

La conservation de l'art pariétal préhistorique des grottes, les raisons d'un miracle

François Bourges¹, Alain Mangin², Dominique D'Hulst² et Pierre Genthon³

Résumé : *L'extraordinaire conservation des grottes ornées préhistoriques est attachée aux propriétés du milieu physique plutôt qu'à la nature des vestiges. Nous attribuons cette robustesse aux conditions d'équilibre thermodynamique local qui persistent, au niveau de la paroi, comme conséquence de la régulation de long terme des flux de matière et d'énergie propre au fonctionnement du système karstique. A l'échelle de la grotte, des différences dans l'état physique ou la morphologie des cavités imposent une complexité microclimatique supplémentaire. La préservation des grottes ornées nécessite ainsi la prise en compte du fonctionnement de l'ensemble du système naturel en liaison avec la grotte mais aussi l'identification des processus de régulation particuliers à chacun de ces sites.*

Abstract : *The extraordinary conservation of the prehistoric decorated caves is linked to the properties of the physical environment rather than to the nature of the remains. Robustness is due to the local thermodynamic equilibrium at the wall-air interface which remains stable as a consequence of the long-term regulation of fluids and energy flows that characterizes the behaviour of the whole karst. On the scale of the cave, differences in physical state and morphology determine a supplementary microclimatic complexity. Therefore the conservation of decorated caves requires to consider not only the natural system as a whole and its relationship to the cave but also to identify specific regulation processes at work in each site.*

Introduction

La découverte puis la reconnaissance d'un art pariétal préhistorique en grotte voici un peu plus d'un siècle fut pour les archéologues européens une surprise considérable à cause de sa valeur artistique reconnue et de l'extraordinaire durée et qualité de sa conservation. Les découvertes récentes des grottes Cosquer et Chauvet participent à ce miraculeux héritage avec, pour cette dernière, des âges radiocarbones au-delà de 30 000 ans pour les vestiges les plus anciens (Clottes *et al.* 1995) et une fraîcheur stupéfiante de certaines représentations.

Nous présentons ici, à partir du modèle actuel de fonctionnement du milieu souterrain karstique et des caractéristiques spécifiques de ces sites, une

analyse des conditions et des processus de conservation des grottes ornées préhistoriques. Les informations proviennent d'acquisitions de données physico-chimiques spatiales et temporelles sur le karst, les cavités et les fluides qui y circulent. Les mesures utilisées proviennent d'études (Le Mas d'Azil, les cavernes du Volp, la Grotte du Moulin de Laguenay), de suivis environnementaux de long terme sur des grottes ornées (Grottes de Niaux, Marsoulas, Pech Merle, Chauvet, Gargas) mais aussi de travaux sur des cavités karstiques sans contenu archéologique (l'Aven d'Orgnac, le Gouffre d'Esparros).

L'information est extraite des données par la description statistique et l'analyse du signal. Des modèles physiques sont utilisés pour rendre compte des fonctionnements identifiés.

1. Géologie-Environnement-Conseil, 30 rue de la République, 09200 St Giron, France, email : geconseil@wanadoo.fr.

2. Laboratoire de Moulis, 09200 St Giron, France, email : alain.mangin@ism.cnrs.fr

3. IRD / Hydrosociences Université Montpellier II, Place Eugène Bataillon 34095 Montpellier – France, email : genthon@msem.univ-montp2.fr

Paradoxes et problématique de la conservation

L'un des paradoxes de la conservation des grottes ornées est la situation d'œuvres humaines, vestiges artistiques fragiles mais parfaitement préservés, dans un milieu souterrain souvent perçu comme « hostile » ou au moins très différent de notre environnement habituel et notablement éloigné des normes muséologiques. Ainsi, au-delà de l'obscurité, la quasi-saturation en humidité, les concentrations en CO₂ jusqu'à 100 fois supérieures à celles de l'air l'extérieur, le déficit en oxygène, les activités en radon élevées, les films humides en paroi, les égouttements ou les arrivées d'eau permanentes sont autant de caractéristiques communes qui font la spécificité de ce milieu naturel. En revanche, les vestiges et leurs supports sont extrêmement divers (fig. 1). Les peintures, dessins ou gravures sont, suivant le site, appliqués sur des parois rocheuses homogènes et saines, des concrétions, des encroûtements de calcite, des surfaces altérées, des plaques d'argile ou du limon. Ainsi, si l'on excepte les vestiges recouverts ou indurés par des dépôts de calcite qui leur confèrent une réelle robustesse, dans la plupart des cas, **ce sont les propriétés physiques du milieu environnant qui permettent leur préservation** et non la nature même des vestiges ou la qualité de leur support.

L'exceptionnelle stabilité dans le temps de ces sites semble contredite par l'expérience de Lascaux, dont les problèmes de conservation sont récurrents depuis qu'en 1963 la grotte fut fermée au public. La fragilité révélée à Lascaux s'est manifestée dans d'autres grottes par des altérations qui ont confirmé que l'ancienneté de ces sites n'est pas toujours un gage de robustesse : les peintures préhistoriques ne sont pas pour l'essentiel des « fossiles » pétrifiés par les dépôts de calcite, certains pigments affleurent comme au moment de leur application. Ainsi de 1978 à 1981, les ruissellements en paroi du Salon Noir de Niaux effacèrent plusieurs représentations. Des problèmes attribués à la surfréquentation ou à des aménagements inadéquats ont endommagé en quelques années des sites préhistoriques qui avaient résisté aux changements environnementaux radicaux antérieurs à l'Holocène. Les conditions de la stabilité et de robustesse des grottes ornées pour des durées quasiment géologiques restent un sujet largement débattu (Andrieux 1970; Fernandez *et al.* 1986 ; Mangin 1988 ; Cigna 1993 ; Hoyos *et al.* 1997 ; Pulido-Bosh *et al.* 1997 ; Mangin *et al.* 1999 ; Bourges *et al.* 2006).

Un contexte naturel conservatoire

Nous analysons la stabilité physique de long terme de ces vestiges pariétaux par un équilibre thermodynamique local où l'absence de potentiel de transformation significatif au voisinage de l'interface air/roche assure la pérennité des supports et des vestiges. Les supports rocheux ne sont pas inertes,

ils constituent l'environnement le plus immédiat des vestiges, ils assurent le transfert des fluides air et eau et procurent l'inertie au milieu. Les nombreux sites qui n'ont quasiment subi aucune modification depuis leur réalisation témoignent de la persistance de ces conditions idéales.

Ni dans la problématique de l'archéologie, ni dans celle de la conservation, il n'est souhaitable de dissocier le vestige de son contexte. Dans le cas des grottes ornées, la connaissance du milieu naturel karstique, de son fonctionnement et de ses évolutions possibles apparaît depuis plusieurs décennies comme un préalable nécessaire à la compréhension et à l'analyse des propriétés conservatoires des sites (Andrieux 1970 ; Mangin *et al.* 1989 ; Vouvé 1996).

Après sa formation, le karst constitue un milieu stable pour les transferts de matière dans un réseau de vides souterrains interconnectés de morphologies et de tailles variables. Il se compose dans les premiers mètres d'une **zone épikarstique** qui est une interface avec le milieu superficiel, c'est une zone altérée, fracturée et riche en remplissages qui échange avec l'extérieur mais peut aussi stocker de l'eau de pluie, d'une **zone d'infiltration** où les modes d'écoulements sont différents suivant la taille des conduits, les temps d'infiltration aussi. Les circulations libres d'eau ou d'air se font dans des grandes fractures, elles sont souvent rapides, alors que l'infiltration conjointe d'air et d'eau (diphase) se produit dans les plus fines fractures et nécessite des temps plus longs. Les eaux transfèrent aussi des matériaux sous forme de dépôts détritiques (argiles sables, limons) et chimiques (concrétions de calcite ou d'aragonite) qui s'accumulent en remplissages de cavités. Finalement l'eau atteint une **zone noyée** de l'aquifère karstique dont l'exutoire est souvent une grosse source tandis que l'air est drainé par des réseaux souterrains de fractures ou des cavités interconnectées qui ont souvent leurs exutoires dans les entrées naturelles des grottes ou les macro-fractures. De nombreuses propriétés du milieu souterrain sont des effets du transit de matière et permettent d'analyser les karsts comme des systèmes dynamiques qui possèdent des propriétés de régulation des flux de matière et d'énergie (Mangin, 1984; Mangin, 1995).

Les facteurs d'influence sur le fonctionnement du karst sont nombreux et de natures diverses, ils impliquent des phénomènes biologiques (actifs dans les sols), chimiques (dissolution et précipitation des carbonates, composition de l'atmosphère souterraine) ou physiques (hydrodynamique des écoulements, thermique). Ils participent à l'établissement de « grandes constantes » du milieu qui sont aussi celles des grottes ornées.

Le travail de mesure et de suivi à l'intérieur des cavités permet de détecter d'autres phénomènes physico-chimiques importants pour la qualité

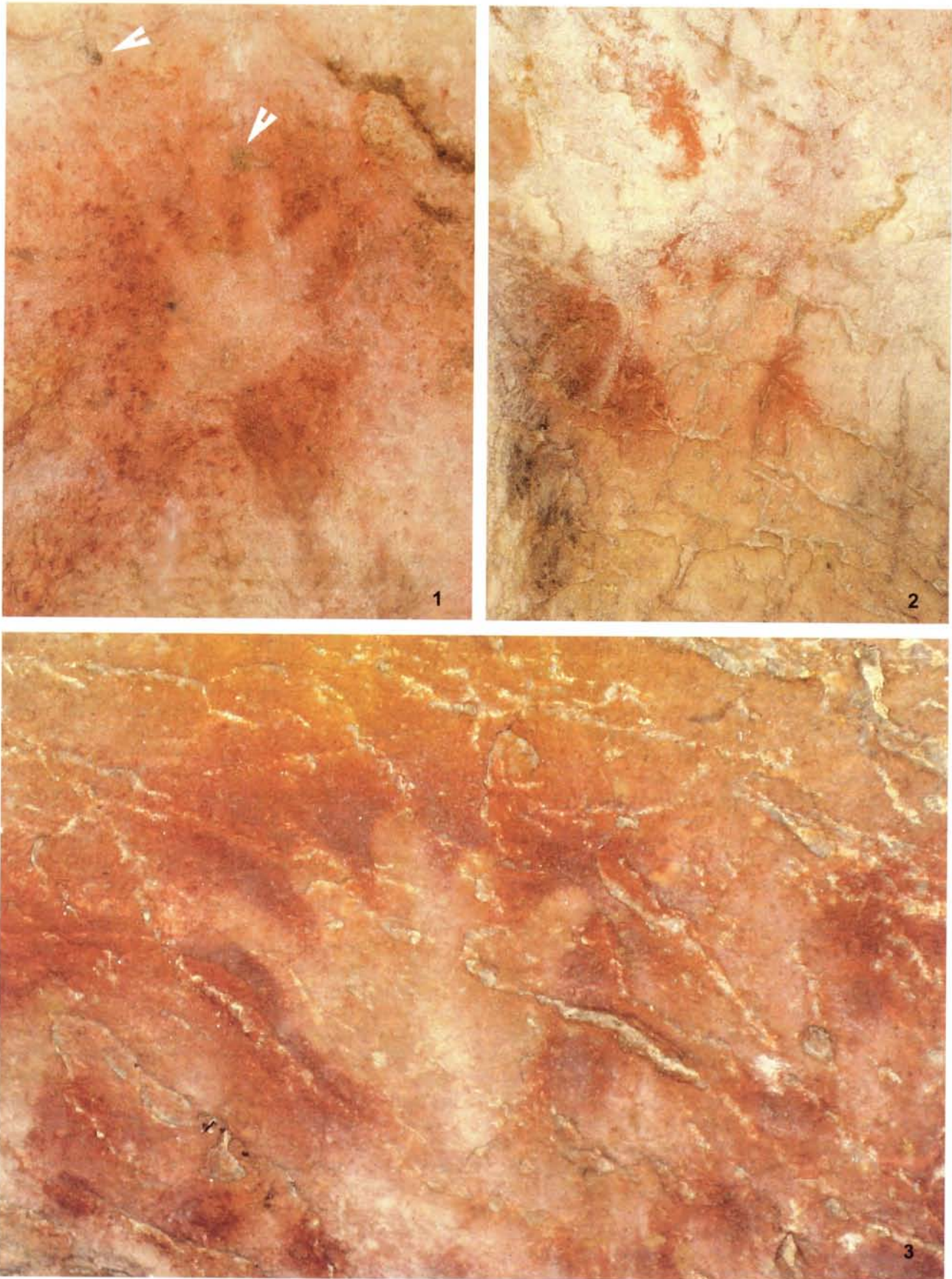


Fig. 1. Différents états de conservation des mains négatives peintes dans la grotte de Gargas (Hautes-Pyrénées). 1 : traces récentes et salissures. 2 : film de calcite cachant l'extrémité des doigts. 3 : aucune altération visible (cl. F. B.).

conservatoire. Au niveau d'échelle du site apparaît une variabilité supplémentaire qui concerne les microclimats (définis comme la succession dans le temps des états des atmosphères souterraines) qui interviennent aussi dans les mécanismes de régulation. Ces phénomènes dépendent fortement de la configuration physique des lieux (interface avec l'extérieur, nombre et position des entrées, disposition et extension des galeries, remplissage ou colmatage...)

Nous considérons ici différentes échelles d'observation pour décrire les interactions des paramètres souterrains et les propriétés qui en émergent. Il s'agit du système karstique qui est l'échelle pertinente pour décrire les relations entre le milieu extérieur et le milieu souterrain, puis de l'échelle de la cavité qui permet de rendre compte de la complexité des microclimats et des échanges à proximité des entrées naturelles. L'échelle des œuvres pariétales illustrera des problèmes de conservation particuliers.

L'échelle du système karstique

La caractéristique la plus notable du milieu est la stabilité de la température des grottes. Si dans la plupart des formations géologiques, l'augmentation moyenne de température en profondeur est de 3°C tous les 100 mètres, les cavités karstiques font exception. Ainsi, des grottes sous des hauteurs de roche de plusieurs centaines de mètres ont une ambiance thermique proche des moyennes annuelles de surface. Ce refroidissement est attribué à l'infiltration de l'eau de pluie dans les réseaux de fractures et de microfractures (Andrieux 1970). Malgré l'énorme volume de roche ainsi refroidi, la stabilité n'est pas toujours garantie en raison des apports d'énergie qu'engendrent les visites, les éventuels équipements ou les échanges naturels avec l'extérieur. Si, près des entrées, il est classique de retrouver des effets thermiques saisonniers amortis, dans les parties les plus confinées des grottes où aucune perturbation directe en provenance des entrées naturelles n'est sensible, les variations naturelles de température à court et à moyen terme sont à peine de l'ordre du centième de degré. L'analyse de ces variations permet de les attribuer complètement aux échanges thermiques entre l'air souterrain, qui subit en permanence les changements de la pression barométrique extérieure, et le réservoir thermique infini et stable constitué par le milieu rocheux (Bourges *et al.* 2006). Ce phénomène identifié initialement dans des carrières souterraines (Perrier *et al.* 2001) indique le caractère naturellement isotherme du milieu souterrain ; régulant jusqu'aux variations de très faible amplitude, il peut être utilisé comme une des signatures du confinement souterrain et permet d'identifier la qualité conservatoire des sites.

Une autre propriété importante issue des transferts au sein du système karstique concerne la qua-

lité chimique de l'air des grottes, très différente de l'extérieur. L'air des grottes est quasiment saturé en vapeur d'eau, fortement enrichi en CO₂ et appauvri en O₂ dans un rapport mole à mole. L'essentiel du carbone du CO₂ de l'atmosphère souterraine possède une signature isotopique essentiellement biogénique (Bourges *et al.* 2001) issue du métabolisme des végétaux et des micro-organismes du sol qui consomment aussi l'oxygène. Cet air du sol est transféré en profondeur par l'infiltration de l'eau constituant un flux gazeux continu au niveau des parois en maintenant en deçà de l'échelle saisonnière une composition stable de l'atmosphère qui reste donc en équilibre avec celle régnant dans le milieu microfissural de la roche. Ainsi aucun gradient chimique significatif ne se développe à l'interface roche/atmosphère souterraine dans le cas de ce transfert gazeux.

Dans de nombreux sites, l'eau d'infiltration, du fait d'un temps de séjour important, est proche de l'équilibre chimique avec la roche encaissante et avec la phase gazeuse. Son émergence en paroi d'une grotte dont l'atmosphère est constituée par de l'air transféré depuis les microfissures ne génère pas de déséquilibre chimique préservant ainsi sur le long terme des états de paroi inchangés.

Ainsi ce sont les phénomènes de transferts dans le milieu karstique qui déterminent les conditions régnant en grotte et qui permettent leur régulation sur le long terme dans un flux d'échange de matière et d'énergie permanent. Nous supposons que ces équilibres ont pu se maintenir malgré la variabilité climatique anté-Holocène incluant pour les sites les plus anciens des changements climatiques majeurs dont le maximum glaciaire de 23 000 à 18 000 ans BP (Burroughs 2005).

L'échelle de la grotte

En plus des échanges au travers du système karstique, la grotte communique de manière plus directe avec le milieu extérieur par ses entrées naturelles. Cette double influence est déterminante dans les propriétés des grottes.

Si la morphologie des grottes atteste qu'elles ont été un stockage ou un drainage pour l'eau souterraine, elles n'ont plus actuellement cette fonction dans la zone non saturée du karst où elles ne reçoivent qu'une faible partie de l'eau d'infiltration transférée vers la zone noyée. De plus, cette eau a tendance à éviter les cavités en raison des pressions capillaires, de paramètres hydrauliques et structuraux du milieu qui la maintiennent au contact de la roche et de ses fissures (Mangin 1976). L'eau est cependant toujours présente par des écoulements ou des égouttements qui ruissellent et s'évacuent dans les sols, par des films humides ou des gouttelettes en paroi. Sa minéralisation lui confère des propriétés incrustantes qui se manifestent en fonction d'un gradient chi-

mique qui résulte principalement des écarts de pressions partielles en CO₂ entre l'eau et l'atmosphère mais aussi du débit. Ainsi des arrivées d'eau n'ont-elles pas toujours les mêmes conséquences suivant les sites, l'état des parois et l'enchaînement des événements : recouvrant des vestiges de calcite, humectant sans modification des zones ornées, délavant des peintures lors de ruissellements ou altérant les supports rocheux.

Si la fonction de drain pour l'eau a disparu, les grottes restent le plus souvent des drains actifs pour l'air, conditionnant ainsi la qualité et la dynamique des atmosphères souterraines. En l'absence de perturbations, un flux permanent issu principalement du sol et transféré dans la grotte par les réseaux de microfissures maintient de l'air souterrain sur toute la longueur des grottes dans un écoulement dirigé vers les entrées naturelles. La stabilité de cette situation et les conditions isothermes qui l'accompagnent caractérisent le confinement souterrain. En revanche, les variations de pression barométriques, de température extérieure, de composition de l'air, la configuration morphologique de la grotte, l'influence des entrées naturelles et des macrofractures du karst entraînent des modulations ou des perturbations significatives de cette situation et déterminent une complexité aérodynamique supplémentaire.

De nombreuses grottes ornées présentent ainsi une hétérogénéité dans les qualités d'atmosphère (compositions de l'air, températures et régimes thermiques) déterminant des secteurs où la dynamique des échanges est différente et qui sont souvent séparés par des interfaces compositionnelles témoignant d'un compartimentage aérodynamique. Cette structuration souvent saisonnière est interprétée comme une conséquence de l'influence directe du milieu extérieur par les entrées naturelles ou les macrofractures. Ainsi à Niaux, les compositions de l'air en été sont à-peu-près homogènes sur toute la longueur de la grotte (jusqu'au Salon Noir) ; l'hiver, la grotte s'ouvre par compartiments successifs à l'influence extérieure. Dans le cas de l'Aven d'Orgnac, des phénomènes thermo-convectifs sont à l'origine des ouvertures des compartiments les plus proches de l'entrée alors que dans les zones profondes du site, certains ne sont que rarement ou jamais ouverts et restent alors dans une situation de confinement souterrain (fig. 2a, 2b). Dans ces conditions, le compartimentage aérodynamique peut être analysé comme la manifestation d'une réaction à l'influence extérieure d'une atmosphère souterraine dont la dynamique propre est issue des phénomènes d'infiltration.

Lorsque le compartimentage est pérenne, il résulte d'un fonctionnement interne. C'est le cas de la grotte Chauvet où deux parties de la cavité présentent en permanence des concentrations en CO₂ différentes (fig. 3). Ce compartimentage est compatible avec un confinement général du site attesté

par la composition homogène en radon 222 dans la grotte. Ainsi, même si les compositions et les températures de l'air souterrain sont différentes dans ces deux zones, elles traduisent des situations d'équilibre dans les échanges avec le milieu karstique.

Dans les cavités où le compartimentage apparaît, les effets aérodynamiques complexes contraignent les régimes d'échanges. Un équilibre caractérise l'intérieur d'un même compartiment homogène en température et en composition comme dans l'exemple des profils de température et de composition dans la grotte Chauvet mais les échanges sont limités entre compartiments comme le montrent les interfaces compositionnelles très abruptes. Dans le cas des grottes qui s'ouvrent partiellement à l'influence extérieure, la saisonnalité des processus et la mobilité des interfaces compliquent encore les phénomènes. Si les effets de densité de l'air en liaison avec sa composition sont à l'origine du compartimentage le plus net, les effets thermiques sont également à l'origine de structures stables dans l'air des grottes : un compartimentage mais aussi une simple stratification thermique comme celle identifiée à Marsoulas limitent les échanges.

Près des entrées des grottes se trouve une zone d'interface active entre l'atmosphère souterraine et le milieu extérieur. Des échanges mobilisant les chaleurs latentes de transformation de phase s'y manifestent, parfois de manière spectaculaire par des effets de brouillards ou de condensation d'eau en paroi. Cette interface joue un rôle de tampon et protège le milieu souterrain de l'influence directe de l'extérieur. En revanche, c'est dans cette zone d'échange que les gradients sont les plus forts et les déséquilibres résultant sont importants ; la conservation n'y est pas garantie et les phénomènes d'altération y sont plus nombreux et plus actifs que dans les abris sous roche. Dans la grotte de Marsoulas, l'interface active entre la grotte et l'extérieur s'étend dans les parties ornées avec, entre autres effets, des alternances d'assèchements et de condensations entraînant localement des ruissellements et l'altération de parois peintes.

A l'échelle de la grotte, les circulations d'air donc n'ont pas toujours la régularité attendue et le compartimentage, la stratification thermique, la convection, les effets d'interface viennent ajouter de la complexité au drainage permanent de l'air du karst par les conduits de grottes. Certains de ces effets confèrent une robustesse physique supplémentaire compatible avec les propriétés conservatoires.

Le développement d'altérations d'origine biologique ou biochimique considéré parfois comme une évolution inéluctable de sites proches de la surface apparaît dans les cas analysés comme la conséquence d'un environnement perturbé par des apports en énergie ou en nutriments en quantité anormale pour le milieu souterrain (Couté 2002).

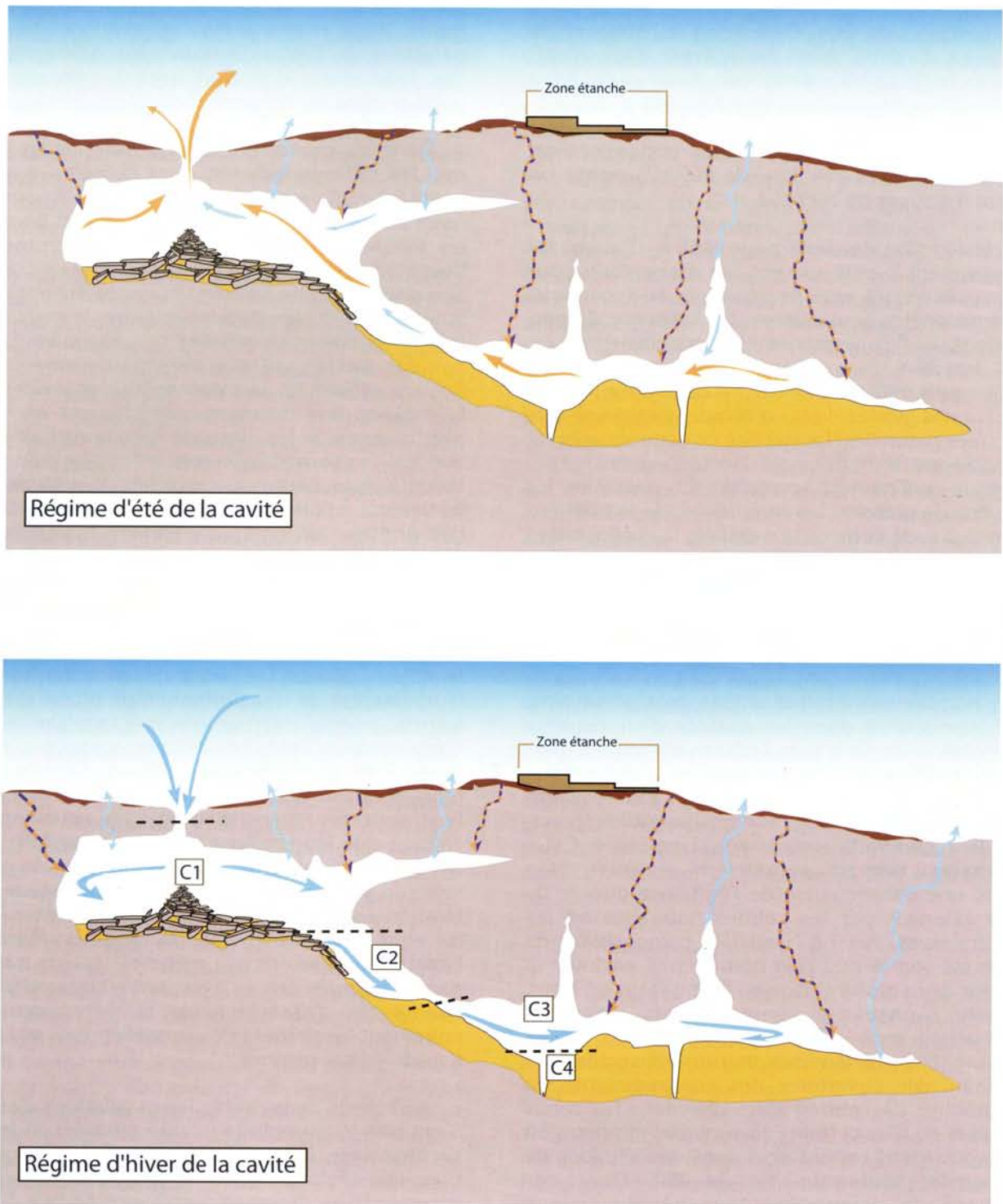
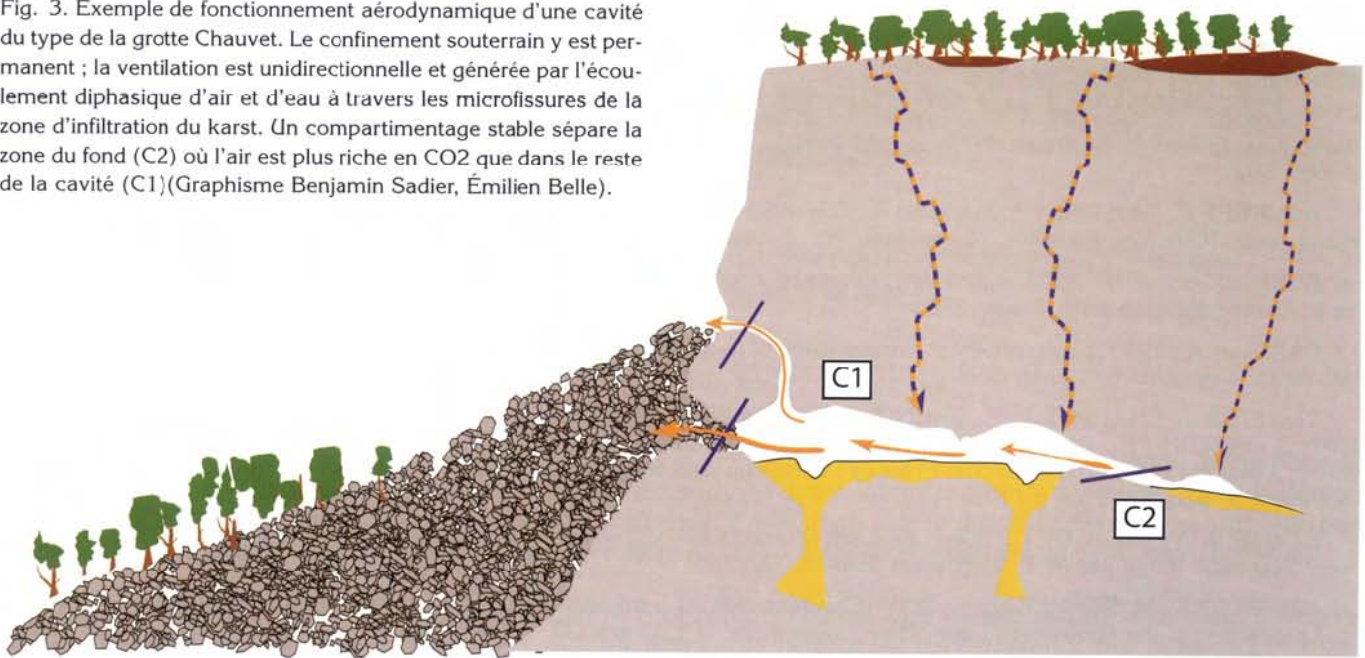


Fig. 2. Exemple de régime d'échange établi dans le site de l'Aven d'Orgnac (Ardèche). A partir de l'infiltration d'eau et d'air à partir du sol deux régimes de ventilation se succèdent.

a) L'été, l'air souterrain en provenance du sol (flèches jaunes) est drainé par les cavités et expulsé vers l'extérieur, l'eau poursuit son trajet vers la profondeur. La cavité est confinée mais dans certaines parties une ventilation peut cependant se produire par les macrofissures (flèches bleues). La présence de zones étanches ralentit la dynamique des infiltrations.

b) Le régime d'hiver se caractérise par des entrées d'air extérieur par les entrées naturelles, ces arrivées (flèches bleues) viennent diluer l'air souterrain et ouvrent l'espace souterrain à l'influence extérieure. Cet effet est tamponné par des rééquilibres thermiques très actifs et limité par le compartimentage aérodynamique de la cavité qui ouvre successivement les segments de grotte à l'influence extérieure (les limites des compartiments C1 à C4 sont représentées en pointillés) (graphisme Françoise Prudhomme, Benjamin Sadier, Emilien Belle).

Fig. 3. Exemple de fonctionnement aérodynamique d'une cavité du type de la grotte Chauvet. Le confinement souterrain y est permanent ; la ventilation est unidirectionnelle et générée par l'écoulement diphasique d'air et d'eau à travers les microfissures de la zone d'infiltration du karst. Un compartimentage stable sépare la zone du fond (C2) où l'air est plus riche en CO₂ que dans le reste de la cavité (C1)(Graphisme Benjamin Sadier, Émilien Belle).



Un système physique souterrain préservé devrait empêcher de telles évolutions.

Conclusion : un fonctionnement à préserver

La préservation dans le temps des œuvres pariétales des grottes ornées préhistoriques est attribuée au maintien d'un équilibre physico-chimique au niveau de l'interface rocheuse d'une cavité karstique. Cet équilibre tient à la fois aux transferts permanents de fluides dans l'ensemble du système karstique, à l'inertie importante du milieu rocheux et à la qualité des échanges de la cavité avec l'extérieur.

Cette analyse amène à concevoir pour ces sites des protections qui intègrent le système naturel et qui nécessitent la prise en compte d'éléments complémentaires par rapport aux dispositions habituelles appliquées aux Monuments Historiques. Ainsi apparaît la nécessaire identification de la zone d'infiltration dont le volume et le bassin d'alimentation sont déterminés par l'hydrogéologie karstique. De même, les entrées naturelles de la grotte et plus largement les zones macrofissurées où se produit l'échange aérodynamique, sont des parties dont la sensibilité particulière doit être évaluée et qui doivent être préservées en conséquence. Ce travail doit être complété par l'analyse du fonctionnement réel du site souterrain ; en effet, la variété dans la configuration

naturelle (ou les modifications anthropiques) induisent des sensibilités particulières qu'il est indispensable de détecter pour une gestion correcte. Il devient nécessaire aujourd'hui de réfléchir sur les risques nouveaux associés à un changement climatique d'origine anthropique dont les preuves s'accumulent. Si, comme nous le pensons, les régulations naturelles attachées aux transits de matière, aux échanges d'énergie, à la nature et à la taille des systèmes sont les facteurs de robustesse des cavités karstiques, les évolutions induites (mais non observées actuellement) des valeurs absolues des paramètres du milieu souterrain (températures ou teneurs en CO₂) n'auraient pas plus de conséquences sur la conservation qu'elles n'en ont eu dans le passé lointain. En effet, l'amplitude et la vitesse des variations induites dans le milieu souterrain resteraient suffisamment faibles pour maintenir le fonctionnement naturel sur un même mode de régulation. Malgré la possibilité que des événements catastrophiques (inondations, éboulements) ou des changements radicaux de l'environnement (montée du niveau marin, érosion, déforestation) affectent des sites ayant des sensibilités particulières, l'essentiel des menaces qui pèsent sur les grottes ornées préhistoriques restent les impacts directs de l'homme, responsables de variations de court terme, produites à l'intérieur même du système karstique et qui sont susceptibles de perturber les équilibres du milieu⁴.

4. Nous remercions les Directions Régionales des Affaires Culturelles Midi-Pyrénées et Rhône-Alpes, les Directions Régionales de l'Environnement Midi-Pyrénées et Rhône-Alpes pour leur soutien constant.

BIBLIOGRAPHIE

- ANDRIEUX C., 1970. Contribution à l'étude du climat des cavités naturelles des massifs karstiques II : aérodynamique souterraine. *Ann. Spéléol.*, n° 89, p. 25-51.
- BOURGES, F., MANGIN, A. et D'HULST, D., 2001. Le gaz carbonique dans la dynamique de l'atmosphère des cavités karstiques, l'exemple de l'Aven d'Ornac (Ardèche). Note aux *C. R. Acad. Sci., Paris, Earth and Planetary Sciences*, 333, p. 685-692.
- BOURGES F., GENTHON P., MANGIN A., D'HULST D., 2006. Microclimates of l'Aven d'Ornac and other French limestone caves (Chauvet, Esparros, Marsoulas). *Int. J. Climatol*, 26 (12), p. 1651-1670.
- BURROUGHS W. J., 2005. *Climate change in prehistory: the end of the reign of chaos*. Cambridge, Eng., New York, Cambridge University Press, 356 p.
- CIGNA, A.A., 1993. Environmental management of tourist caves : the example of grotta di Castellana and grotta Grande del Vento, Italy. *Environmental Geology*, 21, p. 173-180.
- CLOTTES J., CHAUVET J.-M., BRUNEL-DESCHAMPS E., HILLAIRE CHR., DAUGAS J.-P., ARNOLD M., CACHIER H., EVIN J., FORTIN PH., OBERLIN CHR., TISNERAT N. & VALLADAS H., 1995. Les peintures de la Grotte Chauvet-Pont d'Arc, à Vallon-Pont-d'Arc (Ardèche, France) : datations directes et indirectes par la méthode du radiocarbone. *C.R. Acad. Sci. Paris*, T. 320, Série IIa, p.1133-1140.
- COUÏÉ, A. YÉPRÉMIAN, C., 2002. *Les contaminants biologiques des biens culturels (L'homme et les algues des cavernes)* ; ouvrage dirigé par M. F. Roquebert. Elsevier, 420 p.
- DE FREITAS CR, SCHMEKAL A., 2003. Condensation as a microclimate process: measurement, numerical simulation and prediction in the Glowworm Cave, New Zealand. *Int. J. Climatol*, 23, p. 557-575.
- FERNANDEZ P., GUTIERREZ I, QUINDOS L., SOTO J, VILLAR E., 1986. Natural ventilation of the paintings room in the Altamira cave, *Nature*, 321, p. 586-588.
- HOYOS, M., SOLERS, V., CANAVERAN J.C., SANCHEZ-MORAL, S., SANZ-RUBIO, S., 1997. Microclimatic characterisation of a karstic cave (Candamo Cave, Northern Spain), *Environmental Geology*, 33, p. 231-241.
- MANGIN, A., 1976. *Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques*, Thèse Univ. Dijon, 124 p.
- MANGIN, A., 1984. Pour une meilleure connaissance des systèmes hydrologiques à partir d'analyses corrélatoires et spectrales, *J. of Hydrol.*, 67, p. 27-43.
- MANGIN A., 1988 Réflexion sur les mécanismes de l'infiltration dans les karsts à partir de l'exemple de Niaux. *Bulletin du Centre d'Hydrogéologie de l'Université de Neuchâtel*, 8, p. 3-26.
- MANGIN A., ANDRIEUX C., 1989. Le karst milieu conservatoire des oeuvres préhistoriques. Problèmes posés par leur conservation. in *Actes des colloques de la Direction du Patrimoine* (Novembre 1984, Périgueux le Thot), Ministère de la Culture, de la Communication, des Grands Travaux et du Bicentenaire, p. 171-178.
- MANGIN A., BOURGES F., D'HULST D., 1999. Painted caves conservation: a stability problem in a natural system (the example of the prehistoric cave of Gargas, French Pyrenees). *C. R. Acad. Sci. Paris*, 328, p. 295-301.
- PERRIER, F., MORAT, P. AND LE MOUËL, JL., 2001. Pressure induced temperature variations in an underground quarry. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 191 : 145-156.
- PULIDO-BOSH A., MARTIN-ROSALES, W., LOPEZ-CHICANO, M., RODRIGUEZ-NAVARRO, C.M., VALLEJOS, A., 1997. Human impact in a tourist cave, *Environmental Geology*, 31, p. 142-149.
- VOUVÉ J., BRUNET J., MALAURENT PH., VIDAL P., 1996. Protection de l'environnement des sites ornés in *La conservation des grottes ornées*, Paris, CNRS éditions, p. 139-151.