

Philippe AUDRA¹,
Jean-Yves BIGOT²,
Hubert CAMUS³,
Christophe GAUCHON⁴
et Michel WIENIN⁵

(1) Polytech'Nice - Sophia & l'CiTy (IMREDD), Université de Nice Sophia Antipolis, 930 route des Colles, 06410 Biot, audra@unice.fr

(2) Association française de karstologie, catherine.arnoux@club-internet.fr

(3) CENOTE, camus.hubert@laposte.net

(4) EDYTEM, Université de Savoie, christophe.gauchon@univ-savoie.fr

(5) Association française de karstologie et Société cévenole de spéléologie et de préhistoire, michel@wienin.com

La grotte-mine du Piei (Lagnes, Vaucluse), paléokarst hypogène à remplissage de minerai de fer oxydé

RÉSUMÉ : La grotte-mine du Piei (Lagnes, Vaucluse) s'ouvre au contact des monts de Vaucluse et du bassin de Carpentras, à proximité de la fontaine de Vaucluse. Elle se développe dans les calcaires crétaqués à faciès urgonien, sur un linéament régional, la faille de Salon-Cavaillon. La grotte a été exploitée par des mineurs au XIX^e siècle, rendant possible l'accès à des conduits auparavant comblés par des sables néogènes et des minéralisations ferrugineuses. L'origine de la cavité est reliée à des circulations hypogènes remontant des profondeurs le long de failles ou de colonnes de brèches hydrauliques, avec un dépôt de minéralisations ferrugineuses au contact ou au sommet du remplissage sableux. Durant cette phase de fonctionnement, une activité microbienne était présente, en association avec ces minéralisations ferrugineuses. Cette cavité a probablement fonctionné au Néogène, en

relation avec le soulèvement du plateau de Vaucluse. La grotte-mine du Piei a enregistré la position du niveau de base contemporain de son activité, et par conséquent le basculement progressif du plateau, au même titre que les autres cavités hypogènes similaires localisées sur la bordure occidentale du plateau de Vaucluse.
MOTS-CLÉS : karstification hypogène, minéralisations ferrugineuses, paléocirculations, grotte-mine, Vaucluse.

ABSTRACT: THE PIEI MINE-CAVE (LAGNES, VAUCLUSE, FRANCE), A HYPOGENE IRON-ORE PALEOKARST. The Piei mine-cave is situated at the contact of the Vaucluse Mountains and the Carpentras basin, close to the Fontaine de Vaucluse spring. It develops in Cretaceous limestone (urgonian facies) on a main regional lineament, the Salon-Cavaillon fault. The cave was mined in the 19th

Century, giving access to passages previously completely filled with diverse neogene sands and massive iron crusts. The miners mainly followed the natural passages. The origin of the cave is related to hypogenic flow rising along deep fissures or hydraulic breccia pipes, depositing iron sand fillings. Microbial activity was present during that time, and is associated to the iron deposition. This cave probably was active in the Neogene, when the Vaucluse plateau was uplifted. The Piei mine-cave records the position of the corresponding base level and thus the progressive tilting of the plateau, as do other similar caves located around the western edge of the Vaucluse Plateau.

KEY-WORDS: hypogenic karstification, ferruginous mineralizations, paleoflow, mine-cave, Vaucluse.

Introduction

Les grottes-mines sont des cavités karstiques dont le remplissage a été vidé pour sa valeur économique. L'exploitation minière a ouvert des vides naturels, auparavant inaccessibles. Ces cavités présentent des caractéristiques particulières liées à la présence de minéralisations rares [Forti, 2005], elles-mêmes induites par une spéléogénèse spécifique, bien souvent hypogène, c'est-à-dire issue de remontées d'eaux profondes sans lien direct avec une recharge par les surfaces immédiatement voisines ou sus-jacentes [Ford, 2006]. Par ailleurs, elles recèlent des témoins de leur exploitation, historique ou protohistorique. Elles peuvent le cas échéant trouver un nouvel essor

économique au travers de leur valorisation touristique [De Waele & Naseddu, 2005].

Concernant l'origine des minéralisations, les dépôts se divisent entre 1/ les dépôts autochtones issus de l'encaissant ; 2/ Les dépôts allochtones provenant de l'extérieur ; et 3/ les dépôts parautochtones, étrangers à l'encaissant, mais de nature similaire à leur environnement proche [Filippov 2004]. Les dépôts autochtones correspondent à des niveaux interstratifiés, telle que la « Minette » aalénienne franco-luxembourgeoise. Les dépôts allochtones sont représentés par des croûtes ou cuirasses ferrugineuses issues de l'altération pédogénétique, que les processus d'érosion ont ultérieurement remaniées, qui

ont rempli les dépressions karstiques et que des processus de concentration tardifs ont pu transformer en vastes dépôts d'importance économique [Buffard 1993]. Les gisements peuvent être par ailleurs classés selon leur genèse en deux catégories : 1/ dépôts syngénétiques formés lors de la sédimentation de calcaires ; et 2/ dépôts épigénétiques formés après la lithification des calcaires, souvent appelés « dépôts hydrothermaux ». La plupart de ces derniers correspondent à la catégorie des dépôts parautochtones. Les inclusions fluides et les minéraux associés ont démontré qu'une majorité de ces gisements a été formée à partir de solutions hydrothermales à basse température [Onac 2005]. Cette dernière catégorie est

fréquemment en relation intime avec des vides karstiques. En conséquence, « les calcaires fournissent un gîte pour des dépôts en [...] fractures, en tant que dépôt de remplacement – où le calcaire a été dissous par les fluides à l'origine du gisement et les vides remplis – et en tant que dépôts dans des vides karstiques préexistants » [Bottrell, 2004]. Ceci signifie que les cavités sont antérieures ou se sont développées simultanément au gisement. Ces processus « hydrothermaux » avec karstification et remplissage simultanés sont à l'origine des plus grands sites d'exploitation Pb-Zn du monde, les gisements de type Mississippi Valley (MVT). La « porosité karstique » consiste en fait en fractures élargies, en breccia pipes, en conduits vides ou remplis, qui ont servi de guides préférentiels aux migrations de fluides minéralisés [Dúnlyski & Sass-Gutkiewicz, 1989]. Ces fluides porteurs de métaux en solution subissent un changement des conditions Eh/pH au contact du calcaire et avec les mélanges de solutions, d'où la précipitation des minéralisations [Bottrell, 2004]. La plupart de ces gisements se sont mis en place dans des karsts profondément enfouis, avec des minéralisations sulfurées correspondant à un milieu réducteur. Par la suite et avec l'émersion progressive, une oxydation a pu se produire dans la zone noyée peu profonde, comme dans les Guadalupe Mountains [Hill, 2000]. Moins fréquemment, le dépôt s'est effectué directement en gisement oxydé à proximité de la zone de battement, comme dans la Forest of Dean au Royaume-Uni [Lowe, 2000].

Outre la fontaine de Vaucluse, le plateau du Vaucluse est surtout connu pour ses avens de grande profondeur. Ce karst est principalement caractérisé par ses réseaux noyés profonds, « vauclusiens », dont la genèse découle de l'impact de la crise messinienne [Audra et al., 2004]. Toutefois, les cavités hypogènes ou à minéralisations y restaient inconnues. La grotte-mine du Piei recèle un gisement ferrugineux épigénétique parautochtone mis en place par des circulations hypogènes à proximité de la limite de recouvrement de l'aquifère karstique. Elle a été exploitée au XIX^e siècle pour ses minéralisations ferrugineuses. La grotte-mine du Piei se révèle être à la fois une cavité hypogène, un paléokarst, un site à minéralisations d'intérêt ayant gardé traces d'activité

microbiennes en relation avec le dépôt, un enregistreur de l'évolution géomorphologique et tectonique, et un témoin de l'activité minière proto-industrielle. Cette première étude spéléo-karstologique présente d'abord le contexte structural, topographique, l'évolution paléogéographique à l'origine des remontées hypogènes qui ont finalement produit un nombre significatif de cavités hypogènes à minéralisations ferrugineuses localisées en périphérie du plateau de Vaucluse. L'exploitation artisanale vers 1830 se situe dans la continuité de l'activité métallurgique de la région, et elle a contribué à vider de vastes galeries karstiques sur plus de 300 m.

Dans cet article, nous n'avons pas considéré les processus à l'amont de la minéralisation, tels que l'origine profonde des minéralisations, les processus de dissolution et de transport par les fluides minéralisant, ni les conditions de piégeage des minéralisations en réponse aux changements brutaux des conditions physico-chimiques [Sharp & Kyle, 1988]. Cette étude préliminaire

se focalise sur la phase finale de mise en place des minéralisations, révélée par l'étude morphologique de la grotte-mine, par les faciès de minéralisation, et par l'identification de circulations hypogènes alimentées par des fissures profondes et par des breccia pipes. L'étude établit les caractéristiques de l'hydrodynamique, de la karstification et des processus de minéralisation associés, ainsi que le contexte paléogéographique correspondant. Les cavités à minéralisation ferrugineuses du plateau de Vaucluse ouvrent un champ d'investigation sur la quantification des rythmes de surrection et de l'évolution paléogéographique correspondante depuis le Miocène.

I. Données hydrogéologiques à l'origine des remontées hypogènes

A. Contexte structural et topographique

La grotte-mine du Piei s'ouvre au cœur du village de Lagnes, à 140 m d'altitude, près du sommet d'une petite

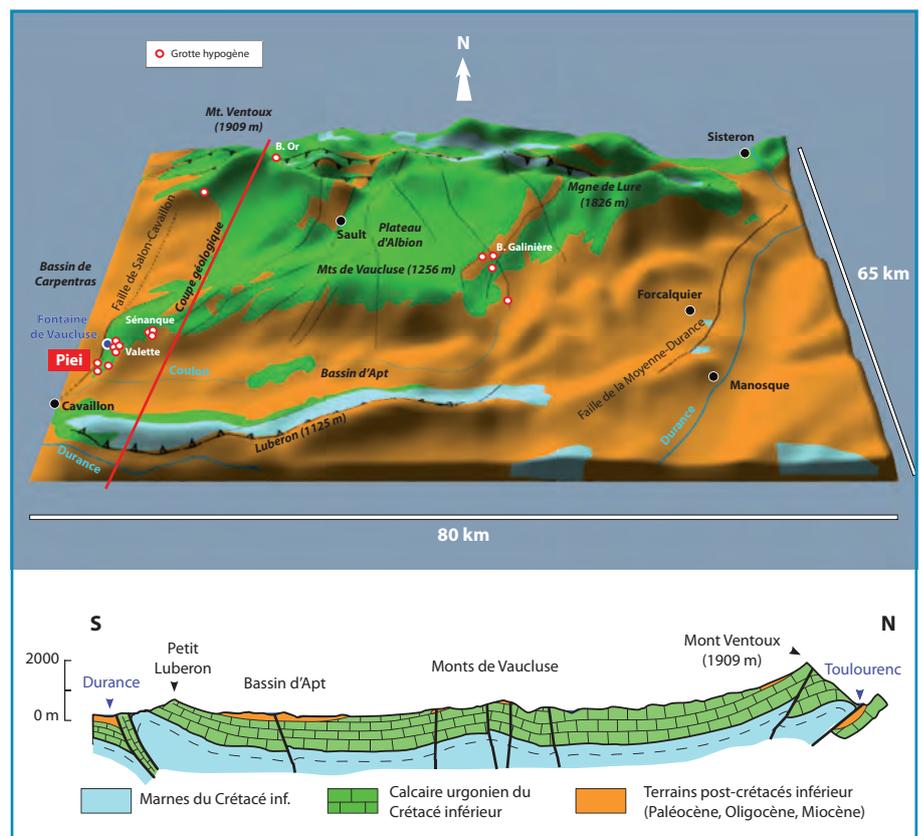


Figure 1 : Structure géologique du plateau de Vaucluse. La dalle est constituée d'épais calcaires urgoniens du Crétacé inférieur, faiblement ondulés. Elle est bordée au nord et au sud par des chevauchements ayant accommodé le raccourcissement alpin. Les cavités hypogènes se localisent en périphérie, à la croisée des accidents majeurs [géologie d'après Blavoux, 2010].

Geological structural of the Vaucluse plateau, made of thick Lower Cretaceous urgonian limestone. It is gently undulated and limited to the north and to the south by overthrusts resulting from the alpine shortening. Hypogenic caves are located on the periphery along major fault lines.

colline calcaire dominant d'une cinquantaine de mètres la plaine de Carpentras (figure 1). Le nom dérive de *puech* en occitan, *puèi* ou *piè* en provençal rhodanien, *podium* en latin, désignant une colline avec souvent fonction de site défensif. La colline du village de Lagnes est à quelques kilomètres au sud de la célèbre fontaine de Vaucluse, à la pointe sud-ouest du plateau de Vaucluse. Ce plateau s'élève ensuite vers le nord en un panneau incliné irrégulier jusqu'au mont Ventoux, point culminant à 1909 m d'altitude.

Le plateau de Vaucluse est une vaste dalle ondulée structurée est-ouest. Il est armé par les calcaires crétacés inférieurs à faciès urgonien, épais de 700 à 1 000 m. Ce panneau ondulé culmine au nord le long de la crête Ventoux-Lure formant une barrière à regard nord à 1500-1900 m d'altitude. Il s'abaisse au sud vers la partie centrale du plateau d'Albion située entre 700 et 1 000 m d'altitude, se relève aux monts de Vaucluse, avant de plonger brutalement vers la gouttière synclinale du bassin d'Apt, pour se relever finalement au sud et former la chaîne anticlinale du Luberon. Cette dalle calcaire ondulée est délimitée au nord par les soubassements marneux hauteriviens du fait du relèvement des structures ; partout ailleurs, du fait du plongement structural, la limite des calcaires suit le recouvrement des niveaux plus récents, paléogènes et néogènes. Cette limite de confinement entre l'aquifère urgonien et sa couverture s'abaisse graduellement des Alpes vers la vallée du Rhône, à partir du coin NE situé vers Sisteron en direction du SO à Lagnes.

Par ailleurs, la dalle urgonienne rigide est intensément fracturée par des failles NE-SO et NO-SE ainsi que par des fossés oligocènes N 30°. En périphérie, de grands accidents ont accommodé le serrage de ce bloc lors de la phase pyrénéo-provençale à l'Éocène et lors de la phase alpine majeure au Miocène. Des structures chevauchantes ou déversées à vergence externe délimitent les crêtes Ventoux-Lure au nord et du Luberon au sud. Le plateau calcaire est environné de grandes failles décrochantes régionales : faille de la Moyenne-Durance à l'est, de Salon-Cavaillon au SE, et de Nîmes à proximité du coin nord-ouest. La faille de Salon-Cavaillon passe par Lagnes et disparaît au nord de la fontaine de Vaucluse. La plupart de ces grands

accidents sont anté-miocènes, avec un jeu notamment à l'Oligocène, certains étant toujours actifs comme la faille de la Moyenne-Durance [Guignard *et al.*, 2005] et peut-être également celle de Salon-Cavaillon [Sauret & Terrier, 1990].

Au niveau de Lagnes, la retombée de calcaire urgonien sur le bassin oligocène de Carpentras est marquée par le passage de la faille de Salon-Cavaillon qui délimite un petit fossé à l'est du village (figure 19). Les molasses gris-vert burdigaliennes ont transgressé en biseau d'aggradation (*onlap*) les calcaires urgoniens. Elles sont conservées dans le fossé à l'est de Lagnes et s'épaississent vers l'ouest en direction du bassin de Carpentras, où elles sont recouvertes par les formations quaternaires. La grotte du Piei s'ouvre près du sommet du bloc soulevé du village de Lagnes, à proximité de la faille de Salon-Cavaillon.

B. Paléo-hydrogéologie

L'abaissement des calcaires urgoniens détermine la convergence du drainage vers le point le plus bas d'affleurement de l'aquifère urgonien, au coin SO du plateau de Vaucluse. Du fait de la présence d'une profonde reculée où jaillit la fontaine de Vaucluse, la position de l'émergence actuelle se situe quelques kilomètres plus au nord. L'organisation générale de ce drainage est rapportée à l'incision messinienne, qui par l'importance du gradient mis en jeu, a permis de collecter les infiltrations d'un vaste bassin [Audra *et al.*, 2004]. Dès la transgression pliocène, la fontaine de Vaucluse est devenue l'exutoire principal, fonctionnant d'abord en émergence littorale [Gilli & Audra, 2004]. Après le retrait de la mer pliocène, la position de la fontaine de Vaucluse s'est conservée à cause de la persistance du recouvrement imperméable pliocène plus à l'aval [Mocochain *et al.*, 2011]. Avant le Messinien, le drainage était sans doute fragmenté en bassins plus restreints. L'aven de Valescure, en contre-haut de la fontaine de Vaucluse, a fonctionné en émergence vauclusienne de l'Aquitainien supérieur au Burdigalien inférieur, au contact du recouvrement des molasses [Couturaud, 1993; Besson *et al.*, 2005a et b; Parize *et al.*, 1997; Audra, 2007]. Par sa position structurale, topographique, et par conséquent hydrogéologique, ce secteur a joué le rôle de point d'émergence depuis le début du

Miocène jusqu'à nos jours. En période de crue, des venues d'eau complémentaires à la fontaine de Vaucluse jalonnent la bordure du bassin de Carpentras. L'aven des Esclargades, situé à l'ouest de Lagnes à la limite entre l'aquifère calcaire et la couverture molassique, est une petite émergence vauclusienne abandonnée, attestant de ces débordements de l'aquifère [Couturaud, 1992].

C. Cavités hypogènes à minéralisations ferrugineuses

Le plateau de Vaucluse recèle de nombreuses cavités à minéralisation ferrugineuses (figure 1, tableau 1). Elles se localisent exclusivement en périphérie, à proximité des limites de recouvrement imperméables, à l'intersection avec les grands accidents (faille de Salon-Cavaillon, chevauchement du Ventoux, fossé de Simiane). Les gisements de fer correspondent souvent à des filons remplissant des fissures karstifiées ; parfois il s'agit de cavités aux parois recouvertes de croûtes (Espérelles, Baume de l'Or, Valette, etc.), plus rarement de dépôts massifs (Piei). L'aven du Chat est un cas unique, avec un « tronc ferrugineux » constitué d'un agglomérat de baguettes ferrugineuses développées sur filaments microbiens (*poolfingers*). Ce tronc se développe sur 60 m de hauteur pour environ 1 m de diamètre et remplit une cheminée karstique phréatique. Dans la baume Galinière, la genèse est sulfurique et les croûtes de fer proviennent de l'oxydation d'amas de pyrites [Audra & Bigot, 2013]. Ces cavités sont assurément d'origine hypogène du fait de leur localisation (limite de confinement, failles régionales), de leur morphologie (labyrinthes, morphologies d'écoulements remontants) et de leurs dépôts (fer, enduits de cristaux de calcite, et plus rarement gypse).

D. La grotte-mine du Piei, une cavité hypogène

La grotte-mine du Piei est de dimension modeste (328 m de développement pour 39 m de profondeur (figure 2)). L'entrée est une cheminée recoupée par la surface accédant à la salle des Rudistes, au niveau principal. Plusieurs branches approximativement horizontales y convergent, avec des parties remontantes ou des cheminées sur le côté NO de la galerie. La galerie E remonte progressivement du point

Tableau 1 : Caractéristiques des cavités hypogènes du plateau de Vaucluse. Toutes contiennent du fer et furent exploitées, hormis la Chaire à Prêcher et l'aven de la Carrière enduits de calcite en gros cristaux, et la baume Galinière à spéléogenèse sulfurique. FeOx désigne ici les oxy-hydroxydes de fer (goéthite-hématite principalement). *Characteristics of the hypogenic caves of the Vaucluse plateau. All contain ferruginous mineralizations that have been mined, except the Chaire à Prêcher and the Aven de la Carrière, covered with calcite spar, and the Baume Galinière with a sulfurous speleogenesis.*

bas en passant sous une cheminée, la « Grande colonne ». Elle s'achève par deux branches parallèles étroites. Le réseau inférieur est relié à la salle des Rudistes par un puits. La cavité suit plusieurs fractures parallèles N 20-40° bien visibles dans les réseaux éloignés, hauts et étroits. Avant l'exploitation, la cavité était probablement presque entièrement occupée par le remplissage sableux minéralisé, et l'espace actuellement parcourable correspond aux déblaiements miniers du remplissage, auquel s'ajoutent de courtes galeries de reconnaissance creusées en pleine roche le long de fissures.

Du point de vue morphologique, les conduits présentent des sections arrondies

typiques d'écoulement noyé, ainsi que des formes épinoquées plus localisées. Les cheminées du côté NO et la Grande Colonne correspondent à des points de remontée des écoulements noyés, qui suivaient des chenaux de voûte paragénétiques au-dessus du remplissage sableux. Des vagues d'érosion dans le réseau inférieur attestent également un flux remontant. Tous ces éléments montrent que les flux provenaient du réseau inférieur et de la galerie E, convergeaient vers la salle des Rudistes, puis remontaient vers la surface par les cheminées côté NO. Près de la Grande Colonne, des chenaux de paroi à l'interface roche-remplissage montrent un écoulement ascendant, provenant d'un point d'alimentation (*feeder*) (figure 5).

Par ailleurs, de nombreuses formes attestent une phase épinoquée postérieure : encoches de niveau, plafond paragénétique dans la salle des Rudistes ayant enregistré le niveau de la surface piézométrique.

Les sédiments sont composés du remplissage principal et des enduits de paroi. Le remplissage principal est constitué de sable vert correspondant aux molasses burdigaliennes qui ont recouvert le secteur. Ce remplissage est soit contemporain de la transgression du Burdigalien, soit issu de remaniements postérieurs. Les minéralisations de fer restant après l'exploitation se limitent à des encroûtements sur les parois et des amas massifs dans le réseau inférieur (*infra*). Mais les archives minières nous apprennent que les minéralisations se développaient en « veines dans la roche » et en « amas dans le remplissage ». L'observation des témoins résiduels suggère que les minéralisations se concentraient au contact paroi-remplissage, tout particulièrement au toit de la galerie, et spécialement dans les coupoles. Enfin, dans les zones hautes proches des points de sortie, les croûtes d'oxydes de fer sont couvertes d'un enduit de calcite à gros cristaux, raboté par la corrosion (photo 1). Cette calcite atteste une seconde phase, noyée, avec dégazage à proximité de la surface piézométrique favorisant la précipitation de la calcite. D'autres coupoles à plafond plat, étagées à diverses profondeurs, semblent plutôt liées à des

Cavité Cave	Commune City	Spéléométrie (dev. / prof.) Speleometry (length / depth)	Altitude Elevation (m)	Faïlle Fault	Minéralisations Hypogènes Hypogenic mineralizations	Exploitation Mining technics	Références References
Grotte du Piei	Lagnes	328 / ± 39	140	Salon-Cavaillon	FeOx massif, filons, croûtes	Vidage remplissage et grattage croûtes (1832-35)	Cet article
Aven du Chat	Lagnes	-60	245	Salon-Cavaillon	FeOx en méga-poolfinger, enduit de calcite	Exploitation du « tronc ferrugineux » jusqu'à -40 (1835-36)	Morin et al., 1997
Grotte des Espérelles	Lagnes	50 / -12	170	Salon-Cavaillon	FeOx	Grattage des enduits et filons de fer	Morin et al., 1997
Aven-mine de Sénanque	Gordes	-26	450	Salon-Cavaillon	FeOx	?	Morin et al., 1997; Gaubert & Lefalher 1995
Grotte-mine de Sénanque (ou de l'Abbaye ?)	Gordes		450	Salon-Cavaillon	FeOx	?	Morin et al., 1997; Gaubert & Lefalher 1995
Grotte-mine de la Vache (ou Cabre) d'Or	Fontaine-de-Vaucluse	33 / -8	280	Salon-Cavaillon	FeOx (déblais en contrebas de l'entrée)	Grattage des parois et vidage sédiments	Morin et al., 1997; Gaubert & Lefalher 1995
Aven de Valette (ou aven Sans nom)	Fontaine-de-Vaucluse	31 / -7	270	Salon-Cavaillon	FeOx (déblais en contrebas de l'entrée)	Grattage des parois et vidage sédiments	Morin et al., 1997; Gaubert & Lefalher 1995; Gauchon 1997
Aven du Pin	Fontaine-de-Vaucluse	15 / -5	220	Salon-Cavaillon	FeOx (déblais en contrebas de l'entrée)	Grattage des parois et vidage sédiments	Morin et al., 1997; Gaubert & Lefalher 1995
Baume de l'Or	Saint-Léger-du-Ventoux	≈ 50	1350	Chevauchement Ventoux	FeOx	Identification incertaine	Gauchon 1991
Baume Galinière	Simiane-la-Rotonde	191	615	Fossé de Simiane	Enduits FeOx, scalénoédres calcite (haute température ?), gypse. Spéléogenèse sulfurique	Exploitation de cuirasses de fer en surface (pas dans la grotte)	Parein & Languille 1981; Audra & Bigot 2013
Puits et cavités du Vallon des Mines (ou d'Émines)	Bédoin	-8	≈ 700	Aplomb plan de chevauchement du Ventoux	Filon FeOx dans les puits, croûtes dans les cavités	En puits	Couturaud (inédit)
Chaire à Prêcher	Oppedette		≈ 450	Faïlle d'Oppedette	Enduit de calcite en gros cristaux	n/a	Martel 1951
Aven de la Carrière	Banon		760	Fossé de banon	Enduit de calcite en gros cristaux	n/a	Bigot inédit

piégeages gazeux ou des convections d'eau à faible profondeur sous la surface piézométrique. Enfin, le rabotage homogène des enduits de calcite correspond à une phase tardive, avec abaissement de quelques mètres de la surface piézométrique, soumettant alors les enduits dénoyés à la corrosion par les aérosols.

L'ensemble des formes (morphologies phréatiques, coupoles, chenaux de paroi et de plafond, *feeders*) caractérisant des écoulements remontants, associées aux minéralisations ferrugineuses, attestent une spéléogénèse hypogène, où l'alimentation issue des profondeurs était sans rapport direct avec la recharge météorique.

II. Un bref cycle d'exploitation minière suivi d'un oubli progressif

A. Une tradition métallurgique historique

Autour de Fontaine-de-Vaucluse, le travail du minerai de fer est avéré au moins depuis la fin du Moyen-Âge : dans la deuxième moitié du XV^e siècle, plusieurs contrats attestent le fonctionnement de martinets le long de la Sorgue ; des minières des environs alimentaient ces ateliers sidérurgiques [Guigue & Girard, 1949, p. 27] : il existait en effet des gîtes de fer « sur les communes de Lagnes, de Vaucluse, de Saumane, de Gordes, de Saint-Saturnin, et en général sur tout le contour du massif que constitue le Néocomien supérieur, depuis la fontaine de Vaucluse jusqu'au-delà de Simiane » [Gras, 1862, p. 321]. Par ailleurs, il est probable que des gisements aient également été exploités dans le flanc nord du Ventoux (baume de l'Or, tableau 1). Lors de leurs prospections, les spéléologues ont souvent retrouvé et documenté ces grottes et avens où le minerai avait été exploité [en particulier J.-P. Viard, ACRC, topographies reprises dans Gaubert & Lefalher, 1995]. La grotte-mine du Piei, étudiée récemment par les archéologues [Morin et al., 1997] et les historiens [Locci, 1988], restait inconnue des spéléologues qui la considéraient au mieux comme une mine. L'identification en tant que cavité karstique est très récente [Rouzaud Fr., in Morin et al., 1997], il s'agit par conséquent de la première étude spéléo-karstologique.

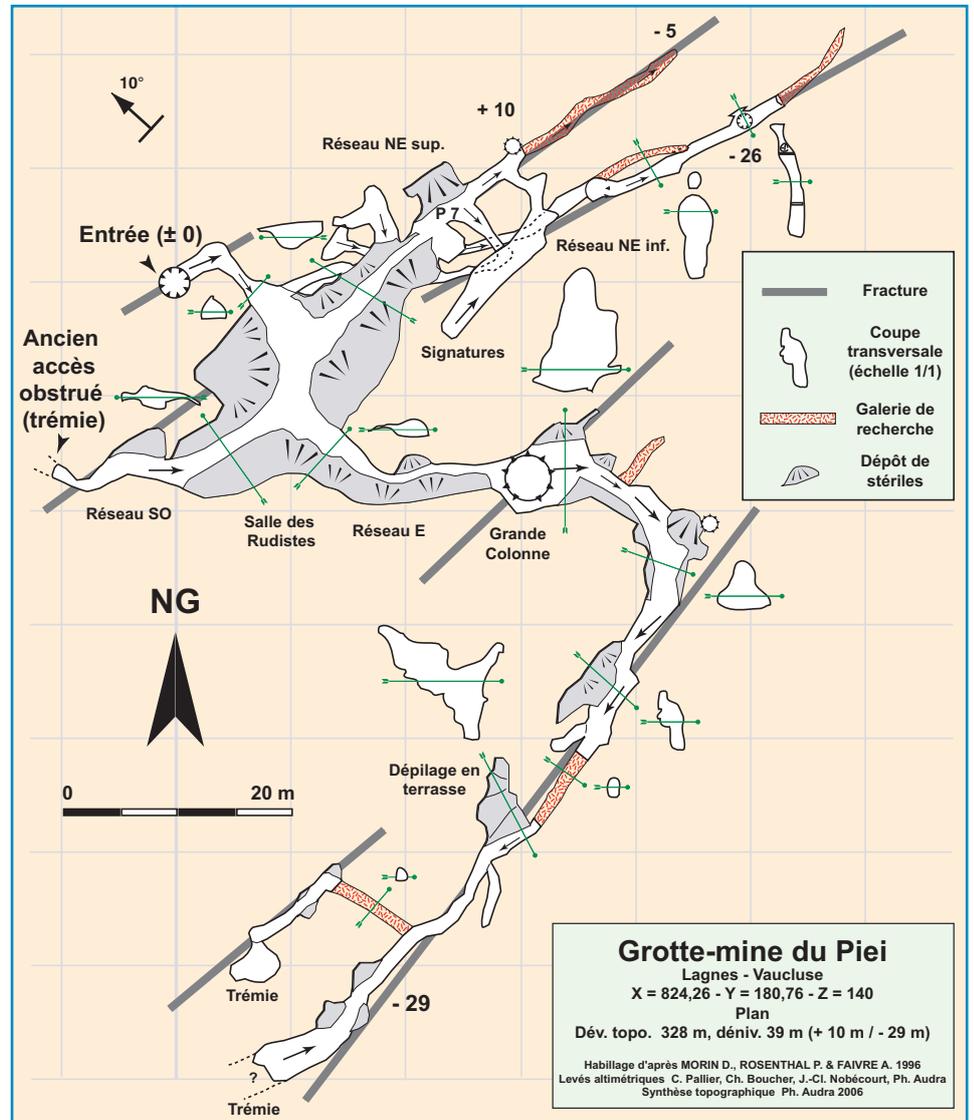


Figure 2: Plan de la grotte-mine du Piei. La coupe est représentée sur la figure 6.
Plan view of the Piei mine-cave. The cave profile is shown on figure 6.



Photo 1: Sommet d'une coupole proche de l'entrée. Les croûtes de fer (taches brunes) sont couvertes d'un enduit de calcite subaqueuse, ultérieurement raboté par les vapeurs agressives. L'échelle mesure 20 cm. Cliché J.-Y. Bigot. Ceiling of a cupola close to the entrance. Ferruginous crusts (brown patches) are coated with subaqueous calcite spar that was later smoothed by aggressive aerosols. Scale is 20 cm long.



Figure 3: Carte topographique de la concession de minerais de fer de la commune de Lagnes: 382 ha, aux termes de la concession du 9 août 1833, échelle du document original: 1/10 000 (la lettre N juste au nord du village indique la grotte-mine du Piei; la lettre X au nord-est de la concession indique l'aven du Chat) [Archives départementales de Vaucluse, 1833].
 Topographic map of the iron mining claim in the commune of Lagnes: 382 ha, related to the terms of the claim of the 9th of August 1833. Original scale is 1/10 000 (the letter N indicates the Piei Mine-Cave, X the Aven du Chat).

B. Brève phase d'activité de la mine du Piei

Les quelques documents conservés aux Archives départementales du Vaucluse et les écrits publiés depuis le XIX^e siècle convergent tous: l'exploitation de la mine du Piei ne fut jamais très bien organisée; pendant les trois années environ où elle fut en activité, elle conserva un côté informel qui nous empêche de nous faire une idée très précise de son fonctionnement. Une « notice descriptive des mines de fer de Lagnes dressée en exécution de la circulaire ministérielle du 7 mai 1894 » (A. D. Vaucluse, 8 S 23) constatait qu'il était impossible de retrouver « les chiffres relatifs au tonnage et à la valeur des minerais extraits, au nombre d'ouvriers employés, ainsi que le montant des recettes brutes, des dépenses et du produit net ». La découverte de la mine elle-même fut dès l'origine contestée entre plusieurs concurrents [Locci 1988]; la

redevance due à la commune de Lagnes et fixée par la concession de 1833 semble n'avoir jamais été honorée; et les plans et coupes au 1000^e que les exploitants devaient lever chaque année et remettre à la Préfecture, aux termes du cahier des charges, n'ont sans doute jamais été dressés ou, en tout cas, nous n'en retrouvons aucune trace dans les archives... Comme c'est souvent le cas, ce sont surtout les contentieux, dont fourmille l'histoire de la mine du Piei, qui ont laissé le plus de traces dans les archives: conflits commerciaux entre les entrepreneurs Perre et Martin, protestation d'un industriel de la commune voisine de Saumane soucieux de ne pas être concurrencé sur l'approvisionnement en minerai, plainte déposée par les villageois de Lagnes craignant que la mine ne fragilise leurs maisons... Ces documents circonstanciels sont heureusement complétés par les descriptions du géologue Scipion Gras [1862] qui restent les plus complètes et probablement les plus fiables.

La mine a dû être découverte au début des années 1830, et le fondeur Gustave Perre conçut alors le projet de l'exploiter pour fournir le minerai au haut-fourneau qu'il souhaitait construire à Velleron; même si le gisement de Lagnes était trop modeste pour alimenter durablement ce haut-fourneau, il en était proche (12 km) et, avec d'autres gisements des environs, pouvait amorcer cette activité sidérurgique. Il déposa sa demande de concession en préfecture à l'automne 1831, et celle-ci fut accordée en août 1833 (figure 3).

C. Modalités d'exploitation

D'après l'ingénieur des Mines H. de Villeneuve [1834], l'exploitation dut commencer avant même que la concession ne fût officialisée: en effet, son rapport fait état de deux ouvertures qui donnent accès à la mine, l'une horizontale faite en 1830 (peut-être liée à la découverte), l'autre sous la forme d'un petit puits de 3 m percé en 1832. Le document le plus informatif est un manuscrit très complet, détaillant le cahier des charges de la mine [A. A., 1833]. L'article 1^{er} donne de précieuses indications en distinguant les endroits « où le minerai se présente en veines ou blocs dans le sable » de ceux où il « se présentera en veine mieux engagée dans le roc et où on ne pourra l'exploiter qu'en employant la poudre »; le cahier des charges précise la marche à suivre dans l'agencement des remblais pour « combler les vides déjà exploités et à égaliser la voie de sortie » et dans l'exploitation systématique et prioritaire « des boyaux et cheminées renfermant du minerai » avant qu'ils ne soient obstrués par les murs de blocs calcaires. On voit par là que les



Photo 2: Au-delà de la Grande Colonne, des escaliers de pierres ou taillés dans l'argile facilitent le cheminement entre la paroi et des murs de déblais savamment appareillés. Tout est fait pour réserver le plus d'espace possible à la circulation des hommes, tout en limitant l'extraction des déblais stériles. Cliché J.-Y. Bigot. *Beyond the «Grande Colonne», staircases made of stone or cut in the clay help walking between the cave wall and the nicely built dump wall. All is made to give the largest possible space for workers, while limiting the extraction of dump to the surface.*

ingénieurs des Mines étaient soucieux d'optimiser l'exploitation de la ressource tout en minimisant la manutention des stériles.

L'observation de la grotte-mine telle qu'elle se présente aujourd'hui et les études archéologiques [Morin *et al.*, 1997] montrent que le minerai devait se trouver en amas argileux dont l'exploitation a laissé peu de traces de pics ; au contraire, les galeries désobstruées en pleine roche ont produit d'importants volumes de blocs entassés en hauts murs latéraux, y compris dans des niches en hauteur (photo 2). Des poches ont été vidées du bas vers le haut, et des murs élevés au fur et à mesure que les travaux progressaient (dépilage en terrasses, couv. IV).

D. Volume de minerai extrait

Quel pouvait être le volume d'activité d'un grotte-mine comme celle de Lagnes ? Dans un rapport contemporain du tout début de l'exploitation, l'ingénieur Villeneuve estimait que « le gisement pourra fournir vraisemblablement 40 à 50 quintaux métriques de minerai [par jour] » alors que le gisement en couches de Velleron en donnait 26 [Villeneuve, 1833]. La grotte apparaît

comme viable et « le roulement du haut fourneau offre quelques chances de durée ». Mais Villeneuve avait conscience que le gisement restait mal connu et que son exploitation était forcément aléatoire : « La compagnie Martin a compris que l'abondance du minerai de Lagnes était une chose éventuelle et où les prévisions pouvaient être trompées ».

A posteriori, S. Gras [1862] est le seul à proposer une estimation des volumes exploités : entre 1833 et 1835, « les produits se sont élevés à 3 000 quintaux métriques environ, dont le prix de revient a été de 1 franc à 2,40 francs par quintal, non compris les frais de travaux préparatoires et de recherches qui se sont élevés à des sommes considérables ». Cette estimation conduirait à estimer le volume de minerai extrait à un minimum de 60 m³, le volume réel étant sans doute plus important, du fait de l'impureté des extractions. Après trois années d'exploitation, le gisement a été considéré comme épuisé ; les efforts se sont ensuite reportés sur l'aven du Chat tout proche (figure 4) ; puis, après la découverte à Rustrel d'un gisement plus important et plus facile à exploiter, l'activité s'est déplacée vers Apt.

Le court épisode d'exploitation de la grotte-mine du Piei signe la transition entre la sidérurgie traditionnelle développée depuis plusieurs siècles autour de Vaucluse, et les prémices de la Révolution industrielle : le gisement en poche karstique est du même type que ceux qui ont été vidés depuis des siècles dans les environs, mais la construction d'un haut-fourneau, la constitution d'une société et le cadre imposé par le code minier (1810) annoncent une ère nouvelle. Les entrepreneurs comme Gustave Perre et Michel Gaspard Martin n'ont pas compris que la période qui s'ouvrait allait nécessiter des tonnages beaucoup plus importants et des conditions d'exploitation plus favorables. À la même époque, un autre entrepreneur connu les mêmes déconvenues avec un petit gisement découvert et exploité près de Bédoin [Gras, 1862, p. 320]. La grotte-mine du Piei et l'aven du Chat devaient rapidement céder devant les gisements de Rustrel, puis devant les grandes productions sidérurgiques industrielles d'Alès, du Creusot ou de Saint-Étienne... Par la suite, et jusqu'au début du XX^e siècle, la grotte est encore parcourue par des visiteurs et curieux qui laissent une trace de leur passage dans la galerie des Signatures (figure 2). Ensuite, elle tombera dans l'oubli jusqu'à la fin du XX^e siècle, quand les archéologues entreprennent son étude.

III. Analyse des minéralisations ferrugineuses et modalités de circulations des flux hypogènes

A. Minéralisations de fer et distribution des faciès

1. Faciès des minéralisations de fer

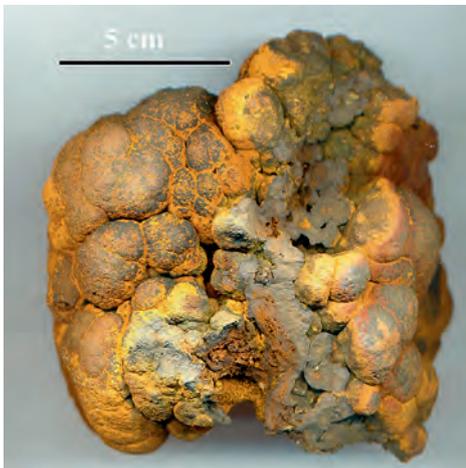
L'exploitation minière a été brutalement abandonnée, laissant des témoins des minéralisations ferrugineuses, en croûtes sur les parois, ou de dimensions plus importantes avec des blocs de plus de 20 kg d'oxyhydroxydes de fer massifs au fond du réseau NE. Ces minéralisations présentent trois principaux faciès propres à chaque secteur de la grotte.

Oxydes de fer filonien massif (photo 3)

Les parois de fissures larges de quelques millimètres à 1-2 cm sont remplies d'enduits massifs, disposés symétriquement à partir des épontes et



Photo 3 : Oxydes de fer filonien massif remplissant les fissures de la zone profonde.
Image scan P. Audra.
Massive dyke facies filling joints in the deep zone of the cave.



Photos 4: Accumulations d'oxydes de fer massif mamelonnés dans les coupoles profondes.
Images scan P. Audra.
Massive mamillary facies located in the ceiling cupolas.

laissant souvent un vide dans la partie centrale. Ces fissures correspondent fréquemment aux points les plus extrêmes atteints par les travaux miniers profonds, qui se sont arrêtés sur l'aminçissement brutal du dépôt (fond des réseaux E et NE inférieur). Il s'agit du faciès typique des fissures peu évoluées, situées en dessous des vides karstiques agrandis où se trouvent les dépôts les plus volumineux.

Les accumulations sont composées de dépôts massifs, ou de structures mamelonnées ménageant de petits vides résiduels. Les analyses à la sonde EDAX montrent qu'il s'agit d'oxydes-hydroxydes de fer extrêmement purs, probablement une association goëthite-hématite, avec une très faible part d'impuretés argileuses (photos 4, tableau 2).

Oxydes de fer spongiforme et mucoliforme sur support microbien (photos 5 et 6)

Dans la galerie principale horizontale, les parties hautes devaient receler un espace vide entre le plafond et le remplissage sableux. Tous les creux sont remplis d'oxydes de fer (photo 5). Le minerai présente un faciès poreux : texture spongieuse, *poolfingers*, pendants

Oxydes de fer stratiforme mamelonné ou massif (photo 4)

Au fond du réseau NE, les coupoles du plafond sont remplies par du fer massif, dont l'épaisseur dépasse 50 cm.

Eléments	Masse (%)	Atomes (%)
O	25.05	53.02
Al	0.68	0.86
Si	1.82	2.20
Fe	72.45	43.93
Total	100.00	100.00

Tableau 2 : Quantification à la sonde du fer massif. Il s'agit d'oxy-hydroxydes de fer quasiment pur, avec des traces d'argile révélées par la présence de quelques % de silice et d'aluminium.

EDAX Quantification (Standardless) of massive iron. It is almost pure iron oxihydroxide, with clay traces revealed by the presence of some percent of silica and aluminium.



Photo 5 : Cheminée dont les parois sont tapissées d'oxydes de fer remplissant les creux.
Cliché A. Couturaud. *Chimney with ferruginous crusts covering wall niches.*



Photo 6 : Faciès des dépôts ferrugineux de la zone supérieure. 1/ poolfingers vus de dessous, dans une petite coupole. 2/ concrétions ferrugineuses mucoliformes. 3/ Accumulations de feuillets. Clichés J.-Y. Bigot et A. Couturaud. *Facies of the ferruginous deposits in the upper zone. 1/ poolfingers in a small ceiling cupola. 2/ mucoliform ferruginous concretion. 3/ Sheet accumulations.*

triangulaires mucoliformes (biofilm décollé du plafond « en forme de muqueuse ») le long des parois hautes surplombantes, accumulation peu compacte en feuillets (photo 6). Ces faciès sont typiques de précipitations ferrugineuses sur support microbien, les filaments suspendus donnent des *poolfingers*, les biofilms décollés des parois donnent des concrétions mucoliformes. Le décrochage et l'accumulation de ces derniers donnent les feuillets.

2. Distribution des minéralisations ferrugineuses selon les conditions hydrologiques

La distribution des minéralisations dépend de leur répartition verticale, à plus ou moins grande profondeur sous la surface piézométrique (figure 4). « En profondeur, la dissolution et le transport s'effectuent en milieux réducteurs. À proximité de la surface piézométrique, et grâce au mélange avec les eaux météoriques oxygénées, l'oxydation et la précipitation sont catalysées par l'activité microbienne, quant à elle contrôlée par les conditions de pH et eH dans les solutions aqueuses » [Onac, 2005].

En zone noyée profonde (ici > 30-25 m), les remontées s'effectuent dans des fissures peu élargies, probablement en système quasiment fermé. L'ouverture par corrosion des fissures est modérée, d'autant que l'espace disponible est partiellement réduit par l'épaississement des éponges ferrugineuses. Dans la zone intermédiaire (20-5 m), le mélange avec les eaux superficielles oxygénées favorise la dissolution de l'encaissant et l'élargissement des fissures, ainsi que les réactions d'oxydation et la précipitation de minéralisations ferrugineuses massives, tout particulièrement dans les coupoles et points hauts. À proximité du toit de la zone noyée, notamment dans les cloches gazeuses, l'oxydation maximale permet le développement microbien qui catalyse la précipitation ferrugineuse

sur les biofilms, donnant des concrétions mucoliformes et des accumulations feuilletées. L'espace disponible pour ces développements microbiens et les accumulations ferrugineuses correspondantes est à l'interface entre le toit calcaire de la cavité et le sommet du remplissage sableux.

En l'absence d'analyses isotopiques, la source de ces amas de fer n'est pas déterminée. Toutefois la pyrite est généralement la source des oxydes-hydroxydes de fer, ce qui est le cas aussi en grotte [Onac, 2005 ; Hill & Forti, 1997].

Figure 4 : Distribution schématique des faciès des minéralisations ferrugineuses selon la profondeur: filon dans les fissures profondes, dépôts massifs dans les premiers vides, dépôts spongieux et mucolites dans les vides du drain entre paroi et remplissage sédimentaire. *Schematic distribution of the ferruginous mineralization facies according to depth: dyke in fractures at depth, massive deposits in the first voids, spongy and mucoliform deposits in the cave voids and between wall and sediment.*

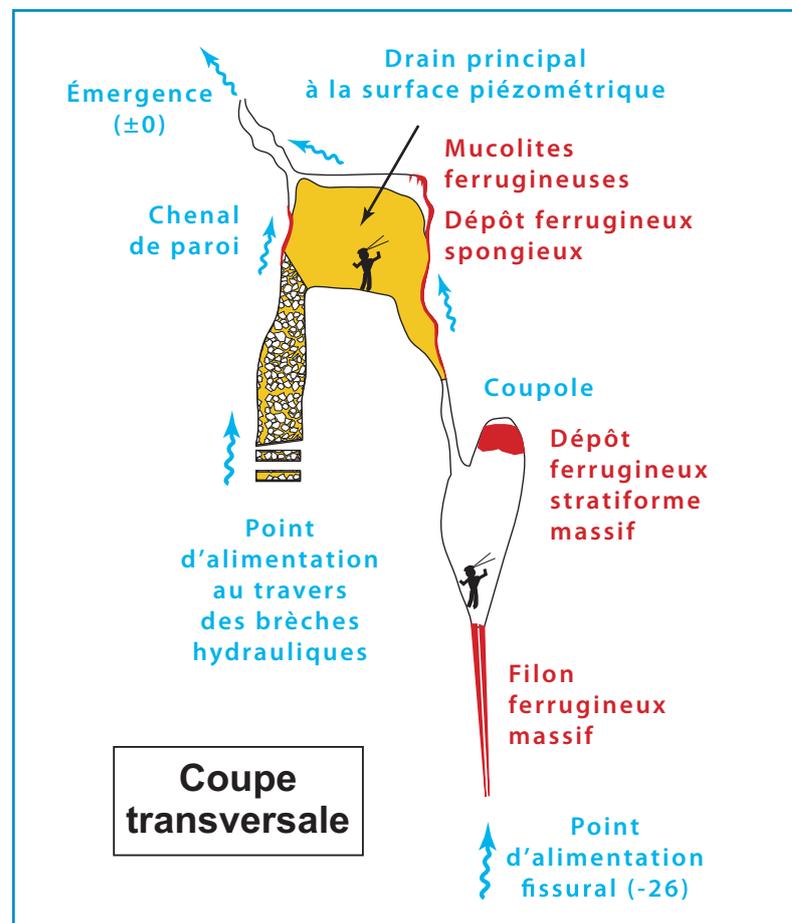




Photo 7 : Accumulation de fer à l'interface du remplissage sableux et de la paroi rocheuse. Le minerai est également concentré dans des vides situés au niveau d'encoches de parois ou dans les coupoles de voûte. La longueur de l'échelle est de 20 cm. Cliché H. Camus.
Ferruginous accumulation between wall and sand filling. The ore is also concentrated in the voids located along wall notches and in ceiling cupolas. Scale is 20 cm long.

B. Les brèches de la salle de la Grande Colonne

Description du site

La salle de la Grande Colonne contient une zone de brèches, orientée N20-40°, également présentes de façon ponctuelle dans toutes les galeries parallèles à cette direction. Plusieurs indicateurs de remontées de flux hypogènes sont identifiés sur les parois et dans les remplissages de ces galeries. Ces indices morpho-sédimentaires sont en relation étroite avec les minéralisations ferro-bactériennes. Ces dernières se concentrent au

Photo 8 : Chenal de paroi alimenté à la base par un feeder, indicateur de flux hypogènes ascendants. Hauteur de la photographie: 2 mètres. Cliché H. Camus.
Wall channel fed at its bottom by a feeder, indicating a rising hypogenic flow. The image is 2 m high.

contact entre les remplissages silico-clastiques et l'encaissant carbonaté, ainsi que dans les vides laissés libres de sédimentation (figure 6). Ces vides sont marqués de morphologies particulières : coupoles en plafond (photo 5), encoches horizontales et chenaux de paroi à développement vertical (photos 7 et 8).

Les différents indices sont en continuité morphologique et sédimentologique. Leur répartition est contrôlée par les circulations des flux hypogènes entre les zones de brèches, le long des chenaux de paroi, jusqu'au débouché dans les coupoles, où les dépôts ferro-bactériens s'amassent en panaches. Le trajet de ces circulations hypogènes est indiqué par des remplissages de sables remaniés qui scellent les éléments de brèches (photo 9), les chenaux de paroi, les encoches, ainsi que des structures verticales identiques se développant au travers des remplissages sableux laminés (photo 10).

Analyse morpho-sédimentaire

La galerie Est, entre la salle des Rudistes et la Grande Colonne, présente l'ensemble des indicateurs morpho-sédimentaires permettant de restituer les sens de circulation des flux hypogènes (figure 5). Les brèches visibles à la base de la galerie présentent un ciment sableux allochtone issu du remaniement des remplissages laminés qui colmatent une grande partie du réseau. Ces brèches sont situées en périphérie de la zone de faille et

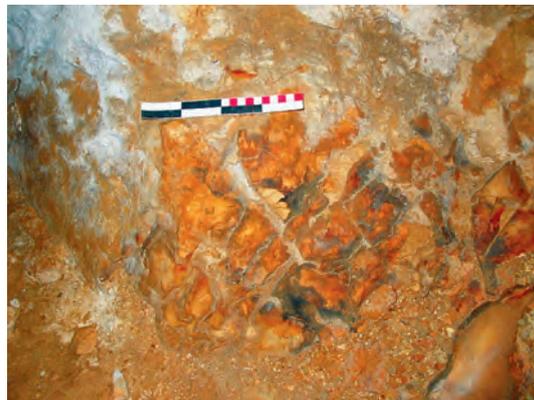


Photo 9 : Brèche hydraulique à ciment sableux. Cliché H. Camus. *Hydraulic breccia with sandy cement.*



Photo 10 : Structure sédimentaire verticale comparable à un chenal recoupant le remplissage sablo-gréseux stratifié. Cliché H. Camus.
Vertical sedimentary structure comparable to a channel cutting into the sandy stratified filling.

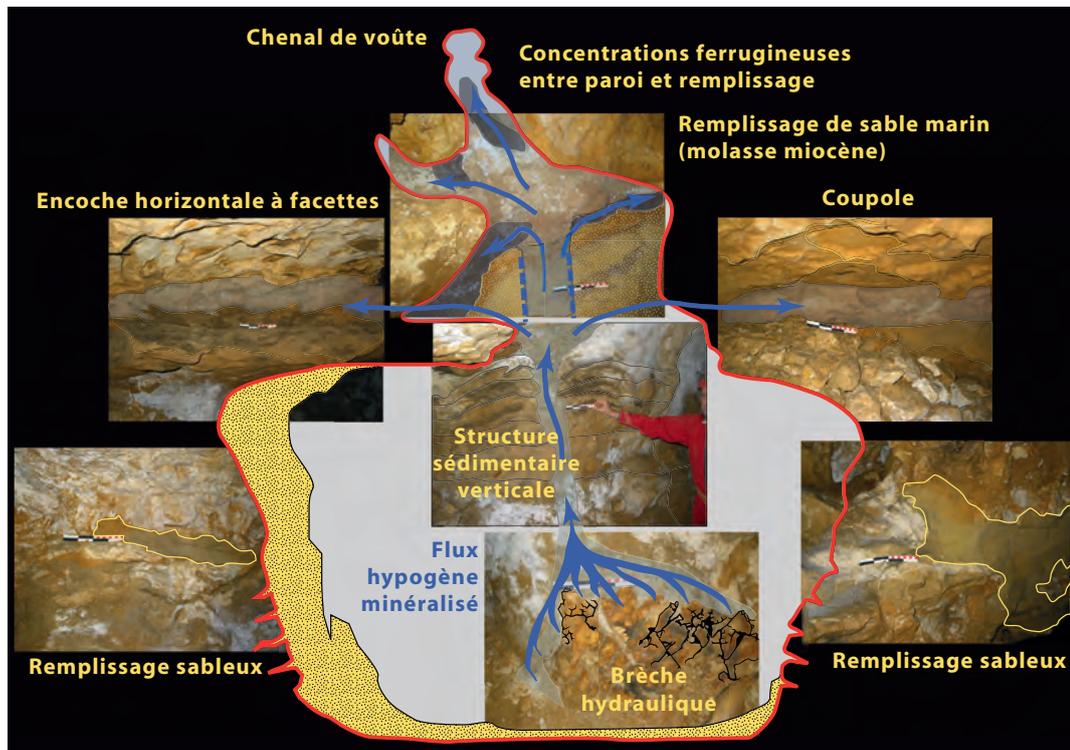


Figure 5 : Relations entre les indicateurs morpho-sédimentaires de la galerie Est et reconstitution des circulations karstiques dans les brèches et dans les remplissages sableux (photos H. Camus). Le flux ascendant se fait au travers de la zone bréchifiée dont il est par ailleurs à l'origine; il diffuse ensuite au travers du remplissage sableux, le fer se dépose enfin dans les vides résiduels entre paroi et remplissage sédimentaire. *Relationships between morpho-sedimentary indicators in the Eastern Gallery and reconstruction of the karstic flow inside the breccias and the sandy filling. The upflow rose across the brecciated zone, which also originated due to this flow; it diffused with simultaneous ferruginous deposition in the residual voids between wall and filling.*

constituent une auréole de propagation de la fracturation sous l'effet des circulations qui empruntent les discontinuités, puis en augmentent la transmissivité pour enfin provoquer leur colmatage. Ces brèches répondent donc à la définition de brèches hydrauliques d'origine karstique (photo 9). Leur ciment allochtone prouve qu'elles correspondent à la mise en place de ces circulations karstiques.

Au-dessus de cette zone de brèches hydrauliques, les sables remaniés colmatent une structure formant un chenal vertical au sein du remplissage sableux qui occupe la galerie (photo 10). Ce remplissage scelle des encoches horizontales qui traduisent la proximité du niveau de base lors du creusement de la galerie. Au-dessus de ce remplissage se développent des formes de creusement en chenaux de voûte et en coupoles, le transport de ces sables et leur dépôt dans cette galerie suggèrent un creusement paragéné-

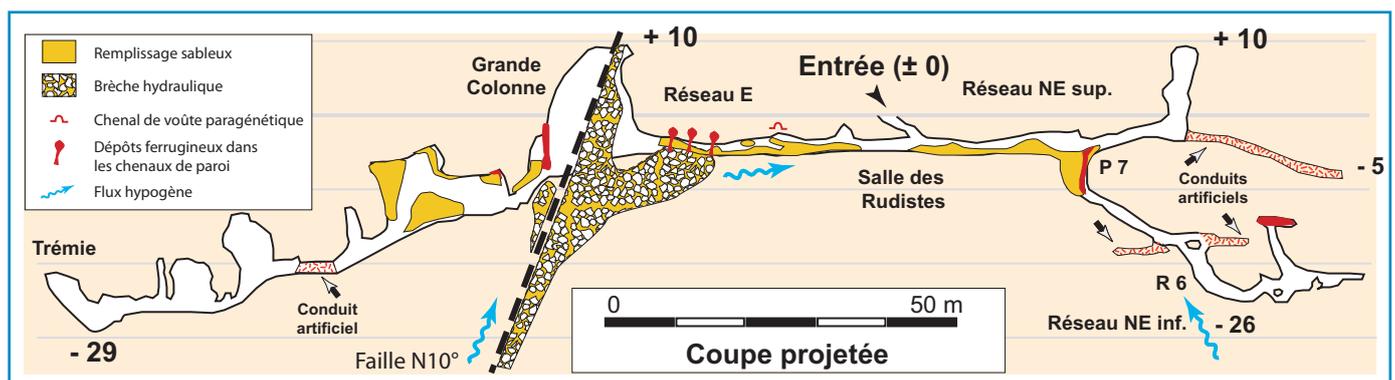
tique. En revanche, au toit des sables laminés, les sables remaniés qui cimentent les brèches hydrauliques et le chenal vertical passent ensuite aux incrustations minéralisées en fer, puis à des panaches concrétionnés ferro-bactériens dans les coupoles: une phase gazeuse dans des coupoles isolées n'est pas exclue pour la mise en place de ces panaches minéralisés.

IV. Discussion

A. Interprétation à l'échelle du réseau de la grotte-mine du Piei

Les contextes transgressifs du Miocène et/ou du Pliocène ont confiné un aquifère karstique préalablement structuré lors des bas niveaux pré-transgressifs du Miocène. En bordure de confinement, l'aquifère localement captif était susceptible d'entretenir des circulations hypogènes minéralisées ascendantes le long des failles délimitant le petit fossé de Lagnes (figure 8), et par voie de

Figure 6 : Distribution des flux hypogènes dans la grotte et répartition des minéralisations ferrugineuses. Les flux remontent le long de zones bréchifiées et de fractures avant de se concentrer dans le drain au niveau du point d'émergence. *Distribution of hypogenic flow and ferruginous ore in the cave. Flow comes up along brecciated zones and fractures and then concentrates in the drain toward the outflow at the entrance.*



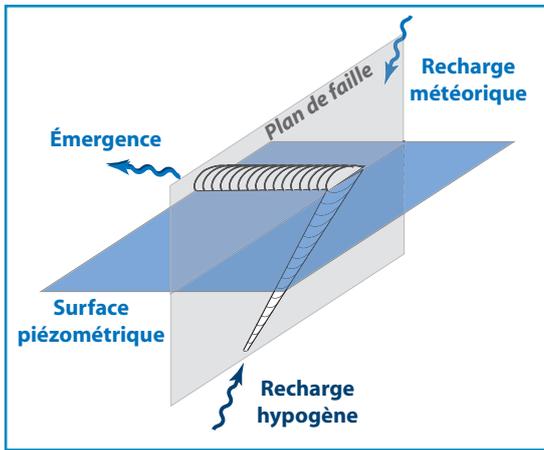


Figure 7 : Spéléogénèse hypogène. Les flux hypogènes remontent le long d'une fracture. Le mélange avec les apports météoriques favorise l'élargissement des conduits par dissolution, et particulièrement d'une galerie à proximité de la surface piézométrique. Les minéralisations ferrugineuses se concentrent dans cette zone active de mélange.

Hypogenic speleogenesis. Hypogenic flow comes up along a fracture. The mixing with meteoric water boosts dissolution and passage widening, especially in passages close to the water table. Ferruginous mineralizations concentrate in this active mixing zone.

Figure 8 : Localisation des flux hypogènes ascendant selon les conditions structurales et paléogéographiques. Les flux hypogènes (flèches bleues) remontent en bordure du petit fossé de Lagnes et se mélangent aux apports météoriques à proximité de la surface piézométrique, impliquant des changements des conditions physico-chimiques et la précipitation du fer.

Distribution of rising hypogenic flows according to the structural and paleogeographic setting. Hypogenic flows (blue arrows) come up along the boundaries of the Lagnes rift and mix with meteoric water close to the water table, producing physical and chemical changes allowing the deposition of ferruginous ore.

conséquence de creuser la grotte-mine du Piei.

Le niveau de galerie du Piei correspond à l'altitude du littoral du Pliocène reconnu localement vers 100-120 m [Gilli & Audra, 2004]; les encoches de corrosion et le plafond paragénétique présents dans la galerie vers 135 m d'altitude suggèrent un fonctionnement à cette époque (figure 8). À proximité, une encoche similaire est visible dans la grotte-mine voisine des Espérelles à 155 m d'altitude, la différence de dénivellation pouvant provenir d'un soulèvement relatif du bloc situé à l'est du fossé de Lagnes. Au Piei, le dépôt ferrugineux concentré à ce niveau atteste quant à lui un contexte noyé peu profond, à proximité de la surface piézométrique, dans la zone propice de mélange des flux hypogènes ascendants et des eaux météoriques [Audra & Hofmann, 2004] (figure 7).

Néanmoins, les cavités à remplissage ferrugineux situées dans un rayon de quelques kilomètres sont toutes situées plus haut, jusqu'à 450 m d'altitude (tableau 1, figure 1). Et au-delà, aux extrémités du plateau de Vaucluse, leur altitude atteint 700 m, voire 1350 m pour la plus éloignée (baume de l'Or). Ces altitudes au-dessus du niveau de base pliocène attestent des phénomènes hypogènes assurément plus anciens. Par ailleurs, les remplissages de sables burdigaliens, présents dans les grottes-mines du Piei et du Chat suggèrent que ces cavités étaient soit déjà présentes lors de la transgression burdigalienne, soit que les sables y aient été injectés

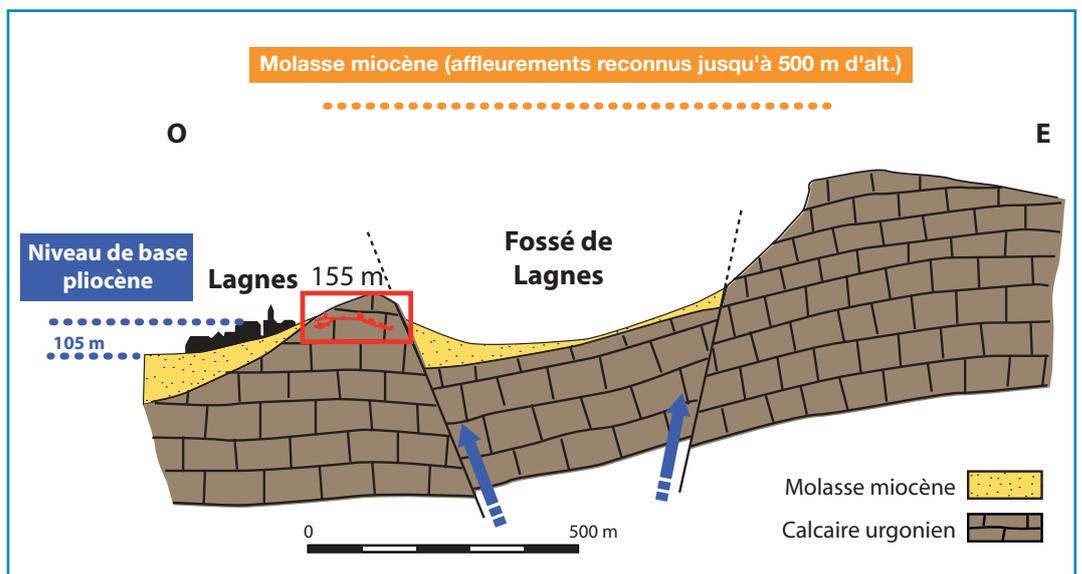
lors d'une phase ultérieure d'érosion des couvertures. En effet, les oscillations eustatiques associées à des surrections importantes au Miocène, attestées par des vallées incisées puis fossilisées (7 oscillations identifiées du Burdigalien au Tortonien) [Besson, 2005], pourraient aussi expliquer le creusement du niveau de grotte du Piei, ainsi que le confinement d'un aquifère captif susceptible d'entretenir des circulations hypogènes minéralisées.

Dans l'attente d'éléments chronologiques plus précis, nous pouvons retenir que la grotte-mine du Piei pourrait s'être mise en place au début du Miocène, qu'elle a été remplie de sable lors de la transgression burdigalienne, que l'activité hypogène est probablement contemporaine du confinement lié à cette transgression. Les morphologies paragénétiques en concordance avec le niveau de base pliocène montrent que la cavité aurait encore été active à cette période, soit par un maintien des remontées hypogènes, soit par des écoulements météoriques.

B. Interprétation du fonctionnement hypogène en relation avec la paléogéographie du plateau de Vaucluse

Les cavités hypogènes à minéralisation ferrugineuse du plateau de Vaucluse se localisent en périphérie, sur les failles majeures, et à des altitudes croissantes en s'éloignant du coin SO, point bas du massif vers où converge le drainage actuel. Du fait de leur fonctionnement à proximité du niveau de base, on établit les déductions suivantes :

1/ compte tenu du gradient topographique s'abaissant vers le SO, les cavités éloignées vers le N ou vers l'E se situent à des altitudes plus élevées que leur équivalent contemporain localisé au coin SO. Comme



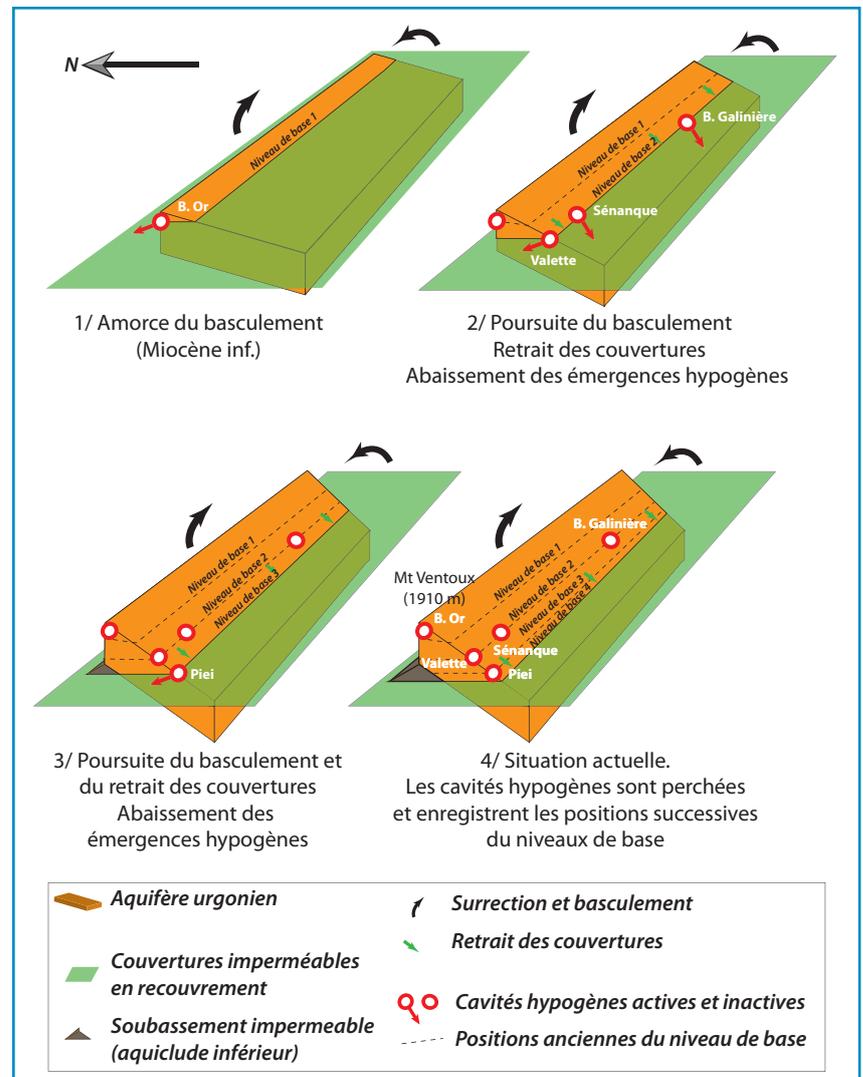
l'unification en un seul bassin dépendant de la fontaine de Vaucluse ne date probablement que du Messinien, il est difficile d'établir les relations chronologiques entre deux cavités distantes, qui peuvent être contemporaines ou d'âge différent et qui ont pu évoluer en contextes différents du point de vue de leur bassin, de leur émergence, et de la position de leur niveau de base respectif ;

2/ toutefois, sur un secteur donné, plus leur altitude est élevée, plus elles sont anciennes; cette considération, basée sur la tendance de surrection, est toutefois à manier avec précaution, du fait des niveaux variables atteints par les transgressions du Miocène ayant pu être à l'origine de remontées de niveau de base ;

3/ leur fonctionnement à proximité du niveau de base les localise approximativement à la limite topographique de l'aquifère et de sa couverture, ou tout au moins sous un faible recouvrement pouvant être franchi par les flux hypogènes à la faveur de failles [Audra et al., 2010] ; elles enregistrent par conséquent non seulement la proximité du niveau de base de l'époque, mais également la limite d'affleurement contemporaine des couvertures. L'évolution tectonique du plateau depuis le Miocène consiste en une surrection et un basculement du bloc de Vaucluse sous l'effet du serrage N-S puis E-O [Champion et al., 2000 ; Le Pichon et al., 2010]. On estime par conséquent que la surrection a d'abord affecté la crête Ventoux-Lure et s'est ensuite propagée vers le sud avec le retrait par érosion des couvertures (figure 9). Chaque stade correspondant à une pause de la surrection, avec une stabilisation du niveau de base et du retrait correspondant des couvertures, est enregistré par la présence de cavités hypogènes à minéralisation ferrugineuse. La succession de ces phases n'est toutefois pas précisément définie du point de vue chronologique.

Conclusion

La grotte-mine du Piei doit son origine à des remontées hypogènes, focalisées le long de la faille de Salon-Cavaillon, à la limite du recouvrement de l'aquifère urgonien. Les eaux profondes, peu oxygénées et véhiculant du fer, remontent le long de failles et de brèches hydrauliques karstifiées. À proximité de la surface piézométrique, le mélange avec les eaux météoriques favorise le développement des conduits karstiques et le dépôt du fer. L'intervention de l'activité microbienne est attestée par les faciès ferruginisés de poolfin-



gers et concrétions mucoliformes présents dans la partie supérieure la plus oxygénée. L'époque d'activité hypogène, attribuée au Néogène, reste à préciser, entre les différentes périodes du Miocène et/ou du Pliocène.

Plus généralement, en s'appuyant sur les autres sites en périphérie du plateau de Vaucluse, on précise leur localisation, dépendant des flux hypogènes focalisés systématiquement à l'intersection de failles importantes et des limites de recouvrement de l'aquifère. Ces conditions d'occurrence sont par ailleurs un guide pour la recherche de nouveaux sites hypogènes. L'identification de ces cavités hypogènes, ayant enregistré la position du niveau de base et les limites de recouvrement de l'aquifère contemporains de leur phase d'activité, est un élément capital, d'une part pour la caractérisation des reconstitutions paléogéographiques, et d'autre part pour la quantification des rythmes de soulèvement.

Les modalités de datation de ces cavités hypogènes sont en cours d'investigation. Par ailleurs, une étude plus détaillée des minéralisations et du rôle microbien permettrait de mieux caractériser l'environnement

Figure 9 : Modèle conceptuel de la localisation des cavités hypogènes à minéralisation ferrugineuse, en fonction de la surrection et du basculement du bloc du plateau de Vaucluse depuis le Miocène. Les cavités hypogènes se localisent à l'intersection topographique entre l'aquifère calcaire et la couverture. Elles enregistrent les positions successives du niveau de base et les limites d'affleurement des couvertures en cours de retrait. Depuis le Miocène, leur localisation tend à s'abaisser et à glisser vers le SO, point bas du plateau.

Conceptual model of hypogenic caves harboring ferruginous ores, according to the uplifting and tilting of the Vaucluse block since the Miocene. The hypogenic caves are located at the topographic intersection between the karst aquifer and its cover. The caves record the successive positions of the base level and the boundaries of cover outcrops which retreat continuously. Since the Miocene, the cave location tends to lower and to shift toward the SW, the lowest point of the plateau.

physico-chimique et minéral, les conditions de spéléogénèse, et le rôle de l'activité microbienne, simple hôte opportuniste ou catalyseur des processus ?

Enfin, la grotte-mine du Piei représente également un élément fort du patrimoine minier proto-industriel, intégré dans la tradition métallurgique

régionale. Cette exploitation minière compte de nombreux sites en cavités karstiques, la grotte-mine du Piei étant assurément la plus significative, par la taille des conduits révélés par l'extraction, par la nature des minéralisations encore présentes et par les vestiges des techniques artisanales bien visibles.

Remerciements

L. Bruxelles, pour la construction de la visualisation 3D du bloc géologique de Vaucluse. A. Couturaud, pour avoir porté à notre connaissance cette cavité d'intérêt, pour le travail commun de terrain, et pour ses remarques pointues sur le texte.

J.-L. Guendon, pour sa relecture détaillée du manuscrit.

Bibliographie

- A. A., 1833** - *Cahier des charges relatif à la concession des mines de fer de Lagnes (12 juin 1833)*. A. D. Vaucluse, série 8523 (« Mines de fer »), pièce non numérotée.
- AUDRA P., 2007** - Karst et spéléogénèse épigènes, hypogènes, recherches appliquées et valorisation. 278 p. Habilitation à diriger des recherches. Université de Nice Sophia-Antipolis.
- AUDRA P. & BIGOT J.-Y., 2013** - Rare sulfate minerals (fibroferrite) and hypogene sulfuric speleogenesis in Baume Galinière Cave (Alpes-de-Haute-Provence, France). *8th IAG - International Conference on Geomorphology, Paris 2013* [Accepté].
- AUDRA P. & HOFMANN B. A., 2004** - Les cavités hypogènes associées aux dépôts de sulfures métalliques (MVT). *Le Grotte d'Italia*. n° 5, p. 35-56.
- AUDRA P., MOCOCHAIN L., CAMUS H., GILLI É., CLAUZON G. & BIGOT J.-Y., 2004** - The effect of the Messinian Deep Stage on karst development around the French Mediterranean. *Geodinamica Acta*, vol. 17, n° 6, p. 27-38.
- AUDRA P., BIGOT J.-Y. & NOBÉCOURT J.-C., 2010** - Hypogenic caves in France. Speleogenesis and morphology of the cave systems. *Bulletin de la Société géologique de France*, t. 181, n° 4, p. 327-335.
- BESSON D., 2005** - *Architecture du bassin rhodano-provençal miocène (Alpes, SE France). Relations entre déformation, physiographie et sédimentation dans un bassin molassique d'avant-pays*. 357 p. Thèse, École des Mines, Paris.
- BESSON D., PARIZE O., RUBINO J.-L., AGUILAR J.-P., AUBRY M.-P., BEAUDOIN B., BERGGREN W. A., CLAUZON G., CRUMEYROLLE P., DEXCOTÉ Y., FIET N., IACCARINO J., JIMÉNEZ-MORENO G., LAPORTE GALAA C., MICHAUX J., SALIS K. VON, SUC J.-P., REYNAUD J.-Y. & WERNLI R., 2005a** - Un réseau fluvial d'âge Burdigalien terminal dans le Sud-Est de la France : remplissage, extension, âge, implications. *C. R. Geoscience*, n° 337, p. 1045-1054. Académie des Sciences, Paris & Elsevier.
- BESSON D., BORGOVINI R., CONESA G., CORNÉE J.-J., DEMORY F., DEXCOTÉ Y., DUVAIL C., GALLON F., LE STRAT P., MÜNCH P., OUDET J., PARIZE O., REYNAUD J.-Y. & RUBINO J.-L., 2005b** - Les systèmes oligo-miocènes carbonatés et clastiques de Basse-Provence. Des témoins de l'évolution géodynamiques de la marge provençale et du bassin d'avant-pays alpin. *Livret-guide d'excursion commune ASF - GDR « Marges Golfe du Lion »*.
- BLAVOUX B., 2010** - Le karst de la fontaine de Vaucluse. In: Audra Ph. (éd.), *Grottes et karsts de France*. *Karstologia Mémoires*, n° 19, p. 232-233. Association française de karstologie.
- BOTTRELL S., 2004** - Sulfide minerals in karst. In: Gunn J. (éd.) - *Encyclopedia of Caves and Karst Science*, p. 713-714. Fitzroy Dearborn, Londres.
- BUFFARD R., 1993** - Les gisements de fer de la région de Kisanga (Shaba méridional, Zaïre), colmatés d'un paléokarst du Protérozoïque supérieur. *Karstologia*, n° 21, p. 51-55.
- CHAMPION C., CHOUKROUNE P. & CLAUZON G., 2000** - La déformation post Miocène en Provence occidentale. *Geodinamica Acta*, vol. 13, p. 67-85.
- COUTURAUD A., 1992** - Les cavités du Comtat venaisien (Vaucluse). *Spelunca*, n° 45, p. 25-32.
- COUTURAUD A., 1993** - *Hydrogéologie de la partie occidentale du système karstique de Vaucluse (karstification et aquifère sous couverture)*. 161 p. Thèse, Université d'Avignon.
- DE WAELE J. & NASEDDU A., 2005** - Le grotte di Miniera. Tra economica mineraria ed economica turistica. *Memorie dell'Istituto Italiano di Speleologia*, Bologna, S. II, vol. XVII (Convegno « Le grotte di miniera », Monteposi 2004), 200 p.
- DZUNLYŃSKI S. & SASS-GUTKIEWICZ M., 1989** - Pb-Zn ores. In: Bosák P., Ford D.C., Glazek J. & Horáček J. (éd.) - *Paleokarst: a systematic and regional review*, p. 377-397. Elsevier, Amsterdam & New York.
- FILIPPOV A.G., 2004** - Mineral deposits in karst. In: Gunn J. (Ed.) - *Encyclopedia of Caves and Karst Science*, p. 514-515. Fitzroy Dearborn, Londres.
- FORD D.C., 2006** - Karst geomorphology, caves and cave deposits: A review of North American contributions during the past half century. In: R.S. HARMON & C.W. WICKS, Eds. - *Perspectives on karst geomorphology, hydrology and geochemistry*. *GSA Spec. Paper*, Boulder, Colorado, p. 1-14.
- FORTI P., 2005** - L'importanza scientifica delle « grotte di miniera ». *Memorie dell'Istituto Italiano di Speleologia*, Serie II, vol. XVII (Convegno « Le grotte di miniera », Monteposi 2004), p. 15-22.
- GAUBERT G. & LEFALHER B., 1995** - *Les arcanes de Vaucluse, Hydrologie et spéléologie des territoires alimentant en eau la fontaine de Vaucluse*, AREHPA, t. 2, 338 p.
- GAUCHON C., 1991** - Mise en valeur et exploitation traditionnelles des ressources du karst souterrain dans le Sud-Est de la France. *Karstologia*, n° 17, p. 11-18.
- GAUCHON C., 1997** - Des cavernes et des hommes. *Karstologia Mémoires*, n° 7, 248 p.
- GILLI É. & AUDRA P., 2004** - Les lithophages pliocènes de la fontaine de Vaucluse (Vaucluse, France). Un argument pour une phase messinienne dans la genèse du plus grand karst noyé de France. *C. R. Geosciences*, t. 336, n° 16, p. 1481-1489.
- GRAS S., 1862** - *Description géologique du département de Vaucluse*. Paris, Savy, 438 p.
- GUIGNARD P., BELLIER O. & CHARDON D., 2005** - Geometry and post-Oligocene kinematics of the Aix and Moyenne Durance faults (Provence, France). *Comptes Rendus Geoscience*, Vol. 337, n° 3, p. 375-384.
- GUIGUE J. & GIRARD J., 1949** - *La Fontaine de Vaucluse*. Avignon, Rullière frères, 157 p.,
- HILL C., 2000** - Overview of the geologic history of cave development in the Guadalupe Mountains, New Mexico. *Journal of Cave and Karst Studies*, vol. 62, n° 2, p. 60-71. National Speleological Society, Huntsville.
- HILL C. & FORTI P., 1997** - *Cave mineral of the world*, 464 p. National Speleological Society, Huntsville.
- LE PICHON X., RANGIN C., HAMON Y., LOGET N., YING LIN J., ANDREANI L. & FLOTTE N., 2010** - Geodynamics of the France Southeast Basin. *Bulletin de la Société géologique de France*, vol. 181, n° 6, p. 477-501.
- LOCCI J.-P., 1988** - *Fonderies et fondeurs, histoire des établissements métallurgiques aux XIX^e-XX^e siècles*, 238 p. Assoc. pour la sauvegarde et la promotion du patrimoine industriel en Vaucluse, Avignon.
- LOWE D.J., 2000** - Role of speleogenesis in the development of hydrocarbon and mineral deposits. In: Klimchouk A., Ford D. C., Palmer A. N. & Dreybrodt W. (éd.) - *Speleogenesis. Evolution of karst aquifers*, p. 473-480. National Speleological Society, Huntsville.
- MARTEL P., 1951** - Les gorges du Calavon à Oppedette (Basses-Alpes). *Annales des Basses-Alpes*, t. XXXII, n° 187, p. 21-28. Société scientifique et littéraire des Alpes-de-Haute-Provence, Digne.
- MOCOCHAIN L., AUDRA P. & BIGOT J.-Y., 2011** - Base level rise and Per Ascensum Model of Speleogenesis (PAMS). Interpretation of deep phreatic karsts, vaucluse springs and chimney-shafts. *Bulletin de la Société géologique de France*, vol. 182, n° x, p. 87-93.
- MORIN D., ROSENTHAL P. & FAIVRE A., 1997** - *Mines et métallurgie du fer de Provence et des Alpes du Sud. Étude diachronique des vestiges d'exploitation minière et de métallurgie du fer en PACA. Document final de synthèse*, 140 p. Projet collectif de recherches. Vaucluse; Série Histoire des techniques, Service Régional de l'Archéologie - PNR Lubéron - ERMINA.
- ONAC B. P., 2005** - *Minerals*. In: Culver D & White W.B. (eds.) - *Encyclopedia of Caves*, p. 371-378. Academic Press, New York.
- Parein R. & languille A., 1981 - La Haute-Provence souterraine, 422 p. Auto-édit.
- PARIZE O., RUBINO J.-L. & JAVAUX C., 1997** - Architecture et géométrie des corps tidaux bioclastiques comblant les paléovallées miocènes au sud-est du bassin de Carpentras. *Publ. ASF*, n° 27 (6^e Congrès ASF, Montpellier), p. 215-216.
- SAURET B. & TERRIER M., 1990** - Place de la néotectonique dans l'évaluation de l'aléa sismique : exemple de la Provence (France). *Géologie Alpine*, Mémoire hors-série n° 15 (Risques naturels dans le Sud-Est de la France - Colloque Association des géologues du Sud-Est, Avignon 1989).
- SHARP J.M. JR. & KYLE J.R., 1988** - The role of ground-water processes in the formation of ore deposits. In: Back W., Rosenshein J.S. & Seaber P.R. (Eds.) - *Hydrogeology. The Geology of North America*, v. O-2, p. 461-483. Geological Society of America, Boulder, Colorado.
- VILLENEUVE H. de, 1833** - *Rapport sur la demande en permission d'un haut fourneau à Velleron (30 mai 1833)*. Archives nationales, dossier F14/4489.
- VILLENEUVE H. de, 1834** - *Rapport de l'ingénieur des Mines (22 mai 1834)*. A. D. Vaucluse, série 8523 (« Mines de fer »), pièce non numérotée.