement aux surfaces de grès nu, la surface indurée ne s'effrite pas, les grains de quartz sont donc soudés. Elle montre des grains de quartz, sans transparence et aux contours quelque peu estompés ou arrondis, qui paraissent recouverts d'une pellicule terne (fig. 21). Ce film pourrait correspondre à la pellicule indurée mis en relief lors de l'altération du grès sous-jacent décrite ci-dessus (fig. 16). Il pourrait effectivement correspondre à une imprégnation de la surface par de la silice brunâtre, translucide, d'aspect huileux, qui floute ou estompe les grains de quartz sous-jacents (fig. 21A, C, F et G).

Les surfaces indurées sont aussi parsemées de petits grains blancs, parfois anguleux pour ceux qui sont les plus nets (optiquement au point), qui de toute évidence sont de minuscules cristaux de gypse (50-150 µm de diamètre.). Quand il est présent le gypse est généralement mêlé à des grains sombres (indéterminés) et apparaît plus comme une accumulation granulaire entre les grains de quartz qu'une précipitation de cristaux qui seraient alors interpénétrés. Néanmoins, la localisation des cristaux de gypse dans les espaces intergranulaires, au droit des pores par où l'eau est évaporée, laisse entrevoir qu'ils ont précipité dans ces espaces intergranulaires, mais cela n'implique pas qu'ils constituent un ciment. En tout état de cause, ce gypse granulaire ne peut pas expliquer l'induration de la surface du panneau.

Surfaces indurées et occluses

Certaines zones, et plus particulièrement la partie centrale du panneau avec la gravure de l'aurochs, se caractérisent par l'absence de grains de quartz visibles. Ces zones sont couvertes d'éléments plats, aux bordures échancrées et amiboïdes, sans transparence, de couleur grise à brunâtre (fig. 22A et B). Ce sont des géométries très différentes de celles que pourraient présenter des grains de quartz, qui ont toujours des contours nets et réguliers (fig. 22C et 22A, B, C). Il s'agit probablement d'organismes végétaux. Leurs formes irrégulières et leurs apophyses évoquent des thalles de lichens. La régularité et la planéité de ces zones interpellent. Cette régularité pourrait résulter du comblement des creux intergranulaires par les lichens et organismes associés, mais ces organismes épousent généralement les morphologies du support. Il faut alors envisager que cette partie centrale du panneau était primairement lisse, avec les espaces intergranulaires remplis et cimentés par un film comparable à celui décrit ci-dessus, mais plus épais et couvrant toute la surface et comblant tous les aspérités granulaires du grès.

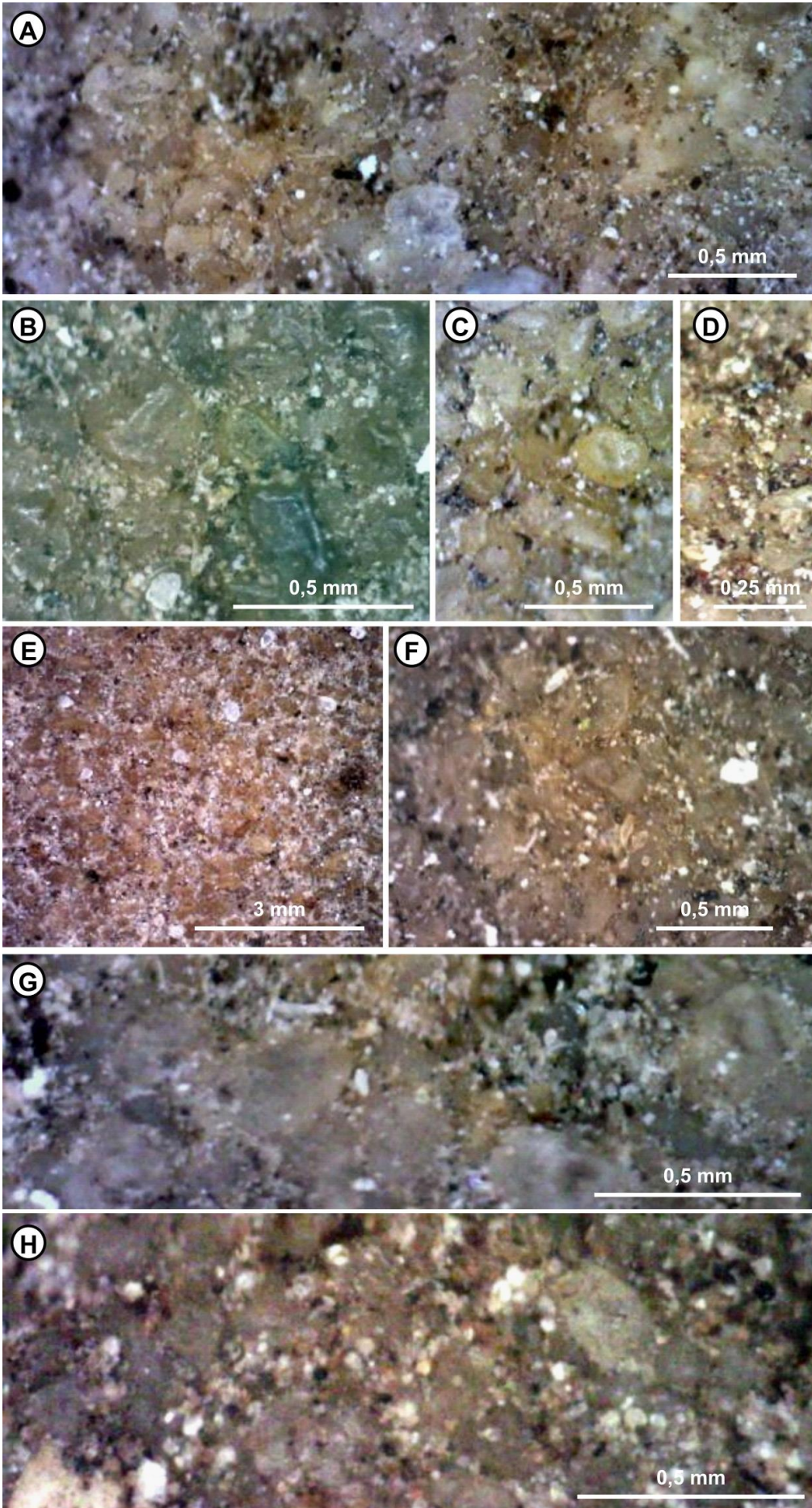


Figure 21 – Surfaces indurées du panneau à l'aurochs de l'abri La Saboterie 1 à Buno-Bonnevaux (Essonne). (A) les grains de quartz se distinguent essentiellement par leurs formes anguleuses, mais ils ne présentent pas d'éclat et ne sont pas transparents ; ils ont des formes quelque peu estompées ou arrondies et paraissent partiellement masqués par un film translucide qui estompe leurs contours ; abondance de grains sombres en surface. (B) idem, noter les efflorescences de petits cristaux de gypse entre les grains de quartz. (C) également aspect estompé des grains de quartz et abondance des grains sombres. (D) détail montrant l'abondance des grains et cristaux de gypse à la jointure des grains de quartz. (E) aspect général de la surface du panneau sur laquelle on distingue des pustules granulaires brunes entourées de zones granuleuses moins compactes et à nombreux cristaux de gypse. (F) détails de l'arrangement des pustules brunâtres, un film semble recouvrir les grains de quartz dont les contours apparaissent moins nets et empâtés ; grains sombres éparpillés en surface. (G) aspect "flouté" des grains de quartz qui contraste avec l'aspect relativement plus net des petits cristaux de gypse qui sont posés sur la surface, confirmant indirectement le recouvrement des grains de quartz par une fine pellicule qui estompe leurs contours ; noter les petits cristaux de gypse à la jointure des grains. (H) aspect similaire de quartz empâtés avec algues vertes dans les creux entre les pustules. Noter que toutes les photos montrent des cristaux de gypse blanc aux géométries plus ou moins nettes. Photos (A) à (D) zone 2 sur le replat sur la gauche du panneau, (E) et (F) zone 3 sur l'avant du panneau, (G) zone 5 sur l'arrière-train de l'aurochs, (H) zone 6 sur la droite et sur l'unité supérieure au dessus du second animal. Voir position des zones sur figure 19.

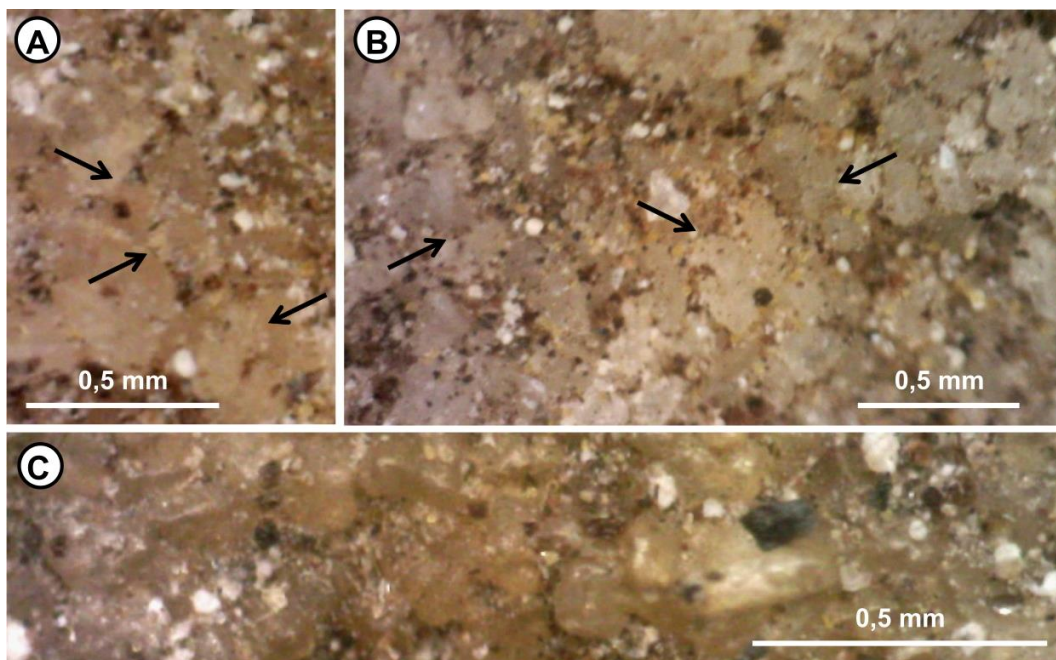


Figure 22 – Surface occluse du panneau à l'aurochs de l'abri La Saboterie 1 à Buno-Bonnevaux (Essonne). (A) et (B) les grains de quartz ne se distinguent pas, la surface est couverte, comme tapissée d'éléments plats aux contours échancrés amiboïdes (flèches) alors que les grains de quartz ont toujours des contours tendus. (C) pour comparaison, plage voisine montrant les contours réguliers des grains de quartz. Zone 4 sur l'avant de l'aurochs et les cruciformes. Voir position de la zone sur figure 19.

Les cristallisations de gypse

Deux types de cristallisation de gypse ont été reconnus : de gros amas millimétriques et des poudres très fines invisibles à l'œil nu.

Les gros amas millimétriques sont ceux à l'avant de la gravure de l'aurochs, associés à la zone des cruciformes, qui ont été décrits dans le rapport 2019 et dénommés taches amiboïdes et pustules blanches (Thiry et al., 2019). La nature de ces taches avait été discutée. Leur disposition en relief sur la croûte gypseuse, leur composition apparemment formée de 2 couches distinctes, leur contact franc, en ménisque non mouillant avec la croûte de gypse sont autant de caractères qui interpellaient. Il avait été émis l'éventualité de résidus de plâtre dus à un moulage du panneau. Les observations *in situ* avec la loupe

digitale montrent sans ambiguïté que ces amas sont formés de cristaux de gypse automorphes dont certains sont liés et implantés dans la porosité intergranulaire (fig. 23). Les cristaux sont nourris par les eaux porales du grès concentrées par évaporation. L'ambiguïté entre efflorescences naturelles ou résidus de plâtre est ainsi levée. L'aspect en ménisque non mouillant avec la croûte de gypse est apparemment dû à une dissolution du gypse de la base des amas. Cette dissolution est probablement à relier aux condensations qui se font sur la surface du panneau lors de périodes de redoux hivernaux.

Les fines particules blanches détectées sur tous les types de surface, qui en moyenne ont 50 µm de diamètre, montrent souvent des formes géométriques avec angles nets (fig. 21). Ce sont de minuscules cristaux de gypse. Ils sont concentrés dans les dépressions intergranulaires des grains de quartz et sont sans équivoque liés à l'évaporation des eaux porales du grès. Leur netteté pointe qu'ils sont actuels, se formant sûrement encore pendant les événements secs et venteux estivaux et/ou hivernaux. Il n'y a pas besoin de températures élevées pour évaporer les eaux porales, les courants d'air à l'intérieur de l'abri en sont le moteur primordial.



Figure 23 - Cristallisations de gypse du panneau à l'aurochs de l'abri La Saboterie 1 à Buno-Bonnevaux (Essonne). (A) & (B) cristaux de gypse aux figures géométriques nettes, avec des formes losangiques assez typiques et des formes plus arrondies qui rappellent les navettes de gypse communément observées au MEB. Zone 4 sur l'avant de l'aurochs et les cruciformes. Voir position de la zone sur figure 19.

Les grains sombres

Les nombreux et minuscules grains sombres qui parsèment la surface du panneau sont le plus souvent anguleux, mais aussi arrondis et parfois calibrés (fig. 20 et 21). Les grains anguleux sont probablement pour une part à relier à des débris minéraux issus de l'effritement de la voûte de l'abri ou apportés par les vents. Les grains plus émoussés sont éventuellement liés à des débris organiques et/ou charbonneux. Enfin les grains ronds, surtout lorsqu'ils sont calibrés, correspondent probablement à des éléments biologiques (spores, pontes, etc.) comme on a pu le mettre en évidence par les examens au MEB. Ce sont les surfaces qui ont le plus de rugosité et/ou les grains de quartz les plus dégagés qui montrent les fortes abondances de grains sombres et pointent ainsi indirectement leur origine détritique, piégés dans les creux.

6.3 Résultats et interprétations

La qualité des premières images est un peu décevante mais est sûrement améliorable en organisant et rationalisant les prises de vues, et surtout en assurant une meilleure mise au point. Les observations faites sont en revanche encourageantes.

Un premier résultat concerne les taches blanches à l'avant de la gravure de l'aurochs et conduit à attribuer ces taches à des cristallisations naturelles de gypse, levant ainsi le doute sur le fait que ces taches aient pu être liées à un éventuel moulage du panneau par du plâtre. La mise en évidence des éléments détritiques fins (organiques et minéraux) et leur incorporation aux micromorphologies est relativement triviale, mais l'observation directe fait prendre conscience de cet élément qui intervient dans l'évolution des panneaux gravés.

La nature de l'induration de la surface du panneau à l'aurochs n'a pas pu être analysée directement. Néanmoins, l'observation à la loupe digitale n'y relève aucune trace de frottement des grains de quartz qui résulterait d'un grattage ou ravalement de la surface du panneau. La surface du panneau apparaît comme une surface originelle. Elle est tout à fait particulière au sein du corpus des panneaux gravés des Grès de Fontainebleau. Différents éléments d'observation permettent d'en cerner l'origine. Comme soupçonné d'entrée ce n'est pas le gypse qui cimente ou forme une croûte en surface du grès. C'est ce à quoi avaient conduit les considérations géochimiques sur les solubilités relatives du gypse et de la silice qui cimente les grains de quartz. Si une pellicule indurée superficielle est mise en relief lors de l'altération des sillons gravés c'est que celle-ci est plus fortement cimentée que le grès sous-jacent. Il n'y a qu'une cimentation siliceuse qui puisse être envisagée. Elle recouvre et cimente la « première couche » de grains de quartz qui forment la surface granulaire du panneau. L'épaisseur observée de cette fine pellicule, d'environ 1/10^{ème} de millimètre (100 µm), est inférieure ou égale au diamètre moyen des grains de quartz du grès. Elle est directement liée à la surface du panneau et ne pénètre pas le grès en profondeur. La nette délimitation de la cimentation sur un niveau prenant en écharpe les grains de quartz est confirmée par les observations à la loupe digitale qui montrent les grains de quartz arrondis, sans marque de croissance cristalline secondaire, qui émergent d'une surface cimentée (fig. 24).

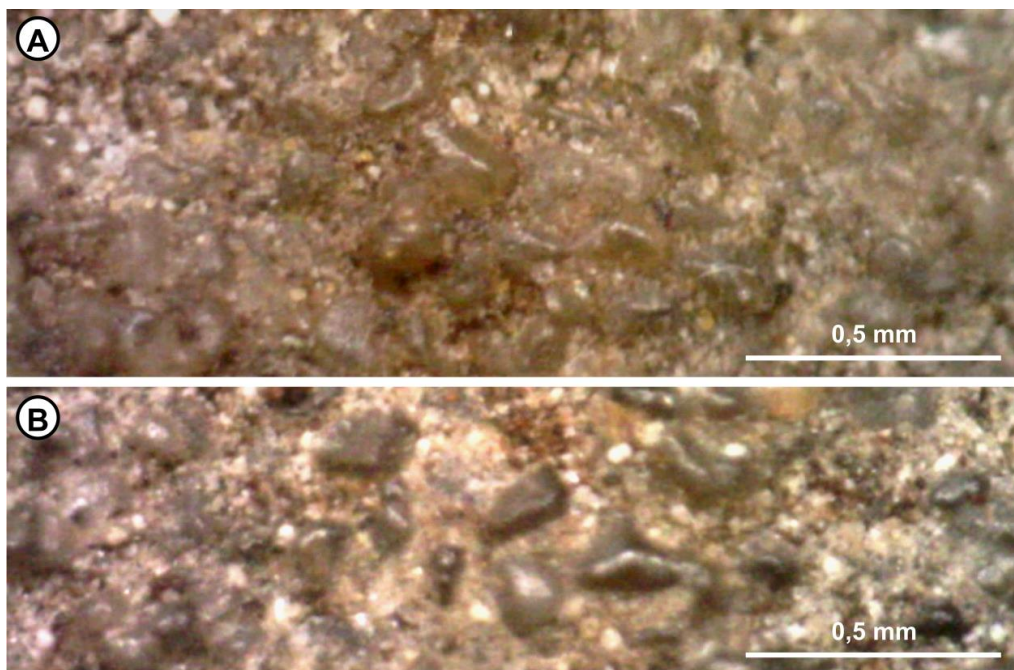


Figure 24 – Surface indurée du panneau à l’aurochs de l’abri La Saboterie 1 à Buno-Bonnevaux (Essonne). (A) et (B) les grains de quartz propres, arrondis, sans marques de nourrissage, émergent d’une surface régulière (parsemée de petits cristaux de gypse et autres éléments détritiques) qui les cimente. C’est cette première couche de grains de quartz qui forme la pellicule de grès indurée du panneau. Zone 8 à la base du panneau. Voir position de la zone sur figure 19.

Cette disposition est probablement imputable à un mécanisme particulier de cimentation lors de la formation des corps gréseux. Le panneau gravé correspond à une limite entre un sédiment imperméable ou peu poreux et le sable blanc perméable qui a été cimenté par la circulation de l’eau phréatique. C’est au contact de ces deux milieux qu’un dépôt additionnel ou complémentaire de silice aurait précipité. Au regard de la faible solubilité de la silice, le dépôt d’une très fine pellicule de silice nécessite néanmoins la circulation d’un volume supplémentaire d’eau le long de cette surface et/ou une précipitation plus efficace de la silice dissoute contre cette surface. Cette dernière configuration paraît la plus plausible avec une surface de contact entre un sable gelé (imperméable) et un sable moins froid traversé par les circulations phréatiques, comme cela a pu être montré par ailleurs (Thiry et al., 2017). C’est au contact de la surface gelée que l’eau de la nappe s’est refroidie le plus rapidement et que cet abaissement de température supplémentaire a provoqué une précipitation accrue de la silice dissoute par rapport aux parties plus internes du sable non gelé. La pellicule superficielle indurée proviendrait donc d’une sur-silicification originelle.

Ainsi on peut envisager que la conjonction d’une granulométrie plus fine des grains de quartz et d’une pellicule sur-silicifiée plus épaisse soient à l’origine d’une surface plus lisse et régulière sur le milieu du panneau à l’aurochs. On peut penser que la qualité de cette surface (plane, lisse et qui ne s’effrite pas tout en étant gravable) ait fait partie du choix, sinon de la recherche, de ce panneau pour y graver les figures animalières. C’est un critère supplémentaire qui singularise le site de La Saboterie 1.

7 Exploration des possibilités de datation relative de gravures

Le bilan global des précipitations et dissolutions au sein des croûtes gypseuses est une lente accumulation de minéraux à partir de l'évaporation des eaux porales du grès. La croûte s'accumule de manière plus ou moins continue, s'épaissit et pénètre les pores superficiels du grès. Néanmoins la vitesse de formation de la croûte est probablement variable car interviennent la météorologie, les conditions d'aération/ventilation, les variations de porosité du grès et la durée de fonctionnement du système. Voilà ce dont il faut être averti. Mais, en même temps, observer une accumulation continue, même avec ces variations internes et extérieures, revient à disposer d'une potentielle horloge qu'il faut saisir. Il y a une méthodologie à développer et à expérimenter, tout en mettant en place les garde-fous, en vérifiant les règles d'application, etc. C'est le « meilleur du pire » évoqué en introduction. Mais pour appliquer la méthode aux objets archéologiques il faut encore pouvoir lire et quantifier ces données *in situ* sur les panneaux gravés et sans prélèvement d'échantillon. C'est un second objectif amorcé pendant l'année 2020, entre confinements pour cause de covid-19, protection des personnes, etc.

Pour ce faire, il a été procédé à une reconnaissance des gravures de plusieurs sites pour approcher cette éventuelle possibilité de datation relative des gravures à partir de l'épaisseur et de la maturité des croûtes qui recouvrent les sillons. Les sites ont d'abord été choisis pour présenter des gravures historiques, quelquefois millésimées, juxtaposées à des gravures de type mésolithique. Les sites sélectionnés pour cette exploration préliminaire se situent dans la partie amont de la vallée de l'Essonne, au sud de site de l'abri La Saboterie 1. Du fait des conditions géologiques de formation des grès dans ce secteur, de nombreux sites sont largement ouverts sur l'extérieur ou formés de simples auvents ou abris sous roche. Aussi, les sites sont souvent pénétrés par les intempéries et présentent un revêtement biotique plus ou moins important.

7.1 Les surfaces couvertes de lichens

Les lichens occluent les surfaces gréseuses et leur présence constitue une difficulté majeure pour l'observation des surfaces gravées des abris sous roche et des abris ouverts aux intempéries. L'analyse de gravures avec couverture de lichens de l'abri de la Pente de Courcelles 06 à Nanteau-sur-Essonne (Seine-et-Marne) permet néanmoins de montrer comment les lichens inter-réagissent avec le support gréseux (fig. 25A et B). Les thalles de lichens apparaissent à la loupe digitale comme une couche de texture floconneuse au travers de laquelle percent plus ou moins les grains de quartz, selon l'épaisseur du matériel biologique (fig. 25C à E). Après la décomposition et l'érosion des thalles il subsiste des matériaux résiduels dans les creux de la surface, en particulier dans les sillons intergranulaires des grains de quartz. La quantité de matériel préservé dépend du degré d'érosion et d'abrasion de la surface (fig. 25E). Par cet effet, les matériaux biologiques peuvent être plus abondants dans le creux des sillons que sur les surfaces adjacentes (fig. 25D). Mais on peut aussi observer l'effet inverse, avec des fonds de sillons à grès nu, quasi égrainé, comme s'ils venaient d'être gravé, alors qu'il s'agit de sillons anciens. Cet état de fraîcheur résulte de l'arrachement des grains de quartz superficiel, pénétrés par les rhizines du lichen, lors du dessèchement

d'un thalle et de sa desquamation, de manière similaire à la desquamation des encroûtements gypseux. Ainsi les différentes gravures d'un panneau peuvent montrer des états de surface en contradiction flagrante avec leurs âges relatifs. Les lichens non seulement occluent les surfaces mais, qui plus est, dégradent et érodent le grès par les desquamations qui ôtent tout espoir de pouvoir trouver des critères de datation relative sur les surfaces colonisées par les lichens.

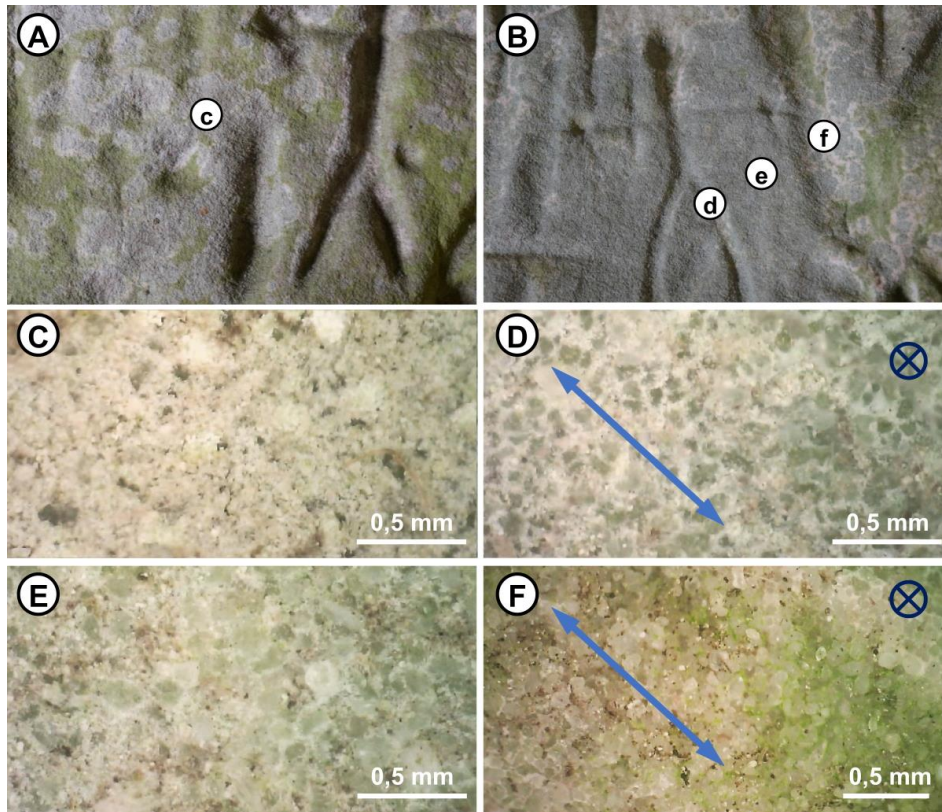


Figure 25 – La Pente de Courcelles 06 à Nanteau-sur-Essonne (Seine-et-Marne) : revêtements de lichens. (A) et (B) vue des gravures avec position des zones examinées. (C) surface couverte de lichen ; on y distingue un feutrage de texture floconneuse sous lequel ne transparaissent que quelques rares grains de quartz (objets sombres). (D) sillon d'une gravure anthropomorphe considérée comme relativement récente ; les dépressions intergranulaires des quartz sont occupées par un feutrage floconneux clair comparable à celui des lichens, mais qui est moins prononcé sur la surface adjacente. (E) surface du panneau ; les quartz sont relativement bien dégagés, le feutrage floconneux clair est limité au fond des dépressions intergranulaires. (F) large sillon considéré comme mésolithique ; les quartz du fond du sillon sont complètement dégagés, quasi égrainés, moins cohésifs que la surface adjacente. Les flèches bleues indiquent l'allongement des fonds de sillon et les cercles barrés les surfaces adjacentes.

On peut souligner que si les lichens contribuent à la dégradation des panneaux gravés exposés aux intempéries, les desquamations gypseuses œuvrent sur les panneaux protégés des intempéries. La destruction par les lichens est sûrement beaucoup plus rapide que celles opérée par les desquamations des croûtes gypseuses qui sont très lentes à se former. Ces altérations par les lichens sont d'autant plus actives que de nombreuses espèces excrètent des acides organiques pour dissoudre les éléments minéraux du substrat (Gadd, 2017).

7.2 Gradients et vitesse d'érosion / altération

La couverture de lichens sur les surfaces gravées est directement liée à leur exposition aux intempéries : pluie qui permet la végétation et pluie plus ensoleillement qui favorisent la desquamation et l'érosion des résidus. La bordure d'une surface gravée avec un gradient d'exposition aux intempéries à l'abri du Courtil de la Maladrerie 14 à Boulancourt (Seine-et-Marne) permet de faire des observations sur la dégradation des surfaces par les lichens. Côté interne de l'abri existent des sillons aux caractères mésolithiques, ou plutôt subsistent des sillons car leur partie basse est déjà très dégradée par rapport à leur pointe, c'est-à-dire sur une dizaine de centimètres (fig. 26A). Vers l'extérieur existent des gravures du 19^{ème} siècle qui montrent aussi une dégradation forte sur une dizaine de centimètres entre intérieur et extérieur, haut et bas (fig. 26A). Les observations à la loupe digitale montrent que toutes les surfaces (panneau et sillons) sont couvertes de lichens (vivants et dégradés ?) sans grains de quartz qui percent au travers et donc des épaisseurs relativement importantes vers l'intérieur de l'abri (fig.26B à D) et au contraire des grains de quartz qui percent au travers et donc plus fines vers l'extérieur de l'abri (fig. 26E et F). L'état de dégradation comparé des sillons anciens et moderne est instructive. Si l'on en juge par la largeur et de la profondeur de la gravure du F, la profondeur des sillons modernes était initialement comparable à celle des sillons anciens. Les sillons modernes sont pour partie déjà presque entièrement effacés. En 150 ans ils ont été plus érodés que les sillons vieux de 6 000 ans, et cela sur une distance d'une vingtaine de centimètres. Il y a là un facteur d'érosion de l'ordre de 50 entre exposition extérieure et protégée. En appliquant ce facteur d'érosion différentielle, on peut estimer que la surface bord extérieur du rocher a pu être érodé 15 cm depuis l'époque mésolithique et donc que le rebord de l'abri a pu « reculer » de 15 cm et des motifs entiers de sillons emportés. Si cette estimation est fragile, elle montre néanmoins qu'il faut être prudent quand on considère qu'il n'y a pas eu de gravures autrefois en extérieur. Ces vitesses d'altération et d'autres qu'on peut obtenir par ailleurs de manière indépendante montrent l'importance de l'altération et de l'érosion des grès de Fontainebleau à l'échelle du millénaire. Exception faite des surfaces couvertes d'une pellicule de silice secondaire qui est très résistante à l'altération ... et qui d'ailleurs ne supportent pas de lichen !

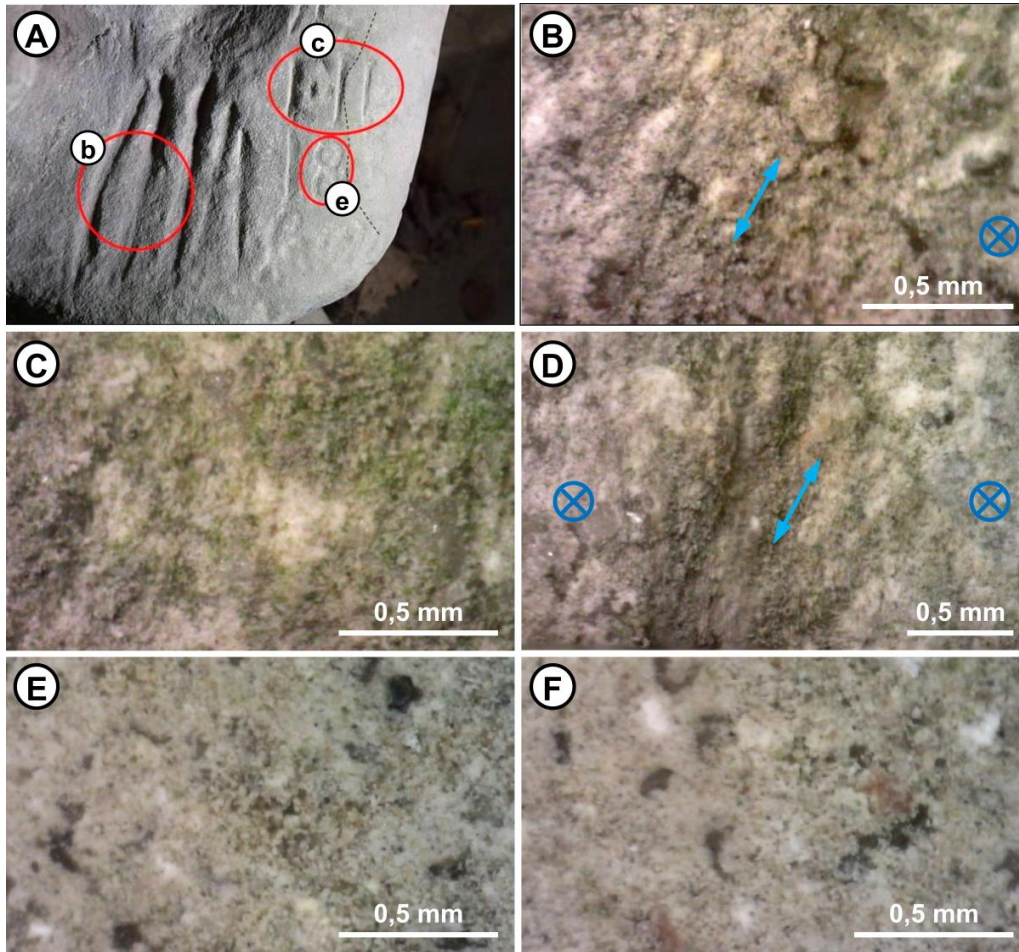


Figure 26 – Le Courtil de la Maladrerie 14 à Boulangcourt (Seine-et-Marne) : gradient d'érosion des gravures. (A) vue des gravures avec position des zones examinées ; (b) sillons mésolithiques et (c et e) inscriptions millésimées 18 ?? . (B) sillon et surface recouverte par des lichens abimés. (C) surface couverte de lichens adjacente au F de Fils ; voir situation sur photo Aa. (D) sillon i de Fils, sans différence notable entre fond de sillon et surface adjacente. (DE) surface ente 1 et 8 avec couverture de résidus de lichens moins épaisse au travers de laquelle transparaissent les grains de quartz du grès. (BF) fond du sillon du 8 avec couverture indistinguable de celle de la surface adjacente précédente. Noter les rainurages du fond des sillons (B et D) et de la surface du panneau (C) qui selon toute vraisemblance sont dus à des balayages de la surface lors de visites du site. Les flèches bleues indiquent l'allongement des fonds de sillon et les cercles barrés les surfaces adjacentes.

7.3 Accumulations en fond de sillon

Toujours dans la perspective de trouver éventuellement un moyen d'approcher l'âge relatif de sillons proches, et alors que l'essentiel de l'attention avait par le passé été focalisée sur les croûtes des surfaces, il fallait aussi explorer comment se comportaient les sillons sur différents panneaux : horizontaux et verticaux, nus et encroûtés, etc. Nous présentons ci-dessous 3 exemples caractéristiques entrant dans ce cadre.

Surface horizontale sur rocher relativement isolée des parois

Il s'agit d'un rocher de l'abri Pente de Courcelles 04 à Nanteau-sur-Essonne (Seine-et-Marne). Le rocher est posé sur le sable, proche de l'ouverture de l'auvent sur l'ouest. C'est donc une surface qui reçoit probablement un peu d'humidité et des algues vertes y sont implantées.

C'est une surface de grès nu, sans croûte, à granularité bien marquée et qui a tendance à s'effriter légèrement quand on le frotte (fig. 27A). L'observation à la loupe digitale montre des grains de quartz anguleux, c'est-à-dire nourris lors de la formation du grès. Souvent ces grains montrent de petites apophyses, qui peuvent former des ponts entre deux grains. Ce sont vraisemblablement de petites cristallisations de gypse qui donnent un peu de cohésion à la surface. De petits grains et cristaux de gypse parsèment aussi la surface, un peu comme sur le panneau à l'aurochs de La Saboterie 1 (fig. 21). Les algues forment un voile plus ou moins dense selon l'exposition. Tous les sillons, anciens et modernes, présentent la même configuration. Le fond des sillons est tapissé et/ou rempli par de fins cristaux et/ou grains de gypse (fig. 27C à E). Les grains de quartz du fond des sillons sont complètement recouverts par ce gypse ce qui laisse entrevoir que l'épaisseur atteint au moins le demi-diamètre des grains de quartz, c'est-à-dire environ 100 μm ou plus. L'agrégat de gypse est compact, les grains sont interpénétrés et soudés et ont donc cristallisés sur place ou ont été partiellement recristallisés par dissolutions et précipitations successives. L'opposition entre fond de sillon et surface du panneau est totale : peu de gypse en surface et sillons remplis de gypse.

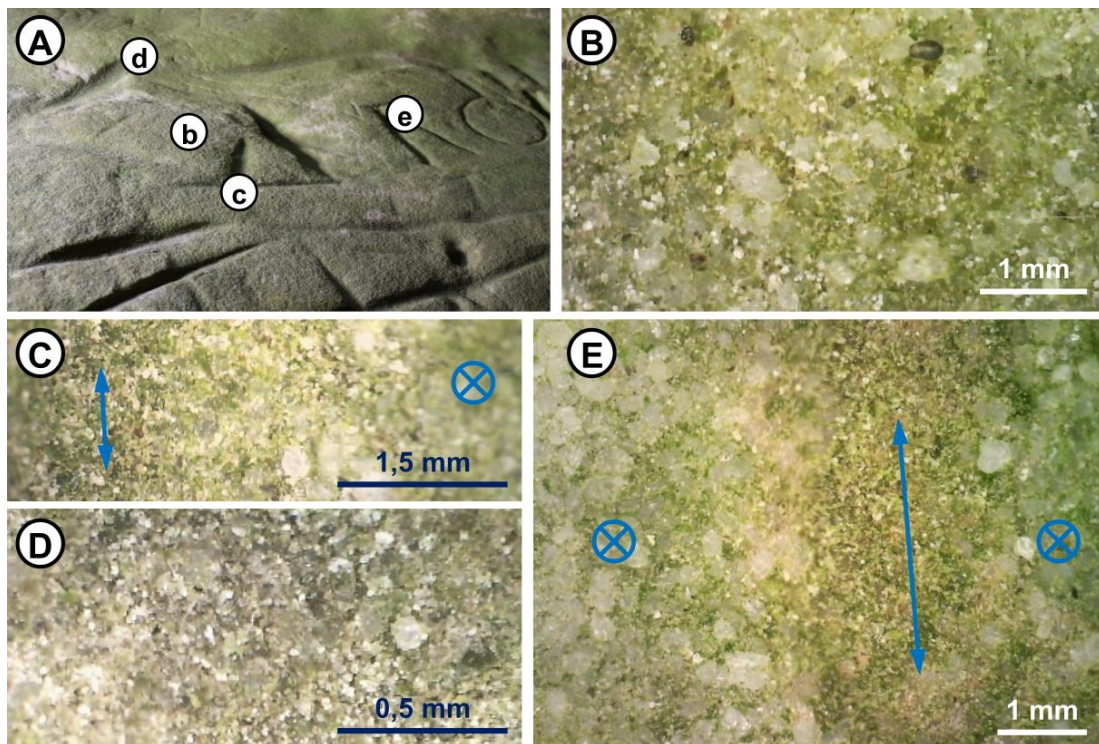


Figure 27 – Sillons sur surface non encroûtée à l'entrée de l'abri La Pente de Courcelles 04 à Nanteau-sur-Essonne (Seine-et-Marne). (A) vue des gravures avec position des zones examinées ; les lettres minuscules correspondent aux images en lettres majuscules. (B) surface du panneau, grès presque nu, les grains de quartz sont anguleux et ils montrent souvent de petites apophyses qui sont vraisemblablement de petits cristaux de gypse accolés tandis que de petits cristaux de gypse parsèment aussi la surface colonisée par des algues vertes. (C) flanc d'un sillon type mésolithique, noter la présence de quartz sur la surface adjacente (floue) qui disparaissent progressivement vers le fond du sillon qui n'est formé que d'éléments fins ($\sim 50 \mu\text{m}$) composés de gypse et d'éléments plus sombres. (D) fond d'un sillon naviforme attribué au Mésolithique presque exclusivement composé de gypse, dont certains éléments aux contours échancrés ou accolés entre eux font soupçonner qu'ils ont subis des recristallisations. (E) fond du sillon de la gravure moderne, exclusivement formé d'éléments fins, dont du gypse, qui contraste avec la surface de grès nu seulement parsémeée de quelques poussières de gypse. Les flèches bleues indiquent l'allongement des fonds de sillon et les cercles barrés les surfaces adjacentes.

Le déficit de gypse en surface peut avoir 2 origines : soit il ne s'en forma pas ou peu sur cette surface horizontale en raison de l'absence de drainance d'eau porale (voir figure 6), soit il est périodiquement lessivé par des entrées de pluie et/ou des condensations. L'abondance de gypse dans les sillons peut provenir de l'évaporation d'eaux provenant des dissolutions en surface. Il est difficile d'envisager que le gypse provienne directement de l'évaporation d'eaux porales, car dans ce cas les bords des sillons devraient aussi être couverts et on peut estimer que l'accumulation aurait une structure pustuleuse comme les croûtes de surface. En revanche on peut exclure une accumulation détritique significative à partir de poussières car dans ce cas on s'attendrait à voir de nombreux éléments exogènes mêlés au gypse. Peu importe le mécanisme, il en résulte que tous les sillons, anciens ou récents, présentent la même configuration.

Surface horizontale sur plancher avec passages

L'abri Pente de Courcelles 16, à Nanteau-sur-Essonne (Seine-et-Marne) a des sillons au plancher de l'entrée sud. La surface du grès relativement nue ne s'effrite pas et supporte des algues et des lichens sur les côtés du passage principal (fig. 28A). Les larges sillons anciens en bordure du passage d'entrée et l'étroit sillon d'un calvaire christique sur le passage montrent des remplissages différents. La surface du panneau et le fond des sillons anciens latéraux supportent des traces de lichens et quelques rares cristaux de gypse avec des grains de quartz bien apparents. Sur le passage d'entrée, la surface du panneau est plus nue, avec uniquement quelques cristaux de gypse logés dans les espaces intergranulaires, en revanche le fond de l'étroit sillon est couvert de fins granules de gypse mêlés à des fins grains de quartz et quelques éléments plus sombres vraisemblablement d'origine biologique. Dans cet exemple, il y a clairement piégeage d'éléments détritiques fins dans le sillon étroit. Vraisemblablement, les éléments piégés ont été préservés (en partie) car contrairement à l'exemple des sillons de l'abri Le Courtil de la Maladrerie 14 (fig. 26), les balayages pour nettoyage des sillons du panneau n'atteignent pas le fond de ces sillons étroits et profonds.

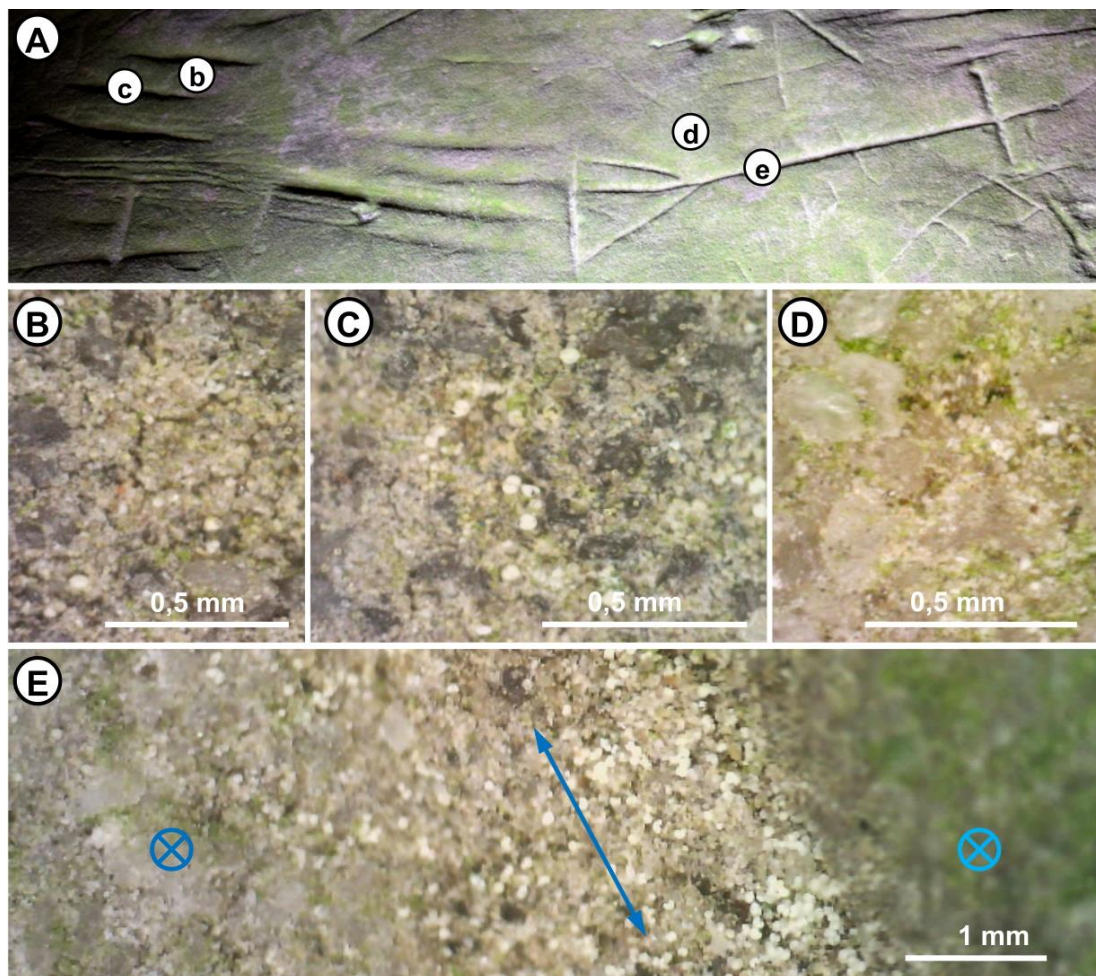


Figure 28 – Sillons sur passage fréquenté à l'entrée de l'abri a La Pente de Courcelles 16 à Nanteau-sur-Essonne (Seine-et-Marne). (A) vue des gravures avec position des zones examinées ; les lettres minuscules correspondent aux images en lettres majuscules. (B) surface en bordure du passage avec grès nu couvert de thalles de lichen (résiduels ?) avec fentes de dessiccation et des grains de gypse dispersés. (C) fond de sillon évasé de type mésolithique d'aspect très similaire à la surface du panneau adjacente. (D) surface du panneau sur le passage d'entrée de l'abri, grès nu, sans lichen apparent et rares grains de gypse dans les dépressions entre les grains de quartz. (E) sillon étroit et profond du calvaire avec remplissage de granules de gypse, petits quartz et quelques débris organiques (sombres). La flèche bleue indique l'allongement du fond du sillon et les cercles barrés les surfaces adjacentes.

7.4 Résultats

Les observations exploratoires sur l'évolution des croûtes ont conduit à prendre en considération l'évolution des panneaux gravés qui subissent des intempéries. Les études précédentes, essentiellement sur les sites de La Ségognole et de La Saboterie avaient été focalisées sur les encroûtements minéraux brunâtres qui couvrent l'essentiel des surfaces gravées. Les surfaces biotiques couvertes proches des ouvertures, verdies par des algues, avaient été délaissées.

Les sites plus ouverts des régions méridionales de la vallée de l'Essonne montrent l'importance des implantations biologiques. Leurs effets sur l'altération et la destruction des gravures se sont révélés bien plus intense que celui des croûtes gypseuses. Le regard porté sur les gravures récentes, certaines du 19^{ème} siècle, a montré leur vitesse d'altération, avec effacement complet dans ce laps de temps des parties les plus exposées.

Ces mêmes sites ont opportunément donné accès à l'observation de sillons gravés sur des surfaces horizontales et montré la spécificité de leur évolution. Ils montrent le remplissage des sillons par des éléments fins, qui de premier abord paraissent liés à des accumulations de poussières. Ces remplissages n'avaient pas été vus dans les études précédentes qui concernaient des surfaces verticales ou très pentées et qui surtout n'avaient pas été examinées avec la loupe digitale. Cette dernière s'est révélé un instrument particulièrement adapté à l'observation *in situ* sur le terrain et à la taille milli- à centimétrique des sillons gravés. Des ouvertures sur d'autres applications se développeront sûrement à l'avenir.

8 Acquis et perspectives

Si les analyses *in situ* à la loupe digitale n'ont pas conforté pour le moment les hypothèses enthousiastes et quelque peu simplistes sur l'horloge des croûtes, elles ont néanmoins apporté des observations complémentaires sur l'évolution et l'altération des panneaux gravés subissant des intempéries et couverts par des revêtements biologiques.

Les observations exploratoires sur l'évolution des croûtes ont conduit à considérer l'évolution des panneaux gravés qui subissent des intempéries. Elles ont en particulier montré l'importance des couvertures de lichens dans la dégradation des panneaux gravés. Les thalles des lichens se comportent un peu comme les croûtes gypseuses : ils se développent, se dessèchent et se desquament en se rétrécissant et en s'enroulant, et par là arrachent une pellicule de grès, de manière similaire aux desquamations des croûtes gypseuses. La grande différence avec les croûtes gypseuses est la fréquence des desquamations. Si la majorité des desquamations gypseuses observées dans les abris sont probablement la première et unique desquamation intervenue depuis la mise en place des abris, les lichens en revanche se renouvellent sur des périodes beaucoup plus courtes de 10 à 100 ans et potentiellement peuvent arracher des grains de quartz du grès à chaque cycle. Il y a une différence de fréquence comprise entre 1.000 et 10.000, voire plus entre desquamations des croûtes gypseuses et des lichens. C'est énorme en termes de bilan de matière arrachée, même si tous les dessèchements de lichen n'arrachent pas des grains du substratum.

Ces premières appréciations conduisent à exclure que des gravures faites en extérieur aient pu être préservées. Corrélativement, on ne peut donc pas exclure que des gravures en extérieur ont existées. Ce n'est pas l'absence de gravures en extérieur qui permet de les dénier et par là affirmer que seuls les lieux abrités ou cachés étaient recherchés pour graver. Si les gravures sont actuellement limitées aux abris c'est en raison de leur préservation. Les gravures à l'interface intérieur/extérieur montrent l'agressivité de l'altération sur les parties exposées aux intempéries, avec élargissement et évasement des sillons, puis leur effacement progressif. D'autant plus qu'il existe aussi des grès et surfaces plus tendres sur des rochers des chaos. Si ces rochers tendres ont été gravés il n'y a aucun espoir d'en retrouver des traces. Admettre l'hypothèse que des gravures extérieures ont pu orner les chaos remet en cause certaines « spéculations » sur la signification des gravures et recentre probablement ces gestes sur des activités somme toute relativement « banales ».

Le remplissage des sillons par des éléments détritiques n'avait pas été clairement formulé, ni anticipé. Pour l'instant il enlève tout espoir de pouvoir utiliser les remplissages de sillons comme élément de datation relative de sillons. Du moins sur les surfaces horizontales ou peu inclinées. Mais tout n'est peut-être pas aussi simple que cela a été vu dans cette première exploration. Il est très étonnant de voir ces remplissages dominés par le gypse, même si des quartz et des débris organiques sont parfois visibles. Très souvent la texture des accumulations de gypse en fins granules paraît si dense et pure qu'il est difficile d'imaginer qu'ils soient détritiques ... les sols des abris sont plus souillés par des sables fins soufflés par le vent que par du gypse qui tombe du plafond ! Cette pureté des dépôts laisse entrevoir une néogenèse possible, au moins *pro parte*. Mais cela ne changera rien pour les chronologies relatives puisque pour l'instant on n'a pas vu de différence entre les remplissages des sillons anciens et récents. Néanmoins, la question du « comment » mérite d'être posée, d'autant plus qu'on a admis que les sols des abris ne reçoivent pas d'eaux d'infiltration puisque celles-ci sont censées contourner les abris puis s'infiltrer à la verticale. Mais reste l'eau reçue par l'entrée des pluies ?

Si l'analyse des panneaux horizontaux a montré un comblement détritique des sillons qui ne donne aucun indice de maturité de croûte, en revanche la question reste ouverte pour les sillons gravés sur des panneaux verticaux ou très pentés. Au regard de l'importance de l'objectif, on ne peut négliger cette possibilité et il convient d'y mener des observations exploratoires avec une méthodologie similaire à celle qui a été appliquée aux panneaux étudiés cette année.

Enfin, à partir des quelques sites inspectés, il est apparu que les gravures historiques ne sont que très rarement au milieu de gravures typiquement mésolithiques. La juxtaposition de gravures mésolithiques et historiques est plus fréquente sur la périphérie des ensembles gravés. C'est une démonstration indirecte que les panneaux mésolithiques sont généralement très occupés, voire encombrés, ne laissant plus de place à des rajouts !

Références bibliographiques

ALEXANDROWICZ Z., MARSZALEK M., RZEPA G.

2014 - Distribution of secondary minerals in crusts developed on sandstone exposures. *Earth Surf. Process. Landforms* 39, p. 320–335.

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.

LIU T., BROECKER W.S.

2008, Rock varnish evidence for tatests Pleistocene millennial-scale wet events in the dryl ands of western United States. *Geology*, 36, p. 403-406.

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

THIRY M.

2017 - La Ségognole : propriétés et altérations des parois gravées. C, p. 119-166.

CANTIN A., THIRY M.

2017 - Mesurer la dureté des parois de grès gravés : premiers essais. in : Valentin B. (ed.), Art rupestre préhistorique dans les chaos gréseux du Bassin parisien (ARBap). Étude, archivage et valorisation. Programme collectif de recherche (2018-2020), Rapport d'activités 2017, p. 243-259.

THIRY M., LIRON M.N., DUBREUCQ P., POLTON J.-C.

2017 - Curiosités géologiques du massif de Fontainebleau, Guide géologique, BRGM Editions., 115 p.

THIRY M., ZOTKINA L., BELLANGER F.

2019 - Abri orné du Terrier au Renard 12 à Buno-Bonnevaux (Essonne). in PCR - Gravures rupestres préhistoriques dans les chaos gréseux du Bassin parisien (ARBap). Étude, archivage et valorisation, B. Valentin (coord.), rapport UMR 7041 – Université Paris 1 - DRAC Île-de-France, Service régional de l'archéologie, p. 135-188.

WHITLEY D.S., SANTORO C.M., VALENZUELA D.

2017 - Climate change, rock coatings, and the archeological record. Elements, 13, p. 183-186.