

**HYPOGENIC SPELEOGENESIS WITH FERRUGINOUS ORE.
THE PIEI MINE-CAVE (LAGNES, VAUCLUSE, FRANCE)
SPELEOGENESI IPOGENICA IN UN GIACIMENTO DI FERRO.
LA GROTTA MINIERA DI PIEI
(LAGNES, VAUCLUSE, FRANCIA)**

PHILIPPE AUDRA¹, JEAN-YVES BIGOT², HUBERT CAMUS³,
CHRISTOPHE GAUCHON⁴ & MICHEL WIENIN⁵

Abstract

The Piei mine-cave (Lagnes, Vaucluse, France) locates at the contact of the Vaucluse Mounts and the Carpentras basin, close to the Fontaine de Vaucluse spring. It develops in Cretaceous limestone (Urgonian facies), close to a main regional lineament, the Salon-Cavaillon fault. The cave was mined in the XIXth Century, giving access to passages previously filled with diverse neogene sands and massive iron crusts. The exploitation mainly followed the natural passages. The origin of the cave is related to hypogenic flow rising from deep fissures or hydraulic breccias, with ferruginous deposition at the contact or on top of the neogene sands filling. Microbial activity was present during the cave activity, associated to the ferruginous deposits. This cave probably corresponds to the Neogene period, when the Vaucluse plateau was uplifted. The Piei mine-cave record the position of the corresponding base level and thus the progressive tilting of the massive, together with a range of similar caves located around the western edge of the Vaucluse Plateau

Keywords: iron ore, karst, speleogenesis, hypogenic caves.

Riassunto

La grotta di miniera di Piei (Lagnes, Vaucluse, Francia), si trova al contatto tra le montagne della Vaucluse e la piana di Carpentras, vicino alla Fontana di Vaucluse. La grotta si è sviluppata nel calcare Cretaceo (facies Urgoniana) ed è vicina a un'importante faglia regionale. Le attività di estrazione all'interno della grotta cominciarono al principio del XIX secolo, aprendo varchi precedentemente riempiti da sabbie neogeniche e incrostazioni di ferro. Lo sfruttamento seguì principalmente i passaggi naturali. L'origine della grotta è collegata al flusso ipogenico proveniente dalle profonde fenditure o brecce idrauliche che permisero il deposito di ferro nel contatto o in cima alle sabbie neogeniche. L'attività microbica era presente durante il periodo di attività della grotta per via della sedimentazione del ferro. Questa attività probabilmente risale al Miocene, quando il plateau della Vaucluse si sollevò. La grotta registra la posizione del livello di base corrispondente, così come la progressiva inclinazione del massiccio, insieme a una gamma di grotte simili situate intorno all'estremità occidentale del plateau della Vaucluse.

Parole chiave: giacimenti di ferro, carsismo, speleogenesi, grotte ipogeniche.

¹ Polytech'Nice – Sophia & I'City (IMREDD), Université de Nice - Sophia Antipolis, 930 route des Colles, 06903 Sophia-Antipolis, France, audra@unice.fr

² Association française de karstologie (AFK), 21 rue des Hospices, 34090 Montpellier, France, catherine.arnoux@club-internet.fr

³ CENOTE, 1 chemin de Valdegour, 30900 Nîmes, France, camus.hubert@laposte.net

⁴ EDYTEM, Université de Savoie, Bâtiment « Pôle Montagne », Campus scientifique, 73376 Le Bourget-du-Lac cedex, France christophe.gauchon@univ-savoie.fr

⁵ Association française de karstologie (AFK), Société cévenole de spéléologie et de préhistoire (SCSP), Grand-rue, 30360 Vézènobres, France, michel@wienin.com

Introduction

Mine caves are karst caves or vugs intersected by mining activity. Their filling has often been partly or entirely cleaned away for its economical value. As a consequence, the mining activity has given access to natural caves previously not accessible. Such mine caves have peculiar characteristics owe to the presence of uncommon mineralizations (FORTI, 2005), which in turn are induced by a specific speleogenesis, often hypogenic, i.e. originating from deep rising water not indirectly connected to meteoric recharge (FORD, 2006). Moreover, they harbor traces of old, historic or protohistoric, exploitations. And sometimes they can be reinserted into a new economical cycle through a touristic valorization (DE WAELE & NASEDDU, 2005).

Regarding the source of minerals, the deposits are divided in: 1/ autochthonous deposits originating from the host rock; 2/ allochthonous deposits brought from outside; and 3/ parautochthonous deposits which are foreign to the host rock but the same as their close surrounding (FILIPPOV, 2004). Autochthonous deposits can be related to interstratal deposits, such as French and Luxembourg Aalenian "Minette". Allochthonous deposits are found in ferruginous crusts or *cuirasses*. Erosional processes may have fed karst depression fillings, where later concentration processes may have led to large economical deposits (BUFFARD, 1993). Ore deposits can also fall into the following categories according to their genesis: 1/ syngenetic deposits having formed during the limestone deposition and 2/ epigenetic deposits having formed after limestone lithification, often called "hydrothermal deposits". Most of this last category also falls in the parautochthonous category. Fluid inclusions of associated minerals have shown that most of these ores originated from low-temperature hydrothermal solutions (ONAC, 2005). This last category is often in close relationship to pre-existing or contemporaneous karst voids. Accordingly, *limestone provides a host for deposits in [...] fractures as replacement deposits – where limestone has been dissolved by the ore-forming fluids and the porosity refilled – and as deposits in pre-existing karstic porosity* (BOTTRELL, 2004), i.e., caves can predate or can develop simulta-

Introduction

Le Grotte miniera sono cavità o fratture carsiche intercettate da attività minerarie. I loro riempimenti sono stati frequentemente in parte o totalmente asportati per il loro valore economico. Pertanto, l'attività mineraria ha permesso l'accesso a cavità naturali di cui prima era impossibile l'accesso. Tali grotte-miniera hanno caratteristiche peculiari a causa della presenza di mineralizzazioni non comuni (FORTI, 2005), che a loro volta sono state generate da meccanismi speleogenetici speciali, spesso ipogenici, cioè generati dalla risalita di acque profonde non direttamente connesse alla ricarica da parte delle acque meteoriche (FORD, 2006). Inoltre spesso ospitano tracce degli antichi metodi di estrazione, storica o addirittura preistorica. Pertanto talvolta possono dare luogo ad un nuovo ciclo economico attraverso la loro valorizzazione turistica (DE WAELE & NASEDDU, 2005).

I minerali ospitati possono avere differenti origini: 1/ autoctona, con i depositi che si sono formati direttamente dalla roccia incassante; 2/ alloctona per cui i depositi in grotta si sono originati per trasporto del materiale dall'esterno; e 3/ parautoctona con depositi di materiale estraneo alla roccia incassante ma proveniente da zone molto prossime (FILIPPOV, 2004). Quelli autoctoni possono essere correlabili a depositi di interstrato, come per esempio, la "Minette" aaleniana di Francia e Lussemburgo. Tipici depositi alloctoni sono rappresentati dalle croste e dai filoni di ossidi/idrossidi di ferro. Processi erosivi possono aver dato luogo a depositi in depressioni, dove successivamente processi di concentrazione possono aver portato allo sviluppo di grandi depositi di interesse economico (BUFFARD, 1993). I depositi minerari possono essere anche suddivisi dal punto di vista genetico nelle seguenti categorie: 1/ depositi singenetici formati contemporaneamente alla deposizione del calcare e 2/ depositi epigenetici, formati dopo la litificazione del calcare, spesso chiamati "depositi idrotermali". La grande maggioranza di questi ultimi fa parte anche della categoria parautoctona. Le inclusioni fluide dei minerali che costituiscono questi depositi, infatti, spesso mostrano come questi si siano formati da soluzioni idrotermali di bassa temperatura (ONAC, 2005). Quest'ultima cate-

neously to the ore deposition. Such “hydrothermal” processes of simultaneous karst development and ore-(re)filling gave origin to some of the largest economical Pb-Zn ore deposits in the world, the Mississippi Valley Type (MVT) ore deposits. The “karstic porosity”, consisting in enlarged fractures, breccia pipes, empty or sediment-filled conduits, acted as preferential routes for mineralizing fluid migrations (DZUNLYŃSKI & SASS-GUTKIEWICZ, 1989). Eventually, the mixing of solutions, especially with meteoric water, and the contact with limestone changes eH/pH conditions of fluids carrying dissolved metals resulting in mineral deposition (BOTRELL, 2004). Most of these deposits occurred in deep-seated karst as sulfide metals in reduced environment; they eventually reoxidized in shallower groundwater following progressive exhumation such as in the Guadalupe Mountains (HILL, 2000). Less commonly, deposition directly occurred as oxidized ore close to the level of fluctuation of the regional water table, such as in the Forest of Dean, UK (LOWE, 2000).

In addition to the Fontaine de Vaucluse, the Vaucluse Plateau is mainly known for its deep shafts, locally called “*avens*”. Vaucluse karst is mainly characterized by its deep phreatic (“*vauclusian*”) systems, mainly developed as a consequence of the Messinian Salinity Crisis (AUDRA *et alii.*, 2004). However, hypogenic or mineralized caves remained poorly known up to now. The Piei mine cave harbors a parautochthonous epigenetic ferruginous ore deposited by hypogenic flow close to the boundary between the karst aquifer and its upper confinement. It has been mined during the XIXth century for its ferruginous mineralizations. The Piei mine cave appears to be a hypogenic cave, a paleokarst, an important site with mineralization containing traces of microbial activity related to the mineral deposition, a record of the geomorphic evolution and tectonic activity, and a witness of the proto-industrial mining activity. This first speleokarstic study presents the topographic and structural setting, and the paleogeographical evolution. Together, they are at the origin of hypogenic flows that produced ferruginous mineralizations in numerous hypogenic caves located on the periphery of the Vaucluse Plateau. In

goria è poi spesso in stretta correlazione con pre-esistenti o contemporanei vuoti carsici. Pertanto, il calcare fornisce aree per ospitare i depositi minerali in [...] fratture come depositi di sostituzione – dove il calcare è stato sciolto dai fluidi che hanno indotto la formazione dei depositi stessi e la sua porosità è stato successivamente riempita – e come depositi in preesistenti porosità carsiche (BOTRELL, 2004), cioè, le grotte possono essere più antiche o possono anche svilupparsi simultaneamente ai depositi minerali. Tali processi “idrotermali” di sviluppo simultaneo del carsismo e di riempimento di giacimenti minerari hanno dato origine ad alcuni dei più grandi giacimenti al mondo di Pb-Zn, i cosiddetti depositi di tipo Mississippi Valley (MVT). La “porosità carsica” che è formata da fratture allargate, ammassi brecciate o condotti riempiti di sedimenti, agisce come via preferenziale per la migrazione dei fluidi mineralizzanti (DZUNLYŃSKI & SASS-GUTKIEWICZ, 1989). Infine, la miscelazione delle soluzioni, soprattutto con l’acqua meteorica, ed il contatto con i calcari cambia il rapporto eH/pH dei fluidi che trasportano i metalli in soluzione causando così la deposizione dei minerali (BOTRELL, 2004). La maggior parte di questi depositi si sono formati in carsi profondi con sviluppo di solfuri metallici in ambiente riducente; alla fine questi depositi si possono essere riossidati in acquiferi più superficiali a seguito della progressiva esumazione delle formazioni come è successo nelle Guadalupe Mountains (HILL, 2000). Più raramente la deposizione è avvenuta direttamente come depositi di ossidati vicino al livello di oscillazione della piezometrica locale, come nella Foresta di Dean, Gran Bretagna (LOWE, 2000).

*Oltre che per la Fontana di Vaucluse, l’altopiano omonimo è conosciuto essenzialmente per i profondi pozzi, localmente “avens”. Il karst di Vaucluse è essenzialmente caratterizzato da i suoi profondi sistemi freatici (“vauclusiani”), sviluppatisi a seguito della crisi di salinità Messiniana (AUDRA *et alii.*, 2004). Tuttavia, le grotte ipogeniche o mineralizzate sono rimaste assolutamente poco conosciute fino ad ora. La Grotta-miniera di Piei ospita un deposito ferroso epigenetico e parautoctono formatosi per il flusso di acque profonde vicino al confine tra l’acquifero carsico e il suo confinamento*

1830, the mining activity connected to the traditional local metallurgy, resulted in the emptying of about 300 m of large cave passages.

In this study, we neither investigated the source of the mineral, their dissolution processes, the transport by migrating fluids, nor the trapping of the minerals in response to physical and chemical changes (SHARP & KYLE, 1988). This preliminary investigation focuses on the final stage, the ore deposition conditions, which are revealed from the study of the mine cave morphology, from the mineralization facies, and from the identification of hypogenic flows fed by deep slots and breccia pipes. The study allows establishing the characteristics of the cave dynamics, of the karst development and mineralization processes, and of the corresponding paleogeographical setting. The ferruginous caves of the Vaucluse plateau allow opening the investigation to the characterization of the rates of uplifting and of the paleogeographical evolution since the Miocene.

Hydrogeologic setting and origin of hypogenic flow

Topographic and structural setting

The Piei mine cave opens in the Lagnes old village, at 140 m asl., near the top of a small limestone hill, about 50 m above the Carpentras Plain (fig. 1). Its name comes from *puech* in Occitan language, *puèi* or *piè* in Rhodanian Provençal, *podium* in Latine, which corresponds to a hill with a frequent defensive function. The hill of the Lagnes village locates 2 km to the south of the famous Fontaine de Vaucluse, at the SW corner of the Vaucluse Plateau. This plateau then rises to the north, up to the Mont Ventoux, its highest point at 1909 m asl.

The Vaucluse Plateau is a large undulated slab, with an E-W structure. It is constituted by the Lower Cretaceous limestones of Urgonian facies, with a thickness of 700 to 1000 m. This undulated plateau reaches its height to the North along the Ventoux-Lure crest that forms a north-facing barrier at 1500-1900 m asl. It lowers to the South in the central part of the Plateau d'Albion at 700-1000 m asl., rises again at the Monts of Vaucluse, then abruptly plunges towards the syncline trough of the Apt Basin, and eventually rises to the South at the anti-

superiore. La grotta e il suo deposito ferroso sono stati oggetto di coltivazione mineraria durante il XIX secolo. La Grotta-miniera di Piei è non solo una grotta ipogenica, un paleokarst con importanti mineralizzazioni che contengono tracce di attività microbica correlate alla deposizione del minerale, ma anche un luogo in cui si è registrata l'evoluzione geomorfologica e tettonica dell'area e infine anche un museo dell'attività mineraria proto-industriale. Questo primo studio speleo-carsico presenta la condizione topografica e strutturale e l'evoluzione paleogeografica di questa cavità. Evoluzioni che hanno determinato i flussi ipogenici che hanno dato luogo alle mineralizzazioni ferruginose in molte grotte ipogeniche che si trovano alla periferia dell'altopiano di Vaucluse. Nel 1830, l'attività mineraria connessa alla locale tradizionale metallurgia ha svuotato circa 300 metri di grandi ambienti di grotta.

In questo studio noi non ci occuperemo né dell'origine del minerale, dei suoi processi dissolutivi e del meccanismo del suo trasporto da parte dei fluidi in movimento, né dell'intrappolamento dei minerali a seguito di variazioni chimico-fisiche (SHARP & KYLE, 1988). Questo studio preliminare infatti si focalizza sullo stadio finale, le condizioni di deposizione del giacimento, che si ricavano dallo studio della morfologia della grotta-miniera, dalle facies della mineralizzazione stessa, e dall'identificazione dei flussi ipogenici alimentati dalle profonde fratture e breccie. Questo studio ha permesso di definire le caratteristiche della dinamica in grotta, dello sviluppo carsico e dei processi mineralizzanti, permettendo anche di stabilire la corrispondente situazione paleogeografica. Le grotte ferruginose dell'altopiano di Vaucluse permettono quindi di iniziare la quantizzazione della sua velocità di sollevamento e di ricostruire la sua evoluzione paleogeografica a partire dal Miocene.

La situazione idrogeologica e l'origine del flusso ipogenico

Situazione topografica e strutturale

La grotta-miniera di Piei si apre all'interno del vecchio villaggio di Lagnes, a 140 m s.l.m., vicino alla sommità di una piccola collina calcarea, circa 50 m sopra la piana di Carpentras (Fig. 1). Il suo nome deriva

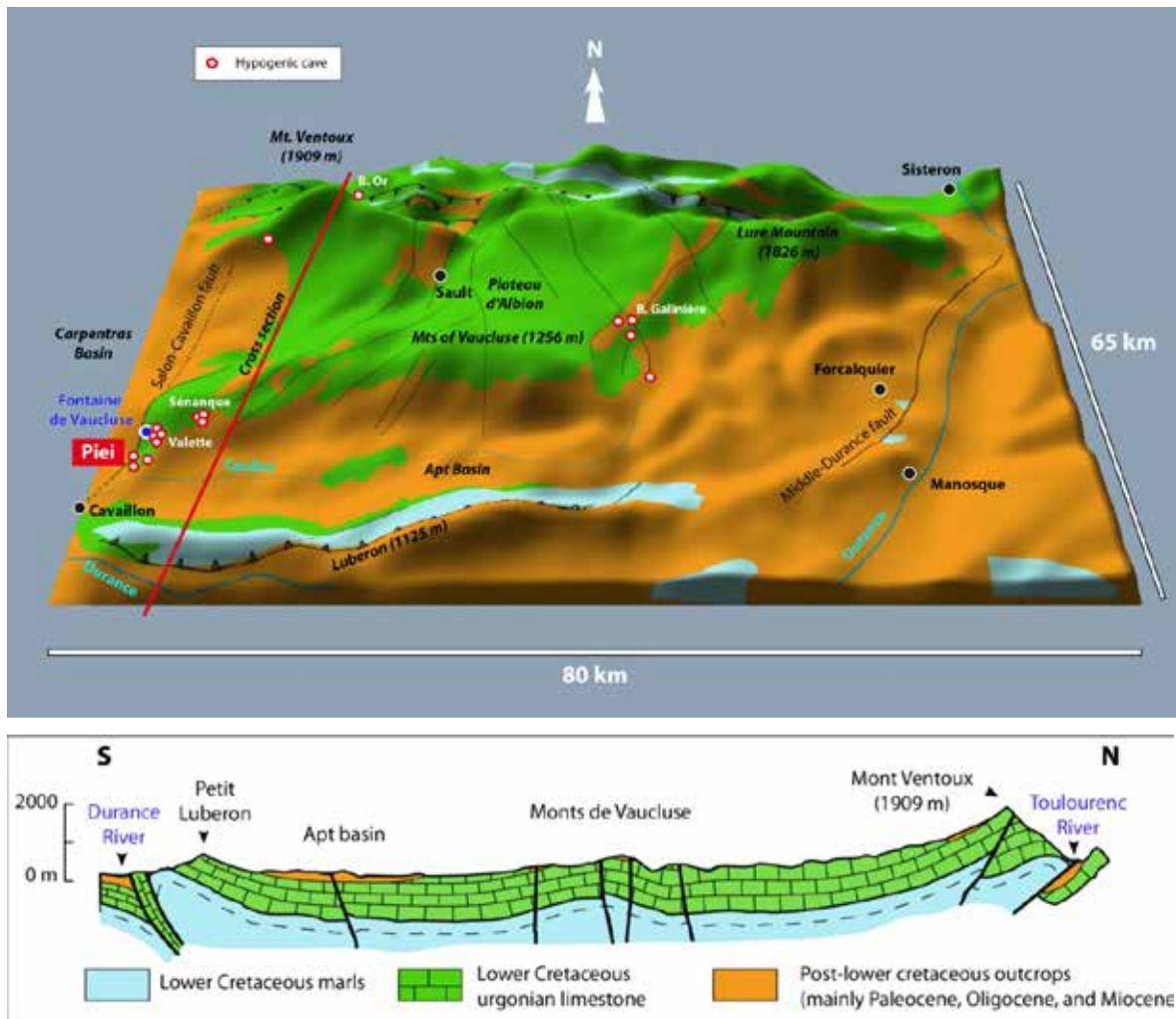


Fig. 1 - Structural conditions of the Vaucluse plateau. The block is made of a thick Lower Cretaceous Urgonian limestone. It is gently undulated and bounded to the North and to the South by overthrusts resulting from the alpine shortening. Hypogenic caves locate on the periphery along main faultlines (Geology after BLAVOUX, 2010). / *Condizioni strutturali dell'altopiano di Vaucluse. Il blocco è costituito da spesso calcare Cretacico Urgoniano, che è leggermente ondulato e bloccato verso Nord e Sud a seguito dei sovrascorrimenti dovuti all'accorciamento alpino. Le grotte ipogeniche si trovano alla periferia lungo le faglie principali (Geologia da BLAVOUX, 2010).*

cline chain of the Luberon. This undulated limestone slab is bound to the North by the Hauterivian marly basement because of the structural rise; otherwise, because of the structural plunging, the limestone boundary follows the outcrop of the younger Paleogene and Neogene covers. This confining boundary between the Urgonian aquifer and its cover gradually lowers from the Alps side towards the Rhône valley, i.e. from the NE corner close to Sisteron towards the SW corner towards Lagnes. Furthermore, the rigid Urgonian slate is intensively fractured by NE-SW and NW-

da un termine occitano puech, puèi o piè in provenzale rodaniano, podium in latino, che indica una basso rilievo di importanza strategica difensiva. La collina di Lagnes si posiziona a 2 km a Sud della famosa Fontana omonimo, nell'angolo SO dell'altopiano di Vaucluse, che poi si innalza verso Nord fino al suo punto più alto, il Mont Ventoux (1909 m slm).

L'altopiano di Vaucluse è un blocco largo e ondulato, con una struttura E-O. È costituito da calcari del Cretacico inferiore di facies Urgoniana, il cui spessore varia da 700 a 1000 m. Questo altopiano ondulato

SE faults and by N 30° Oligocene rifts. On the periphery, large faultlines have accommodated the tightening of the block during the successive tectonic motions, the Pyreneo-provençale phases in the Eocene and the main alpine phase in the Miocene. Overthrusting structures with outward vergence bound the Ventoux-Lure crest to the North and the Luberon to the South. To the East and to the West, the Vaucluse limestone plateau is surrounded by regional transcurrent faults: the Middle-Durance fault to the East, the Salon-Cavaillon fault to the SE, and the Nîmes fault close to the NE corner. The Salon-Cavaillon fault crosses Lagnes village and disappears North to the Fontaine de Vaucluse. Most of these faults predate the Miocene, with notable activity during the Oligocene. Some faults are still active, such as the Middle-Durance fault (GUIGNARD *et alii*, 2005) and possibly the Salon-Cavaillon fault (SAURET & TERRIER, 1990). To the East of the Lagnes village, where the Urgonian limestone dips down to the Carpentras Oligocene basin, the Salon-Cavaillon fault line corresponds to a small rift (Fig. 19). The Urgonian limestones are overlapped by the grey-green Burdigalian molasses. They are preserved in the Lagnes Rift and thicken to the West towards the Carpentras basin, where they are in turn covered by Quaternary deposits. The Piei Cave opens near the top of an uplifted limestone block, in the vicinity of the Salon-Cavaillon fault.

Paleo-hydrogeology

The inclination of the Urgonian limestone induces the convergence of the drainage toward the lowest outcrop of the Urgonian aquifer in the SW corner of the Vaucluse plateau. Because of the presence of a deep pocket valley where Fontaine de Vaucluse pours out, the current drainage emerges some kilometers northward. The organization of this drainage structure dates back to the Messinian incision which allowed the collection of infiltration waters of a large catchment thanks to the corresponding high gradient (AUDRA *et alii*, 2004). From the Pliocene transgression onward, the Fontaine de Vaucluse became the main emergence, which acted first as a coastal spring (GILLI & AUDRA, 2004). After the retreat of the Pliocene sea, the Fontaine de

*raggiunge la massima altezza verso Nord lungo la cresta Ventoux-Lure che forma una barriera verso Nord tra i 1500-1900 m slm. L'altopiano scende verso Sud nella parte centrale del Plateau d'Albion at 700-1000 m slm. Risale di nuovo al Mont de Vaucluse e quindi scende rapidamente verso la sinclinale attraverso il Bacino di Apt e finalmente risale a Sud sulla catena anticlinale del Luberon. Questo blocco calcareo ondulato è bloccato a Nord dal basamento di marne Hauteriviene a causa del loro sollevamento strutturale; per il resto il contatto dei calcari segue l'affioramento delle più giovani coperture del Paleogene e Neogene a causa dell'abbassamento strutturale. Il limite di confinamento tra l'acquifero Urgoniano e la sua copertura si abbassa dal lato delle Alpi verso la valle del Rodano, cioè dall'angolo di NE vicino a Sisteron verso l'angolo di SO verso Lagnes. Inoltre il rigido argilloscisto Urgoniano è intensamente fratturato da faglie NE-SO e NO-SE e da rifts Oligocenici N 30°. Alla periferia, grandi lineazioni di faglia hanno seguito il compattamento dei blocchi durante i movimenti tettonici successivi, le fasi Pyreneo-Provenzale nell'Eocene a la principale fase alpina nel Miocene. Sovrascorrimenti con vergenza esterna bloccano la Cresta Ventoux-Lure a Nord e il Luberon a Sud. A Est e Ovest, l'altopiano calcareo di Vaucluse è circondato da faglie regionali trascorrenti: la faglia Middle-Durance ad Est, quella di Salon-Cavaillon a Sud-Est, e la faglia di Nîmes all'angolo di NE. La faglia di Salon-Cavaillon attraversa il villaggio di Lagnes a sparisce a Nord verso la Fontana di Vaucluse. La maggior parte di queste faglie sono antecedenti al Miocene, con notevole attività durante l'Oligocene. Alcune faglie sono ancora attive, come la Middle-Durance (GUIGNARD *et alii*, 2005) e possibilmente anche la Salon-Cavaillon (SAURET & TERRIER, 1990). Ad Est del villaggio di Lagnes, dove il calcare Urgoniano scende verso il bacino Oligocenico di Carpentras, la linea di faglia Salon-Cavaillon corrisponde a un piccolo rift (Fig. 19). I calcari Urgoniani sono stati ricoperti dalle molasse grigio-verdi del Burdigaliano. Essi si sono preservati nel rift di Lagnes e si sono ispessiti a Ovest verso il bacino di Carpentras, dove sono poi stati ricoperti da depositi Quaternari. La grotta di Piei si apre vicino alla*

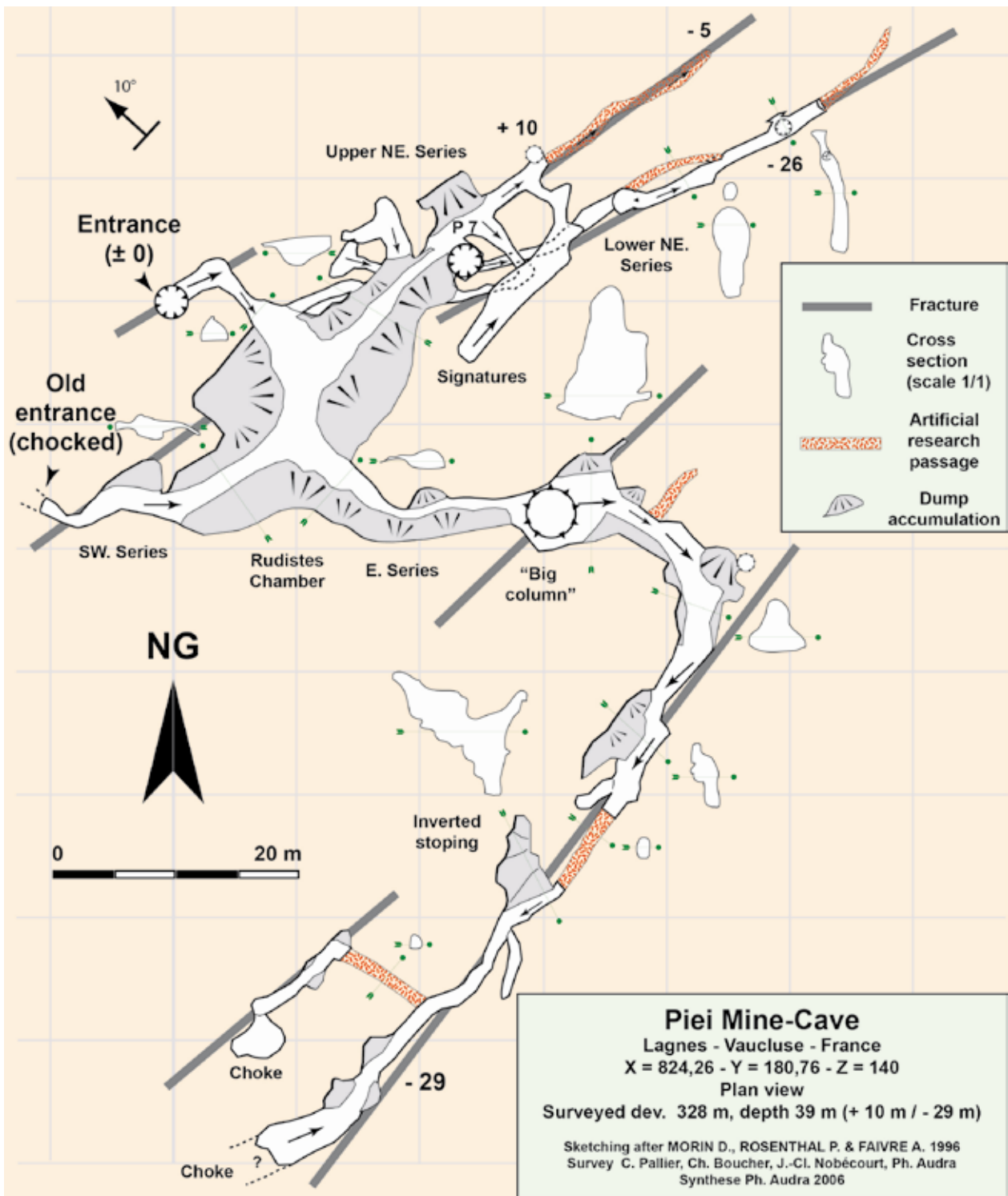


Fig. 2 - Plan view of the Piei mine cave. The cave profile is shown on Fig. 17. / *Pianta della grotta-miniera di Piei. Il profilo della cavità è riportato in Fig. 17.*

Vaucluse kept its position because of the persistence of the Pliocene impermeable covers downwards (MOCOCHAIN *et alii.*, 2011). Before the Messinian, the drainage was probably divided between smaller catchments. The Valescure Aven, located above the Fontaine de Vaucluse at the

sommità di un blocco calcareo sollevato nei pressi della faglia Salon-Cavaillon.

Paleo-idrogeologia

L'inclinazione del calcare Urgoniano ha causato la convergenza del drenaggio verso il punto di affioramento più basso dell'ac-

Cave	Location	Speleometry (length / depth)	Altitude (m)	Fault	Hypogenic mineralizations	Mining activity	References
Piei Cave	Lagnes	328 / ± 39	140	Salon-Cavaillon	Massive FeOx, dykes, crusts	Cleaning of the filling and scratching out of the crusts (1832-35)	This paper
Chat Aven	Lagnes	- 60	245	Salon-Cavaillon	Mega-poolfingers FeOx, calcite coating	Mining of the « ferruginous trunk » down to -40 (1835-36)	MORIN <i>et alii.</i> , 1996;
Espérelles Cave	Lagnes	50 / - 12	170	Salon-Cavaillon	FeOx	Scratching out of the ferruginous crusts and dikes	MORIN <i>et alii.</i> , 1996;
Sénanque Aven-mine	Gordes	- 26	450	Salon-Cavaillon	FeOx	?	MORIN <i>et alii.</i> , 1996; GAUBERT & LEFALHER, 1995
Sénanque mine- Cave (or Ab-baye?)	Gordes		450	Salon-Cavaillon	FeOx	?	MORIN <i>et alii.</i> , 1996; GAUBERT & LEFALHER, 1995
Vache d'Or Mine-Cave (or Cabre d'Or)	Fontaine-de-Vaucluse	33 / - 8	280	Salon-Cavaillon	FeOx (in the dumps below entrance)	Scratching of the walls and cleaning of the sediments	MORIN <i>et alii.</i> , 1996; GAUBERT & LEFALHER, 1995
Valette Aven (or Sans nom Aven)	Fontaine-de-Vaucluse	31 / -7	270	Salon-Cavaillon	FeOx (in the dumps below entrance)	Scratching of the walls and cleaning of the sediments	MORIN <i>et alii.</i> , 1996; GAUBERT & LEFALHER, 1995; GAUCHON, 1997
Pin Aven	Fontaine-de-Vaucluse	15 / -5	220	Salon-Cavaillon	FeOx (in the dumps below entrance)	Scratching of the walls and cleaning of the sediments	MORIN <i>et alii.</i> , 1996; GAUBERT & LEFALHER, 1995
Baume de l'Or	Saint-Léger-du-Ventoux	≈ 50	1350	Ventoux overthrusting	FeOx	Under identification	GAUCHON, 1991
Baume Galinière	Simiane-la-Rotonde	100	638	Simiane rift	Sulfur masses, FeOx coating, calcite scalenodrons (high temperature?), gypsum, sulfuric speleogenesis	Metallurgy using surface ferruginous weathering deposits (not from the cave)	AUDRA & BIGOT, 2013
Vallon des Mines (or d'Émines) shafts and caves	Bédoin	-8	≈ 700	Directly above the Ventoux overthrusting	FeOx dyke in shafts, crusts in caves	Mining shaft	COUTURAUD (unpubl.)
Chaire à Prêcher	Oppedette			Oppedette fault	Calcite spar coating	n/a	MARTEL, 1951
Carrière Aven	Banon		760	Banon rift	Calcite spar coating	n/a	BIGOT, unpubl.

Tab. 1 - 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 where iron mainly crops out as small sulfur masses. / *Caratteristiche delle grotte ipogeniche dell'altopiano di Vaucluse. Tutte contengono mineralizzazioni ferrose che sono state oggetto di coltivazione mineraria, eccetto la Chaire à Prêcher e l'Aven de la Carrière che hanno le pareti ricoperte di cristalli di calcite e la Baume Galinière dove il ferro affiora essenzialmente in masse solfuree.*

contact of the molassic covers, acted as a vauclosian spring from Upper Aquitanian to Lower Burdigalian (COUTURAUD, 1993; BESSON *et alii*, 2005a, 2005b; PARIZE *et alii*, 1997; AUDRA, 2007). The SW corner of the Vaucluse Plateau acted as an emergence spot from the beginning of the Miocene till now, thanks to its structural, topographic, and consequently hydrogeologic location. Right now, during high water, additional flows to the Fontaine de Vaucluse are lining the contact with the Carpentras basin. The Esclargades Aven, located west of Lagnes at the contact between the limestone aquifer and the molassic cover, is a small abandoned vauclosian emergence, corresponding to an aquifer overflow (COUTURAUD, 1992).

Hypogenic caves with ferruginous mineralizations

The Vaucluse Plateau also harbors caves with ferruginous mineralizations (fig. 1, tab. 1).

They exclusively are located in the periphery, in the vicinity of the cover limits and at the intersection of the main regional faults (Salon-Cavaillon faults, Ventoux overthrusting, Simiane rift). The ferruginous ores often correspond to dykes filling karstified fissures (Émines site); sometimes, they are present in caves with walls covered with ferruginous crusts (Espérelles, Baume de l'Or, Valette, *etc.*), or less commonly as massive deposits (Piei). The Chat Aven is a unique case of a "ferruginous trunk" made of agglomerated poolfingers. This trunk reaches 60 m high for about 1 m of diameter and fills a karstic chimney. In the Baume Galinière, iron crusts come from the oxidation of sulfuric masses that are at the origin of a sulfuric speleogenesis (AUDRA & BIGOT, 2013). All these caves are of hypogenic origin, as shown by their location (confinement boundary, regional faults), their morphology (mazes, ascending flow evidences), and their deposits (ferruginous masses, calcite spar coatings, and less commonly gypsum).

The Piei mine cave, a hypogenic cave

The Piei mine cave is a small cave (328 m of length for a depth of 39 m; fig. 2). The entrance corresponds to a chimney cut by the surface that gives access to the Rudists

*quifero Urganiano verso l'angolo di SO dell'altopiano di Vaucluse. A causa della presenza di una profonda valle chiusa dove si trova la sorgente della Fontana di Vaucluse, il drenaggio attuale emerge solamente alcuni chilometri più a nord. L'organizzazione di questa struttura di drenaggio si è evoluta con l'incisione Messiniana che permise di raccogliere l'infiltrazione di un grande bacino di alimentazione grazie al corrispondente forte gradiente (AUDRA *et alii*, 2004). Dalla trasgressione Pliocenica in avanti, la Fontana di Vaucluse divenne la principale risorgente, inizialmente come sorgente costiera (GILLI & AUDRA, 2004). Dopo che il mare Pliocenico si era ritirato, la Fontana di Vaucluse mantenne la sua posizione a causa della persistenza a valle delle coperture impermeabili Plioceniche (MOCCHAIN *et alii*, 2011). Prima del Messiniano, il drenaggio era probabilmente suddiviso in bacini più piccoli. L'Aven di Valescure, posizionato sopra la Fontana di Vaucluse al contatto con le coperture molassiche, ha funzionato come sorgente valclusiana dall'Aquitaniense superiore al Burdigaliano inferiore (COUTURAUD, 1993; BESSON *et alii*, 2005a, 2005b; PARIZE *et alii*, 1997; AUDRA, 2007). L'angolo di SO dell'altopiano di Vaucluse ha funzionato come punto di risorgenza dall'inizio del Miocene sino ai giorni nostri, grazie alla sia posizione strutturale, topografica e conseguentemente idrogeologica. Ancora oggi, nei periodi di piena, oltre alla Fontana di Vaucluse sono presenti flussi idrici al contatto con il bacino di Carpentras. L'Aven di Esclargades, posizionato a ovest di Lagnes al contatto tra l'acquifero calcareo e la copertura delle molasse, è una piccola risorgente valclusiana abbandonata, corrispondente a un troppo pieno dell'acquifero (COUTURAUD, 1992).*

Grotte ipogeniche con mineralizzazioni ferrose

L'altopiano di Vaucluse ospita anche grotte con mineralizzazioni ferrose (Fig. 1, Tab. 1), che si trovano localizzate esclusivamente alla periferia nelle vicinanze dei limiti della copertura o all'intersezione delle principali faglie regionali (le faglie Salon-Cavaillon, il sovrascorrimento del Ventoux, e il rift di Simiane). Spesso le mineralizzazioni di ferro corrispondono a dicchi che riempiono fessure carsificate (per esempio a Émines;

Chamber at the main level. Several series converge to this chamber; they are approximately horizontal with rising passages or chimneys to the NW. The East Gallery progressively rises from the lower point, crossing a large chimney, the « Grande Colonne ».

It ends as two parallel narrow passages. The Lower Series are connected to the Rudists Chamber by a 7 m deep shaft. The cave follows several parallel fractures (N 20-40°), clearly visible in the rift-like passages located in the peripheric areas. Originally, the cave was probably entirely filled with mineralized sand and the current open spaces correspond to diggings of the sand fill together with some short artificial research passages excavated in massive rock along fissures.

The cave morphology shows typical phreatic round sections with some less frequent epiphreatic features.

The chimneys in the NW area and the Grande Colonne correspond to phreatic flow originating from paragenetic ceiling channels above the sand filling.

Scallops in the narrowest parts of the Lower Series indicate a rising flow.

The flow originated from the Lower Series and the E Gallery, converged toward the Rudists Chamber, and eventually poured out to the surface following the chimneys in the NW area.

In the vicinity of the Grande Colonne, some wall channel at the interface between the rock and the sand filling also shows a rising flow fed by a feeder (Fig. 16).

Otherwise, numerous features point toward a late epiphreatic phase: several notches and a paragenetic ceiling in the Rudists Chamber record the water-table level.

Sediments are composed of the main filling and wall coatings. The main filling is composed of green sand corresponding to the Burdigalian molasses which previously covered this area.

Such a filling is either contemporaneous to the Burdigalian transgression or corresponds to a late reworking. Ferruginous mineralizations remaining after mining are limited to wall coatings and masses in the lower series (*infra*).

However, the mine archives show that the mineralizations were developing as “veins

a volte sono presenti in grotte che presentano le pareti ricoperte da croste ferrose (Espérelles, Baume de l'Or, Valette, etc.), o, più raramente come depositi massivi (Piei). L'abisso Chat è un caso unico di un “cilindro ferruginoso” costituito da un aggregato di poolfinger alto 60 metri con un diametro medio di 1, che riempie un camino carsico. Nella Baume Galinière le croste di ferro derivano dall'ossidazione di mineralizzazioni di solfuri che si erano depositati nei primi stadi della speleogenesi solfurea (AUDRA & BIGOT, 2013). Tutte queste grotte sono di origine ipogenica, come mostrato dalla loro localizzazione (limiti di confinamento, faglie regionali), le loro morfologie (labirintiche, con evidenze di flussi ascensionali), e i loro depositi (masse ferrose, croste di calcite spatica, e, più raramente, gesso).

La grotta-miniera di Piei, una grotta ipogenica

La grotta-miniera di Piei è una piccola cavità (328 m di lunghezza per una profondità di 39 m; Fig. 2). Il suo ingresso corrisponde a un camino tagliato dalla superficie esterna e che permette l'accesso alla Sala delle Rudiste nel livello principale. Differenti livelli suborizzontali convergono in questa sala, attraverso passaggi in risalita o pozzi subverticali con direzione NW. La Galleria Est risale progressivamente dal punto più basso, intersecando un largo camino, la “Grande Colonne” e terminando infine con due stretti passaggi paralleli. I piani inferiori sono connessi con la Sala delle Rudiste da un pozzo di 7 metri. La grotta segue diverse fratture parallele (N 20-40°), chiaramente visibili nei passaggi sviluppatasi nelle parti periferiche del sistema. Originariamente la grotta era probabilmente riempita di sabbia mineralizzata e i vuoti attuali corrispondono allo scavo dei riempimenti sabbiosi con poche e brevi gallerie artificiali scavate nella roccia compatta lungo fessure preesistenti.

La morfologia della grotta mostra tipiche sezioni freatiche arrotondate con più rare forme epifreatiche. I camini nell'area di NO e nella Grande Colonne corrispondono a flussi freatici che si sono originati da condotte paragenetiche sul soffitto al di sopra dei riempimenti sabbiosi. Gli scallops nelle parti più strette indicano che il flusso era ascendente. Il flusso originatosi delle Galle-

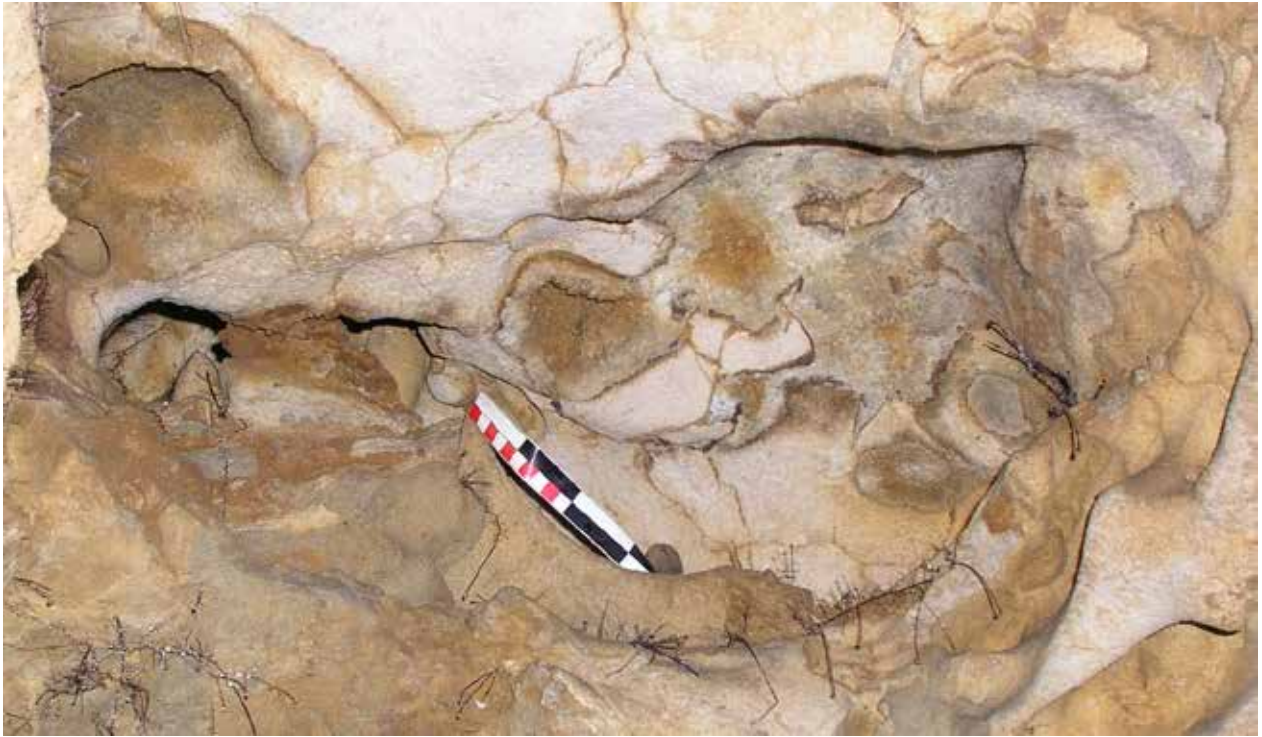


Fig. 3 - Ceiling of a cupola close to the entrance. Ferruginous crusts are coated with subaqueous calcite spar that was later smoothed by aggressive aerosols. Scale is 20 cm long (photo: J.-Y. Bigot). / Soffitto di una cupola presso l'ingresso. Le croste ferruginose sono ricoperte da cristalli di calcite subacquea che è stata successivamente corrosa da aerosol aggressivi (foto: J.-Y. Bigot).

inside the rock” and as “masses in the filling”. The observation of remaining deposits suggests that the mineralizations were concentrated at the interface of wall and sediment, particularly on top and especially inside the cupolas.

In the highest places close to the outflow, ferruginous crusts are coated with calcite spar which was smoothed by later corrosion (Fig. 3). This calcite testifies a late phase, still phreatic, with degassing close to the water table allowing calcite deposition.

The widespread smoothing of the calcite coating corresponds to a late phase, where the water table lowered for some meters and produced corrosion by aerosols in the dewatered upper level. Finally, some cupolas with flat ceiling, located at different heights, seem to be linked to gas trapping or to water convections at shallow depth.

Altogether, these characteristic features of rising flow (phreatic morphology, cupolas, wall and ceiling channels, feeders) and the ferruginous mineralizations point toward a hypogenic speleogenesis, where the flow rising from the depth was not directly connected with meteoric recharge.

rie Inferiori e la Galleria E convergeva verso la Sala delle Rudiste e infine affiorava in superficie seguendo i camini nell'area di NO. Anche nei pressi della Grande Colonna qualche canale lungo le pareti al contatto tra la roccia e il riempimento sabbioso mostra evidenze di un flusso ascendente proveniente da un foro di alimentazione (Fig. 16). Altrove varie forme indicano una fase tardiva epifreatica: varie mensole e soffitti paragenetici nella Sala delle Rudiste hanno infatti registrato l'evoluzione del livello piezometrico.

I sedimenti sono costituiti dal riempimento principale e da depositi parietali. Il riempimento principale è composto da sabbia verde corrispondente alle molasse Burdigaliane che precedentemente coprivano quest'area. Tale riempimento è o contemporaneo alla trasgressione Burdigaliana ovvero corrisponde a un successivo rimaneggiamento. Le mineralizzazioni ferruginose rimaste dopo i lavori minerari sono limitate a veli parietali e a masse nelle gallerie inferiori (infra). Tuttavia gli archivi della miniera mostrano che le mineralizzazioni erano sviluppate come “vene all'interno della roccia” e come “masse all'interno dei riempimenti”.



Fig. 4 - 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 [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 Chat Aven) (ARCHIVES DÉPARTEMENTALES DE VAUCLUSE, 1833). / Carte topographique de la concession de minerais de fer de la commune de Lagnes: 382 ha, riferiti a quanto definite nella richiesta del 9 Agosto 1833]. La scala originale è 1/10 000 (la lettera N indica la grotta-miniera di Piei, X l'Aven Chat) (ARCHIVES DÉPARTEMENTALES DE VAUCLUSE 1833).

Short mining period after 1830 then progressively forgotten

Historical metallurgy tradition

Around Fontaine de Vaucluse, iron metallurgy is known at least since the Middle Age. In the second half of the XVth Century, several contracts testify the activity of tilt hammers along the Sorgue River pouring out of the Fontaine de Vaucluse. This metalwork was fed by local mines (GUIGUE & GIRARD, 1949, p. 27): iron ores occurred “in the villages of Lagnes, Vaucluse, Saumanes, Gordes, Saint-Saturnin, and more generally all around the massif made of Upper Neocomian, from the Fontaine de Vaucluse and beyond Simiane” (GRAS, 1862, p. 321). In addition, some ore could have been exploited on the northern slope of Mont Ventoux (Tab. 1). During field investigations, cavers often found and documented these caves and avens where iron ores were mined (especially J.-P. Viard, ACRC, cave

L'osservazione diretta dei depositi residui suggerisce che le mineralizzazioni fossero concentrate all'interfaccia tra la parete e i sedimenti, particolarmente alla sommità e soprattutto nelle cupole. Nei posti più elevati vicino alla risorgenza, le croste ferruginose sono ricoperte da calcite spatica, i cui spigoli sono stati a loro volta arrotondati da una successiva corrosione (Fig. 3). La presenza di calcite indica un fase tardiva, ancora freatica in cui il degassamento vicino alla superficie piezometrica permetteva la deposizione di questo minerale. La diffusa corrosione della crosta di cristalli di calcite corrisponde ad un ulteriore fase in cui il livello delle acque si era abbassato ulteriormente di alcuni metri, permettendo la corrosione da parte di aerosol nella parte superiore svuotata dall'acqua. Infine, alcune cupole con il soffitto piatto, posizionate a differenti quote, sembrano indicare la formazione di trappole di gas e/o movimenti convettivi a bassa profondità. Tutte insieme, queste forme caratteristiche di flussi ascendenti (morfologie freatiche, cupole, canali di volta e fori di alimentazione) e di mineralizzazioni ferruginose indicano una speleogenesi ipogenica, caratterizzata da flussi risalenti dal basso non direttamente connessi con la ricarica meteorica.

surveys in GAUBERT & LEFALHER, 1995). The Piei mine cave, recently studied by archeologists (MORIN *et alii*, 1997) and historians (LOCCI, 1988), remained unknown for cavers or was only considered as a mine. Its identification as a karstic cave occurred only recently (ROUZAUD Fr., in MORIN *et alii*, 1997); consequently this is the first karstological study.

The short activity phase of the Piei Mine

The few documents kept in the Departmental Archives of Vaucluse, together with the papers published from the XIXth Century, attest that the Piei Mine exploitation was never well organized. During its 3 years of activity it remained informal, hindering us in getting a precise idea of its organization. Already in 1894, a report stated that it was impossible to get “*the data related to the tonnage and to the value of the extracted minerals, to the amount of employed workers, and to the amount of the gross receipts, expenses and net profit*”. The discovering of the mine itself was early disputed between several competitors (LOCCI, 1988). The royalties to the Lagnes commune, fixed by the 1833 mining claim, seem to have never been paid. The 1/1000 plans and profiles that the operators should have produced and provided each year to the Prefecture, as explicitly referenced in the mining claim specifications, were probably never surveyed; at least nothing was found in the archives... As usually, the most frequent archives related to the Piei Mine history correspond to quarrels: trade conflicts between Perre and Martin contractors; protest of an industrialist from the neighboring Saumane commune worrying of being competed for the mineral supply; complaint of the Lagnes villagers fearing of houses destabilization... These incidental documents are fortunately completed by the descriptions of the geologist SCIPION GRAS (1862), which are the most detailed and probably the most reliable. The mine must have been discovered at the beginning of the 1830s. The founder Gustave Perre designed a mining project in order to feed with mineral the blast furnace he planned to build at Velleron. The Lagnes ore was too small to feed it durably, however it was close (12 km). And the solicitation

Breve periodo minerario dopo il 1830 poi progressivamente dimenticato

La tradizione metallurgica storica

Attorno alla Fontaine de Vaucluse, la metallurgia del ferro era nota almeno dal Medio Evo. Nella seconda metà del XV secolo, vari contratti testimoniano l'attività dei martelli da forgia lungo il fiume Sorgue che ha la sua origine dalla Fontana di Vaucluse. Questa attività metallurgica era alimentata da miniere locali (GUIGUE & GIRARD, 1949, p. 27): giacimenti di ferro si trovavano “nei comuni di Lagnes, Vaucluse, Saumanes, Gordes, Saint-Saturnin e più in generale tutto attorno al massiccio del Neocomiano superiore, dalla Fontana di Vaucluse a oltre Simiane” (GRAS 1862, p. 321). Inoltre qualche giacimento potrebbe essere stato coltivato nel fianco a nord del Mount Ventoux (Tab. 1). Durante il lavoro di campagna, gli speleologi hanno spesso trovato grotte e abissi in cui sono stati coltivati i depositi di ferro (in particolare J.-P. Viard, ACRC, rilievi di grotta in GAUBERT & LEFALHER, 1995). La Grotta-miniera di Piei, studiata recentemente da archeologi (MORIN et alii, 1997) e storici (LOCCI, 1988), rimase sconosciuta agli speleologi o forse fu solo ritenuta una miniera. La sua identificazione come grotta carsica fu fatta solo di recente (ROUZAUD, in MORIN et alii, 1997), conseguentemente questo è il suo primo studio carsico.

La breve fase di attività della Grotta-Miniera di Piei

I pochi documenti presenti nell'Archivio dipartimentale di Vaucluse, assieme con i lavori pubblicati dal XIX secolo, attestano che lo sfruttamento della miniera di Piei non è mai stata ben organizzata. Nel corso dei suoi 3 anni di attività era rimasta “informale”, impedendo così a noi di avere una precisa idea della sua organizzazione. Già nel 1894 una relazione attestava che era impossibile avere “i dati relativi alle tonnellate e al valore del minerale estratto, alla quantità di minatori impiegati e a quella relativa ai guadagni lordi, spese e profitto netto”. La scoperta stessa della miniera era stata oggetto di disputa tra diversi soggetti (LOCCI, 1988). Le royalty al comune di Lagnes, fissate dalla dichiarazione mineraria del 1833, sembrano non essere state mai



Fig. 5 - Beyond the « Grande Colonne », staircases made of stone or cut in the clay help walking between the cave wall and the built dump wall. All is made to leave the largest space for miner traffic and to limit the dump extraction (photo: J.-Y. Bigot). / Aldilà della “ Grande Colonne”, gradini di roccia o tagliati nell’argilla aiutano la progressione tra la parete della grotta e quella del muro costruito con lo scarto. Tutto è stato fatto per lasciare il massimo spazio possibile per il passaggio dei minatori e per limitare l’estrazione delle sterili (foto: J.-Y. Bigot).

of additional neighboring ores could have helped to start this steel activity. He applies for a mining claim during fall of 1831, and permission was granted in August 1833 (Fig. 4).

Mining conditions

According to the mining engineer H. de VILLENEUVE (1834), the mining started even before the official mining claim. Indeed, his report mentions two openings giving access to the mine, a horizontal one dug in 1830 that was maybe at the origin of the discovery and a 3 m vertical one corresponding to a shaft made in 1832. The most informative document is a manuscript detailing the mine specifications (A. A. 1833). The article first provides valuable

pagate. Le mappe e i profili 1/1000 che i gestori avrebbero dovuto produrre e fornire ogni anno alla Prefettura, come chiaramente specificato nella dichiarazione mineraria, probabilmente non furono mai realizzati: o almeno nulla è stato trovato negli archivi... Come di norma, i documenti storici più frequenti riferibili alla storia della miniera di Piei sono quelli relativi a contenziosi: conflitti commerciali tra Perre e Martin, possessori della concessione; proteste di un industriale del vicino comune di Saumane che protestava per concorrenza sleale nell’approvvigionamento del minerale; proteste degli abitanti di Lagnes che paventavano la destabilizzazione delle loro case ... Per fortuna questi documenti sono completati dalle descrizioni del geologo Scipion GRAS (1862), che risultano essere le più dettagliate e affidabili. La miniera deve essere stata scoperta all’inizio del 1830. Lo scopritore Gustave Perre preparò un progetto di estrazione per alimentare con il minerale la fornace che aveva previsto di costruire a Valleron. E la richiesta di altri vicini giacimenti può aver aiutato a far partire questa attività di produzione di acciaio. Lui ha presentato una richiesta di attività mineraria alla fine del 1831, che è stata accettata nell’Agosto del 1933 (Fig. 4).

Condizioni minerarie

Secondo l’ingegnere minerario H. de Villeeneuve (1834), l’attività dovrebbe essere iniziata anche prima che la richiesta ufficiale fosse presentata. Certamente il suo rendiconto riporta due ingressi che davano accesso alla miniera, uno orizzontale aperto nel 1830 che probabilmente aveva portato alla scoperta e un pozzo verticale di 3 m fatto nel 1832. Il documento con più informazioni è un manoscritto che contiene le specifiche minerarie (A. A. 1833).

Il primo articolo fornisce importanti notizie distinguendo tra posti “dove il minerale appare come vene o in blocchi nella sabbia” e dove “appare come vene dentro la roccia da cui può essere estratto solo grazie agli esplosivi”. Vengono poi descritte dettagliatamente i processi relativi alla discarica esterna e all’iniziale sistematico svuotamento delle “ strette fratture e camini contenenti il minerale”, prima che venissero riempiti di sterile e chiusi con blocchi di calcare. Questo dimostra come l’ingegne-

indications while distinguishing between places “where the mineral displays as veins or blocks in the sand” and where it “will appear as veins inside the rock where we could only mine it using powder”. Specifications detail the operating process concerning the outside dump and the priority and systematic exploitation of “the back alleys and chimneys containing mineral” before to be refilled and closed with walls made of limestone blocks. It shows that the mine engineer was concerned about the optimization of the resource exploitation by minimizing the dump handling. The observation of the mine cave, as it now displays, together with the results of archeological studies (MORIN *et alii*, 1997) show that the mineral must have been found as argillaceous masses, which exploitation did not leave significant pickaxe traces. On the contrary, research passages opened in the massive rock produced large volumes of dump collected as lateral walls including notches up in the walls (Fig. 5). Some pockets were emptied as inverted stoping extraction and walls built as one goes along the work moving upwards (Fig. 3, 6).

Volume of extracted mineral

What could be the extracted volume of such a mine cave? In a report contemporaneous to the early beginning of the exploitation, the engineer Villeneuve estimated that “the ore could probably provide 40 to 50 metric quintals of mineral [per day]” whereas the stratiform ore in Velleron produced 26 (VILLENEUVE, 1833). The exploitation appears economically viable and “the running of the blast furnace seems to offer some possible duration”. However, Villeneuve was aware that the ore was poorly quantified and that its exploitation was obviously uncertain: “The Martin Company understood that the ore amount of Lagnes was something uncertain where forecast could be erroneous”. Later on, Sc. GRAS (1862) is the only one providing an estimation of exploited volumes: between 1833 and 1835, « the production reached about 3.000 metric quintal, which cost price has been 1 Franc to 2.40 Francs per quintal, not including the costs of preliminary and research works which have reached considerable sums”. This estimation would lead to a volume approximation of extracted mineral of a min-



Fig. 6 - Beyond the staircase, a log is pinned between the walls and one side is stabilized with a terraced stone wall. The inverted stoping extraction (Fig. 2) allowed emptying a chimney from the bottom upwards (photo: J.-Y. Bigot). / *Aldilà dei gradini, un tronco d'albero è incastrato tra le pareti ed una parte è stata stabilizzata con un muro di pietre terrazzate. L'estrazione per gradino inverso ripieno (Fig. 2) ha permesso di vuotare un camino dalla sua base verso l'alto (foto: J.-Y. Bigot).*

re minerario si fosse preoccupato per l'ottimizzazione dell'estrazione della risorsa mineraria minimizzando la gestione dello scarto.

L'osservazione della grotta-miniera, come si presenta oggi, assieme ai risultati degli studi archeologici (MORIN et alii, 1997) mostra che il minerale deve essere stato trovato sotto forma di masse argillose, dato che i lavori estrattivi non hanno lasciato significative tracce di picconi.

Al contrario i passaggi esplorativi aperti nella roccia compatta produssero grandi volumi di scarti che sono stati accumulati in nicchie nelle pareti laterali (Fig. 5).

Alcune tasche furono svuotate con il metodo della coltivazione a gradino inverso ripieno e dei muri furono costruiti di mano in mano che i lavori procedevano verso l'alto (Fig. 3, 6).

imum of 60 m³, the real volume probably being larger, according to the impurities of extractions. After 3 years of activity, the ore was considered exhausted. The following year the work moved to the neighboring Chat Aven, then the discovery in Rustrel of a larger and more easily exploitable ore led to the moving of the activity toward Apt city. The short period of activity of the Piei mine cave is characteristic of the transition between the traditional metallurgy developed for centuries around Vaucluse and the onset of the Industrial Revolution: the ore in a cave is similar to the karstic pockets that have been emptied for centuries in the area, however, the building of a blast furnace, the founding of a company, and the frame laid down by the Mine Code (1810) announce a new era. Managers, such as Gustave Perre and Michel Gaspard Martin did not understand that this new period would need much larger tonnages and more favorable extraction conditions. In the same time, another enterpriser got a similar disappointment with a small ore discovered and exploited close to Bédoin (GRAS, 1862, p. 320). The Piei mine cave and the Chat Aven must have rapidly left the place to the Rustrel ores, then to the large industrial steel productions of Le Creusot, Saint-Étienne... Later on, and up to the beginning of the XXth century, the cave was still visited by some people who left a mark of their passage in the Signature Gallery (Fig. 2). Then, the cave was forgotten until the end of the XXth century when archeologists began its study.

Study of ferruginous mineralizations and characteristics of the hypogenic flow

Il volume del minerale estratto

Quale potrà essere stato il volume mobilitato in una simile grotta-miniera? In una relazione contemporanea all'inizio delle attività, l'ingegnere Villeneuve stimò che "il giacimento può probabilmente fornire 40-50 quintali di minerale [al giorno]" mentre il giacimento stratificato in Villeron ne produce 26 (Villeneuve 1833). Lo sfruttamento sembra essere possibile e "l'attività della fornace sembra possa durare per un certo periodo". Tuttavia Villeneuve era conscio che il giacimento era poco quantificato e che il suo sfruttamento era ovviamente incerto: "La Compagnia Martin sa che la quantità del giacimento di Langes è abbastanza incerta, per cui le previsioni possono essere errate". Più tardi, GRAS (1862) è l'unico a fornire una stima dei volume prelevati; tra il 1833 e il 1835 "la produzione ha raggiunto circa 3.000 quintali, il cui costo è stato tra 1 e 2,40 Franchi per quintale, non comprendendo i costi preliminari e di ricerca e di attrezzamento, che sono stati abbastanza costosi". Questa stima porta a stabilire approssimativamente un totale minimo di 60 m³ di materiale estratto, ma il volume reale è stato probabilmente maggiore, tenendo presente le impurezze presenti. Dopo 3 anni di attività il giacimento venne considerato esaurito. L'anno seguente i lavori si spostarono nel vicino Aven Chat, quindi la scoperta in Rustrel di un più grande giacimento e più facilmente coltivabile portò allo spostamento delle attività minerarie verso la città di Apt. Il breve periodo di attività della grotta-miniera di Piei è caratteristico del periodo di transizione tra la tradizionale metallurgia sviluppata nei secoli attorno a Vaucluse e le nuove tecniche della Rivoluzione Industriale: il giacimento in



Fig. 7 - Massive dyke facies filling joints in the deep zone of the cave (photo: Ph. Audra). / *Facies a dicchi massivi che riempiono i giunti nella zona profonda della grotta (foto: Ph. Audra).*

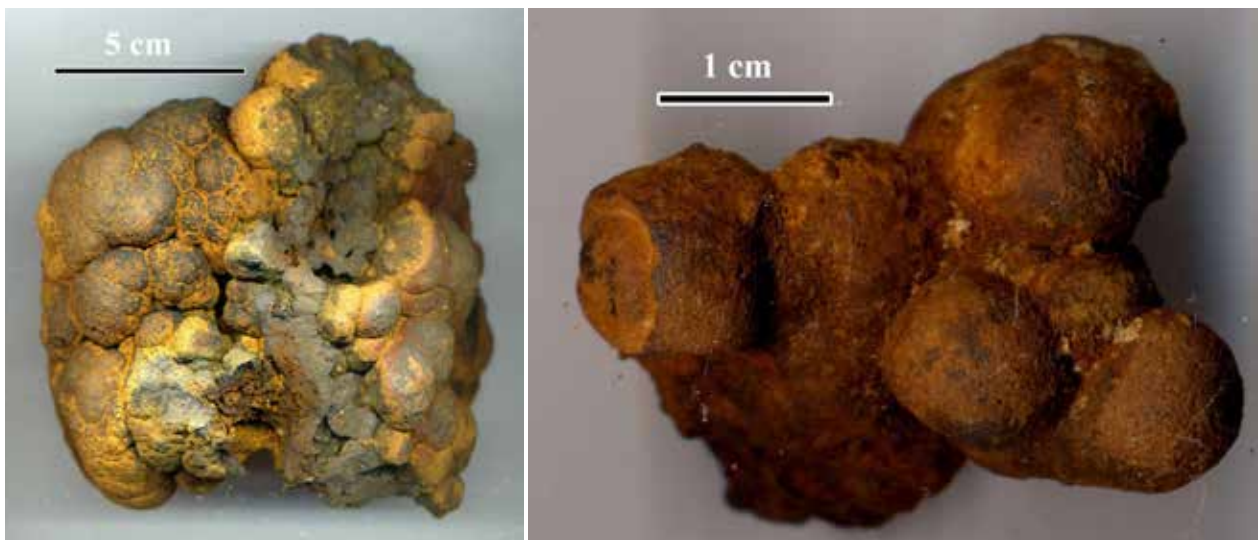


Fig. 8 - Massive mammillary facies located in the ceiling cupolas (photo: Ph. Audra). / *Facies massiva mammellonare all'interno di una cupola (foto: Ph. Audra).*

Ferruginous mineralizations and facies distribution

Facies of the ferruginous mineralizations

The mining activity has been abruptly stopped, leaving witnesses of ferruginous mineralizations, as wall crusts or as larger deposits such as blocks of more than 20 kg of massive iron oxyhydroxides at the bottom of the NE series. These mineralizations display as three main facies located in well defined areas of the cave.

Massive dyke facies (Fig. 7)

Some tiny joints, with a width of some millimeter to 1-2 cm, are filled with massive ore, with a symmetric fabric from the walls that often leave a void in the central area. These joints often correspond to the extreme places reached by the miners, which stopped their extraction where the ore abruptly became thinner (extremity of E and NE series). This facies corresponds to the poorly evolved joints, which locate below the enlarged karstic voids where larger deposits occur.

Mammillary and massive stratiform facies (Fig. 8)

At the bottom of the NE series, ceiling cupolas are filled with massive ferruginous deposits up to 50 cm in thickness. Accumulations are made of massive deposits or of mammillary fabrics leaving vugs. EDAX analysis shows extremely pure iron oxyhydroxides, probably an association of goethite-hematite with a small part of clay impurities (fig. 9, Tab. 2).

una grotta è simile alle tasche carsiche che sono state svuotate in questa area, tuttavia la costruzione di una fornace, la creazione di una Compagnia e l'elaborazione del Codice Minerario (1810) annunciano una nuova era. Manager, come Gustave Perre e Michel Gaspard Martin non capirono che questo nuovo periodo avrebbe necessitato molto maggiori rese e molto più favorevoli condizioni di estrazione. Nel medesimo tempo, un altro industriale subì la stessa sorte con un piccolo giacimento scoperto e coltivato vicino a Bédoin (GRAS, 1862, p. 320). La Grotta-miniera di Pieu e l'Aven di Chat dovettero ben presto cedere il passo al giacimento di Rustel, e quindi alla grande produzione industriale di acciaio di Le Creusot, Saint-Étienne. Dopo, e fino all'ini-



Fig. 9 - Chimney with ferruginous crusts covering wall niches (photo: A. Couturaud). / *Camini con croste ferruginose che ricoprono le nicchie delle pareti (foto: A. Couturaud).*

Elements	Weight %	Atoms %
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

Tab. 2 - EDAX Quantification (Standardless) of massive iron. They are almost pure iron oxyhydroxides, with clay traces revealed by the presence of some percents of silica and aluminium. / *Quantificazione EDAX (senza l'uso di standard) del ferro massivo. Si tratta essenzialmente di ossidi-idrossidi puri di ferro con piccole tracce di argilla, rivelata dalla presenza di qualche % di silice e alluminio.*

Spongy and mucoliform facies on microbial sand (Fig. 9, 10)

In the main horizontal gallery, the highest parts contained empty voids between the ceiling and the sand filling. Such voids were filled with ferruginous deposits (Fig. 9). The mineral displays a porous facies: spongy texture, poolfingers, mucoliforms (biofilm peeling off from the ceiling with mucous-like shape), triangular pendants along the highest overhanging walls, soft sheet accumulations (Fig. 10). Such facies are typical of ferruginous precipitation onto microbial mats, the hanging filaments produce poolfingers, the peeled off biofilms produce mucoliform concretions. When detaching, they pile up producing sheet accumulations.



Fig. 10 - Facies of the ferruginous deposits in the upper zone. 1: poolfingers in a small ceiling cupola. 2: mucoliform ferruginous concretion. 3: Sheet accumulations (photo: J.-Y. Bigot, A. Couturaud). / *Facies dei depositi ferruginosi nella zona superiore. 1: poolfinger in una piccola cupola del soffitto. 2: concrezione mucoliforme. 3: accumuli stratificati (foto: J.-Y. Bigot, A. Couturaud).*

zio del XX secolo, la grotta fu ancora visitata da viaggiatori che lasciarono il segno nella Galleria delle Firme. Poi, la grotta venne del tutto abbandonata finché gli archeologi cominciarono a studiarla alla fine del XX secolo.

Studio delle mineralizzazioni ferruginose e caratteristiche del flusso ipogeo

Le mineralizzazioni ferruginose e la distribuzione delle facies

Facies delle mineralizzazioni ferruginose
L'attività mineraria fu interrotta improvvisamente, lasciando tracce delle mineralizzazioni ferruginose come croste parietali o come più ampi depositi quali blocchi massivi di ossidi-idrossidi di ferro di oltre 20 kg sul fondo delle gallerie di NE. Queste mineralizzazioni mostrano tre differenti facies localizzate in ben definite aree della grotta.

Facies di dicchi massivi (Fig. 7)

Alcuni sottili giunti di stratificazione, con uno spessore da qualche millimetro a 1-2 centimetri, sono riempiti con depositi massivi a struttura simmetrica dalle parete, che spesso lascia un vuoto nell'asse centrale.

Questi giunti spesso corrispondono ai punti terminali raggiunti dai minatori, che interruppero la coltivazione non appena il giacimento diventava meno spesso (estremità delle gallerie di E e NE). Questa facies corrisponde a giunti scarsamente evoluti, che si trovano al di sotto dei grandi vuoti carsici dove maggiori depositi si erano sviluppati.

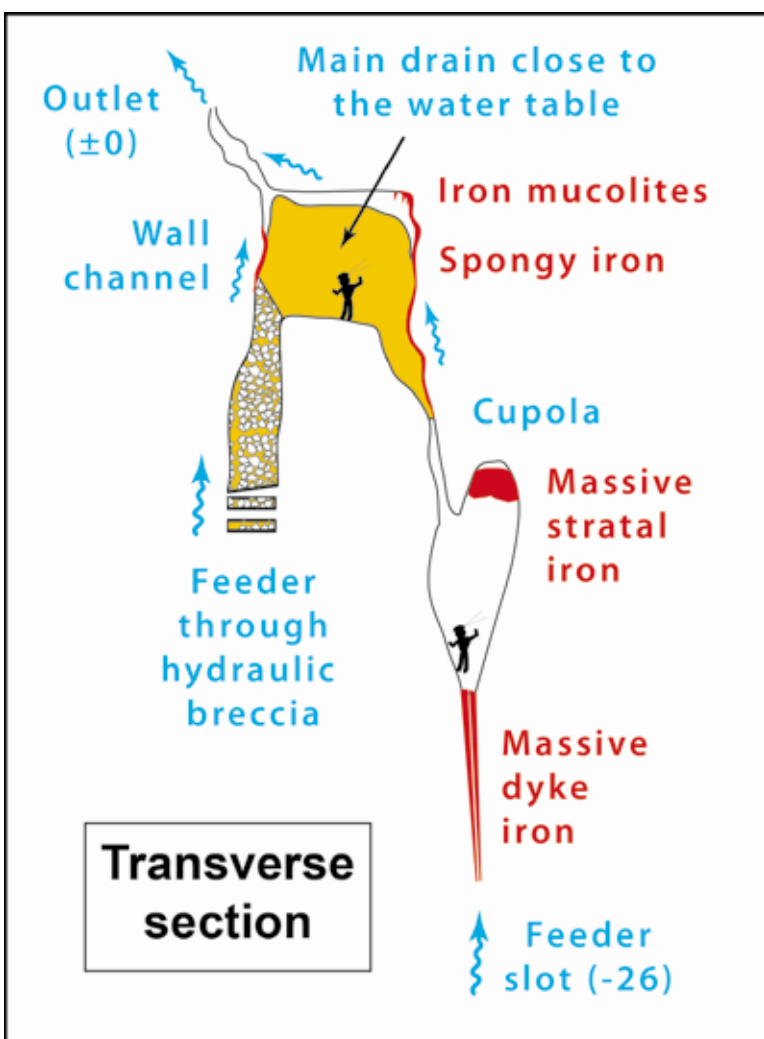


Fig. 11 - Diagrammatic distribution of the ferruginous mineralization facies according to depth: dyke in fractures at depth, massive deposits in the first voids, spongy and mucoliform masses in the draining voids and between wall and sediment. / Schema della distribuzione delle facies delle mineralizzazioni di ferro in funzione della profondità: dicchi nelle fratture profonde, depositi massivi nei primi vuoti, materiale spongiforme e mucolitico nei vuoti privi di acqua tra le pareti e il sedimento

Distribution of the ferruginous mineralizations according to flow conditions

The mineralization facies depend on their vertical distribution, according to the depth below the water table (Fig. 11). At depth, solution and transport occur in a reduced environment.

Close to the water table, and thanks to the mixing with oxygenated meteoric water, oxidation and precipitation are catalyzed by microbial activity, which is in turn is

Facies massive mammellonari e stratiformi (Fig. 8)

Al fondo delle gallerie di NE, le cupole del soffitto sono riempite da depositi ferruginosi massivi che raggiungono fino a 50 cm di spessore. Gli accumuli consistono di depositi massivi o di strutture mammellonari. Le analisi EDAX hanno evidenziato la presenza di ossidi-idrossidi di ferro estremamente puri, probabilmente una associazione di goethite-ematite con una piccola porzione di impurezze argillose (Fig. 9, Tab. 2)

Facies spongiforme e mucoliforme su un support microbico (Fig. 9,10)

Nella principale galleria orizzontale, la parte più alta probabilmente conteneva vuoti tra il soffitto e il riempimento di sabbia. Tali vuoti sono stati riempiti da depositi ferruginosi (Fig. 9). Il minerale presenta una facies porosa; con una tessitura spugnosa, poolfinger, forme mucolitiche (biofilm appesi al soffitto con aspetto mucolitico), pendenti triangolari lungo le pareti aggettanti più alte, accumuli di soffici laminazioni (Fig. 10). Tali morfologie sono tipiche di precipitazione dei minerali ferrosi su un substrato microbico, i filamenti pendenti danno luogo ai poolfinger, mentre i veli di biofilm producono concrezioni differenti, che quando si rompono e sedimen-



Fig. 12 - Ferruginous concentration between wall and sand filling. The ore also concentrates in the voids located along wall notches and in ceiling cupolas. Scale is 20 cm long (photo: H. Camus). / Concentrazione ferruginosa tra le pareti e i riempimenti sabbiosi. Il giacimento si concentra anche nei vuoti posizionati lungo le mensole delle pareti e nelle cupole del soffitto. La scala è di 20 cm (foto: H. Camus).

controlled by pH and/or eH conditions within the aqueous solution (ONAC, 2005). In the deep phreatic zone (here > 25-30 m), hypogenic flow occurs along tiny fissures, probably in an almost closed system. Corrosion widening of the fissures is limited, especially as the available space is partly filled with the thickening of ferruginous walls. In the intermediate zone (20-5 m), the mixing with the oxygenated meteoric water boosts the host rock dissolution and the enlarging of the fissures, together with oxidation reactions and precipitation of massive ferruginous mineralizations, mainly in cupolas and spots in elevated position.

Close to the water table, and especially in the gaseous cupolas, oxidation at its maximum allows microbial development, which in turn catalyses ferruginous precipitation onto biofilms, producing mucoliform formations and raft accumulations. The available space for such microbial development locates at the interface between the limestone ceiling and the top of the sand filling. The source of ferruginous masses is still



Fig. 13 - Wall channel fed at its bottom by a feeder, indicating a rising hypogenic flow. Height of the image is about 2 m (photo: H. Camus). / *Canale parietale alimentato dalla base che evidenzia la risalita di un flusso ipogenico. L'altezza dell'immagine è circa 2 metri (foto: H. Camus).*



Fig. 14 - Hydraulic breccia with sandy cement. Scale is 20 cm (photo: H. Camus). / *Breccia idraulica con cemento sabbioso. La scala è di 20 cm (foto: H. Camus).*

tano si accumulano producendo una struttura laminata soffice.

Distribuzione delle mineralizzazioni in funzione delle condizioni di flusso

La facies della mineralizzazione dipende dalla sua distribuzione verticale, in funzione della sua profondità rispetto alla superficie piezometrica (Fig. 11). In profondità la dissoluzione e il trasporto avvengono in un ambiente riducente. Vicino alla superficie piezometrica, e grazie alla miscela con acque meteoriche ossigenate, l'ossidazione e la precipitazione sono catalizzate dall'attività microbica, che in compenso è controllata dal pH e/o eH delle soluzioni acquose (ONAC, 2005).

Nella zona freatica profonda (qui > 30-35 m), si ha un flusso ipogenico lungo sottili fessure, probabilmente in un sistema praticamente chiuso. L'ampliamento per corrosione delle fessure è limitato, specialmente quando lo spazio disponibile è riempito dall'ispessimento delle pareti ferruginose. Nella zona intermedia (20-5 m) la miscela con le acque meteoriche ossigenate innesta la corrosione della roccia incassante e

to be determined with the help of isotopic methods. However, the primary source for iron oxides and hydroxide minerals in caves is generally pyrite (ONAC, 2005; HILL & FORTI, 1997).

Breccia of the Big Column Chamber

Description of the site

The Big Column Chamber hosts a breccia zone, orientated N20-40°, also locally present in all passages parallel to this direction. Numerous indicators of hypogenic flow are present along the walls and in the sediment fill of the galleries. These morpho-sedimentary indicators are closely connected to the ferruginous biomineralizations.

These last concentrate at the contact between the sand filling and the carbonate host rock and in the voids that were not filled with sediments (Fig. 17). These empty voids display special morphologies: ceiling cupolas (Fig. 9), horizontal notches,



Fig. 15 – Vertical sedimentary structure corresponding to a channel cutting the sand-hardened stratified filling (photo: H. Camus). / *Struttura sedimentaria verticale che corrisponde ad un canale scavato nel riempimento stratificato di sabbia cementata (foto: H. Camus).*

il conseguente allargamento delle fessure, assieme alle reazioni di ossidazione e precipitazione di mineralizzazioni ferruginose

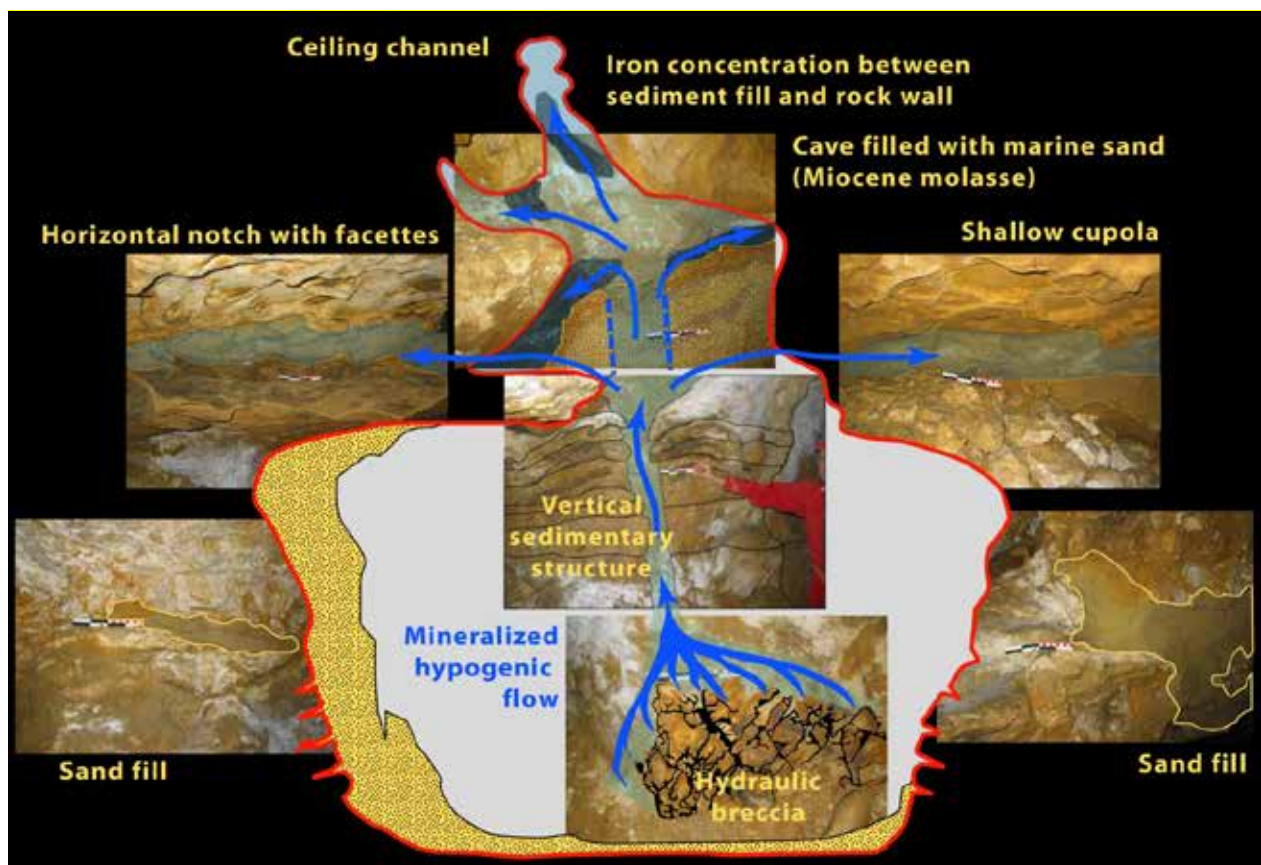


Fig. 16 - Relationships between morpho-sedimentary indicators in the East Gallery and reconstruction of the karstic flow inside the breccias and the sandy filling. The upflow rose across the brecciated zone, which also originated from this flow; it eventually diffused across the sandy filling with simultaneous ferruginous deposition in the residual voids between wall and filling (photo: H. Camus). / *Rapporti tra gli indicatori morfo-sedimentari nella Galleria Est e la ricostruzione del flusso carsico all'interno delle breccie e il riempimento sabbioso. La risalita avvenne attorno alla zone brecciate, che si erano sviluppate a seguito di questo flusso; infine il movimento si sviluppò anche all'interno dei riempimenti sabbiosi con la concomitante deposizione di ferro nei vuoti residuali tra la parete e i riempimenti (foto: H. Camus).*

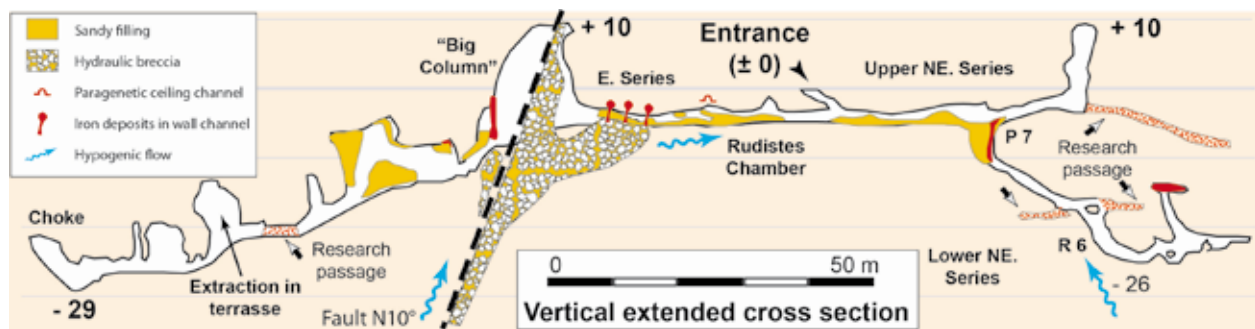


Fig. 17 - Distribution of hypogenic flow and ferruginous ore in the cave. Flow lifts up along breccia zones and fractures and eventually concentrates in the drain toward the outflow at the entrance. / *Distribuzione del flusso ipogenico e dei depositi ferrosi nella grotta. Il flusso risale lungo le zone di breccia e le fratture e infine si concentra nei dreni diretti verso la risorgenza all'entrata della grotta stessa.*

and vertical wall channels (Fig. 12, 13). The different indicators are in morphological and sedimentological sequence. Their distribution is controlled by the hypogenic flow, first rising from the breccia zone then along wall channels till they open in cupolas where ferruginous biomineralizations are developing in a plume-like shape. The flow path of the hypogenic flow is indicated in the sand filling that seals the breccia elements (Fig. 14), the wall channels, the notches, and the vertical structures that develop across the laminated sand filling (Fig. 15).

Morpho-sedimentary analysis

Between the Rudists Chamber and the Big Column, the East Gallery displays morpho-sedimentary evidences that allow rendering the directions of hypogenic flows (Fig. 16).

The breccias located at the bottom of the gallery shows an allochthonous sand cement reworked from the laminated sand that fills most of the cave.

These breccia develop around the fault zone and correspond to the propagation of a jointing aureole, made by the hypogenic flow across the fissures.

This flow gradually increases the transmissivity of the breccia and eventually their plugging.

Such breccia are defined as hydraulic breccia of karstic origin (Fig. 14). The allochthonous cement shows they are related to the organization of the karstic flow.

Above the hydraulic breccia zone the reworked sand plugs a vertical channel-like structure inside the sand filling itself (Fig.

massive, essenzialmente nelle cupole o in posizioni comunque levate. Nei pressi della superficie piezometrica, e soprattutto nelle cupole con presenza di fase gassosa, l'ossidazione raggiunge il suo massimo e permette lo sviluppo microbico, che a sua volta catalizza la precipitazione del ferro in biofilm, sviluppando così formazioni mucolitiche e accumuli di materiale flottante. Lo spazio disponibile per tale sviluppo microbico si posiziona all'interfaccia tra il soffitto calcareo la sommità dei riempimenti sabbiosi. La fonte per le masse ferrose è ancora da determinare con l'aiuto di metodi isotopici. Tuttavia la fonte primaria per gli ossidi e gli idrossidi di ferro in grotta è generalmente la pirite (ONAC, 2005; HILL & FORTI, 1997).

La breccia della Sala della Grande Colonna

Descrizione del sito

La sala della Grande Colonna ospita una zona di breccia, orientata N20-40°, che è presente anche in tutti i passaggi orientati in questa direzione. Molti indicatori di flusso ipogenico sono presenti lungo le pareti e nei riempimenti sedimentari delle gallerie. Questi indicatori morfo-sedimentari sono direttamente connessi alla biomineralizzazione ferruginosa. Queste ultime si concentrano al contatto tra i riempimenti sabbiosi e la roccia incassante carbonatica e nei vuoti che non sono stati riempiti di sedimenti (Fig. 17). Questi vuoti mostrano morfologie particolari quali cupole (Fig. 9), mensole orizzontali a canali parietali subverticali (Fig. 12-13). I differenti indicatori sono in sequenza morfologica e sedimentologica.

15). This filling fills the horizontal notches, which indicates the proximity of the base level during the gallery development. Above this filling, corrosion features are developing such as ceiling channels and cupolas.

According to these features and to the sand filling originating from the molasses, a paragenetic process of passage development is likely. Additionally, on top of the laminated sand sequence the reworked sand, which plugs the hydraulic breccia and the vertical channel, shifts upwards to ferruginous crusts and eventually to plumes of ferruginous biomineralizations filling the cupolas.

A gaseous phase in isolated cupolas connected to the plume mineralizations is possible.

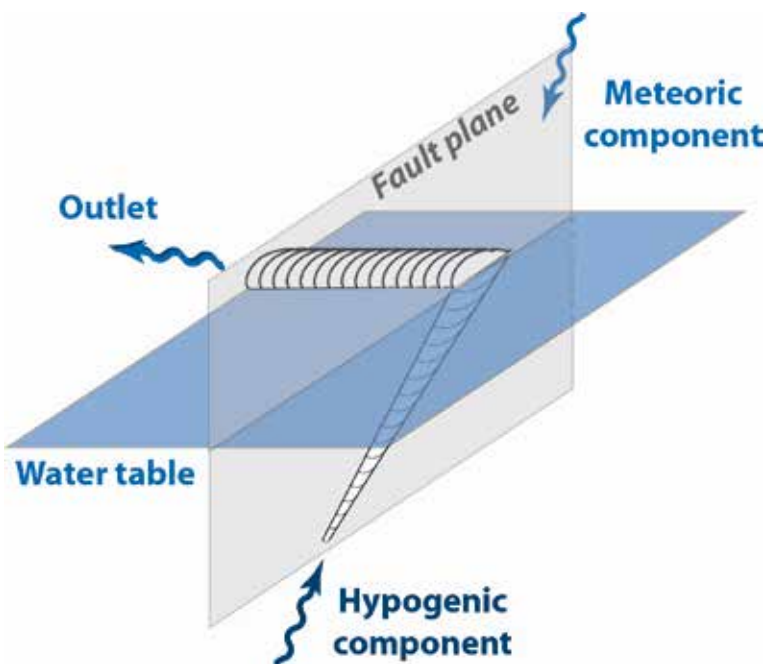


Fig. 18 - Hypogenic speleogenesis. Hypogenic flow rises along a fracture. The mixing with meteoric water boosts dissolution and passage widening, especially in a gallery close to the water table. Ferruginous mineralizations concentrated in this active mixing zone. / Speleogenesi ipogenica. Il flusso ipogenico risale lungo una frattura. La miscela con l'acqua meteorica favorisce la dissoluzione e il conseguente allargamento dei condotti, soprattutto in una galleria vicina alla superficie piezometrica. I depositi ferrosi si concentrano in questa zona di miscela.

La loro distribuzione è controllata dal flusso ipogenico, che prima risale dalla zona di breccia quindi lungo i canali parietali fino a che questi non si aprono a formare le cupole dove le biomineralizzazioni ferruginose si sviluppano in forma di plume. Il passaggio del flusso ipogenico è indicato nei riempimenti che sigillano gli elementi della breccia (Fig. 14), i canali parietali, le mensole e le strutture verticali che si sviluppano attraverso i riempimenti sabbiosi laminati (Fig. 15).

Analisi morfo-sedimentarie

Tra la Sala delle rudiste e la Grande Colonna, la Galleria Est mostra evidenze morfologiche che permettono di risalire alle direzioni di flusso dei fluidi ipogenici (Fig. 16). La breccia che si trova al fondo della galleria mostra un cemento sabbioso alloctono rimaneggiato dalla sabbia stratificata che riempie gran parte della grotta. Questa breccia si sviluppa attorno alla zona di faglia e corrisponde alla propagazione dell'aureola, creata dal flusso ipogenico lungo le fessure.

Questo flusso gradualmente aumenta la trasmissività della breccia e alla fine la sua occlusione. Tali breccie sono definite breccie idrauliche di origine carsica (Fig. 14). Il cemento alloctono mette in evidenza che esse sono direttamente correlate al flusso carsico.

Sopra la zona di breccie idrauliche la sabbia rimobilizzata ha creato una struttura simile ad un canale dentro il riempimento sabbioso stesso (Fig. 15).

Questo deposito riempie le mensole orizzontali, che indicano la prossimità della superficie piezometrica durante lo sviluppo della galleria. Sopra questo riempimento si stanno sviluppando canali di volta e cupole.

Sulla base di queste ultime forme e del fatto che i riempimenti sabbiosi derivano dalle molasse, è molto probabile che questi ultimi passaggi siano paragenetici. Inoltre, sulla sommità della sequenza sabbiosa stratificata la sabbia rimobilizzata, che riempie la breccia idraulica e il canale verticale, si trasforma poi in croste ferruginose e infine in plume di biomineralizzazioni ferrose che riempiono le cupole. Pertanto è possibile che sia esistita una fase aerata all'interno delle cupole isolate in cui le plume si sono sviluppate.

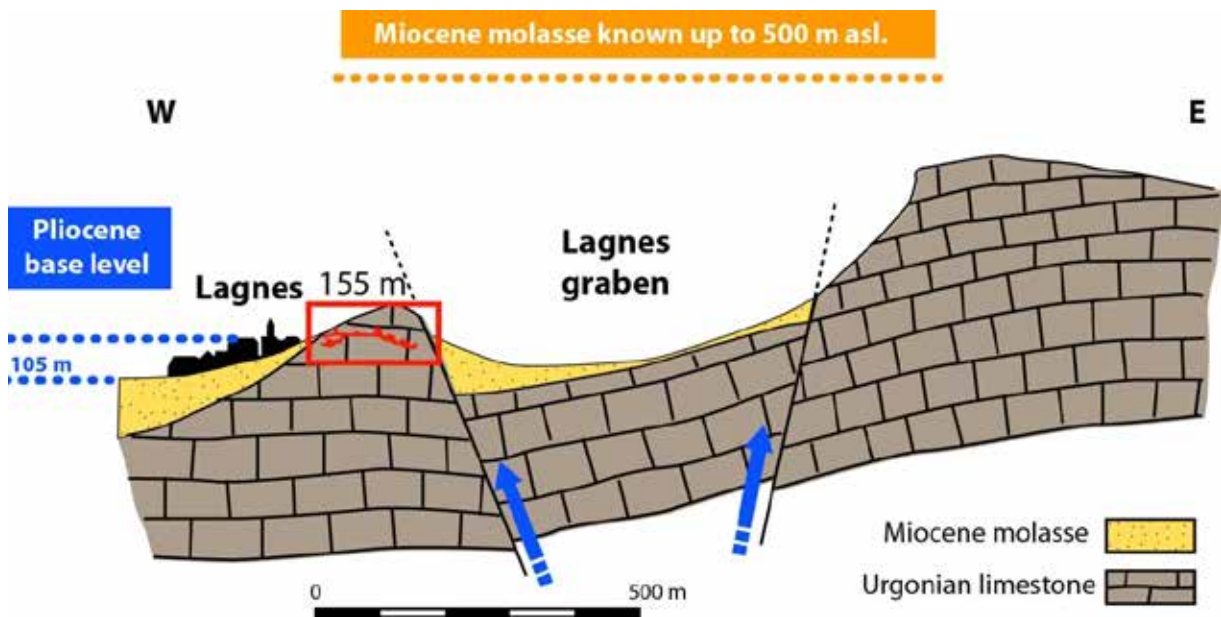


Fig. 19 - Distribution of rising hypogenic flows according to structural and paleogeographic setting. Hypogenic flows (blue arrows) rise along the boundaries of a small Lagnes rift and mix with meteoric water close to the water table, producing physical and chemical changes allowing the deposition of the ferruginous ore. / *Distribuzione dei flussi ipogenici in risalita in funzione alle condizioni strutturali e paleogeografiche. I flussi ipogenici (frecche blu) risalgono lungo i confini di un piccolo rift di Lagnes e si miscelano con le acque meteoriche vicino alla superficie piezometrica, inducendo così variazioni chimico-fisiche che comportano la deposizione del giacimento di ferro.*

Discussion

Interpretation at the scale of the Piei mine cave

The transgressions of Miocene or Pliocene confined a karst aquifer, previously karstified during the Miocene pre-transgressive low levels. Along the confining edge of the locally captive aquifer, mineralized hypogenic flows were rising along the faults of the small Lagnes rift (Fig. 19), and consequently developed the Piei mine cave.

The Piei Cave level corresponds to the altitude of the Pliocene shoreline, identified at 100-120 m altitude (GILLI & AUDRA, 2004). The notches and the paragenetic ceiling developing at the altitude of 135 m match with this Pliocene period (Fig. 19).

In the neighborhood, a similar notch is present in the Espérelles Mine-Cave at 155 m altitude; the elevation difference could be explained by a relative motion of the eastern compartment of the Lagnes rift.

In the Piei mine cave, the ferruginous deposits concentrated at this elevation in turn indicate a shallow phreatic context, close to the water table, where rising hypo-

Discussione

Interpretazione alla scala della Grotta-Miniera di Piei

Le trasgressioni del Miocene e del Pliocene hanno confinato un acquifero carsico, che, durante il Miocene era stato precedentemente carsificato nel periodi di basso livello di base. Fluidi ipogenici mineralizzati risalendo lungo le faglie del piccolo rift di Lagnes (Fig. 19) al bordo dell'acquifero localmente confinato hanno dato luogo alla Grotta-miniera di Piei. Il livello della Grotta miniera di Piei corrisponde all'altezza della linea di riva Pliocenica, identificata a 100-120 m di altezza (GILLI & AUDRA, 2004). Le mensole e le gallerie paragenetiche che si sviluppano a 135 m sono in accordo con questo periodo Pliocenico (Fig. 19). Nelle vicinanze, una mensola simile è presente nella Grotta-miniera di Espérelles a 155 m di altezza; questa differenza di quota potrebbe essere spiegata da un movimento relativo del compartimento a Est del rift di Lagnes. D'altra parte, nella Grotta-miniera di Piei i depositi ferruginosi che concentrano a questo livello indicano un contesto epifrea-

genic flows and meteoric infiltrating water could mix (AUDRA & HOFMANN, 2004) (Fig. 18).

However, all neighboring caves with ferruginous mineralization are located at a higher elevation, up to 450 m asl. (Tab. 1, Fig. 1).

And beyond, at the far reaches of the Vaucluse Plateau, their elevation reaches 700 m asl., up to 1350 m asl. for the most distant one (Baume de l'Or).

Such elevations far above the Pliocene base level obviously indicate older hypogenic processes. Otherwise, the Burdigalian sand filling present in Piei and Chat mine caves suggests either that both caves were already present when the Burdigalian transgression occurred, or that the sand has been subsequently reworked and injected in the cave during a continental erosional phase of the covers.

Indeed, the eustatic oscillations, associated to large uplifts during the Miocene and evidenced by entrenched then fossilized valleys (7 oscillations identified from Burdigalian to Tortonian, BESSON, 2005), could also explain the development of the Piei mine cave level, together with the confinement of a captive aquifer able to maintain mineralized hypogenic flows.

Pending more precise chronological data, we can postulate that the Piei mine cave could have developed at the beginning of the Miocene, and later filled with sand during the Burdigalian transgression.

The hypogenic activity could have been contemporaneous with the confinement linked to one or several Miocene transgressions.

The paragenetic features correlated to the Pliocene base level would show that the cave was still active at this time, either with ongoing hypogenic flows or with only meteoric flows.

Interpretation of the hypogenic activity related to the paleogeography of the Vaucluse Plateau

The hypogenic caves with ferruginous mineralization of the Vaucluse Plateau are located in peripheric areas, along major faults, and at elevations increasing with distance with the SW corner, the lowest spot of the massif where the present drainage converges. Since they are connected to

tico, vicino al superficie piezometrica, dove la risalita di flussi ipogenici e le acque di infiltrazione meteorica potevano mescolarsi (AUDRA & HOFMANN, 2004) (Fig. 18). Tuttavia tutte le grotte con depositi ferrosi nelle vicinanze si trovano a quote superiori, fino a 450 m slm. (Tab. 1, Fig. 1) e più lontano, quasi al bordo dell'altopiano di Vaucluse, la loro quota è attorno ai 700 m, raggiungendo i 1350 per quella più lontana (Baume de l'Or). Ovviamente queste quote, ben al di sopra del livello di base Pliocenico, indicano l'esistenza di un processo ipogenico più vecchio. D'altro canto, il riempimento sabbioso Burdigaliano delle grotte-miniera di Piei e di Chat suggerisce che ambedue queste cavità dovessero già esistere quando si ebbe la trasgressione Burdigaliana o che la sabbia sia stata successivamente rielaborata e iniettata in queste grotte durante un periodo di erosione continentale delle coperture. Certo anche le oscillazioni eustatiche, associate a grandi sollevamenti avvenuti durante il Miocene e testimoniati da valli fossili sottoescavate (7 oscillazioni sono state identificate dal Burdigaliano al Tortoniano, BESSON, 2005) possono spiegare non solo lo sviluppo del livello della grotta-miniera di Piei ma anche il confinamento di un acquifero capace di mantenere attivi flussi ipogenici mineralizzati. In attesa di disporre di più precisi riferimenti cronologici, noi possiamo supporre che la grotta-miniera di Piei si possa essere sviluppata all'inizio del Miocene e poi sia stata riempita di sabbia durante la trasgressione Burdigaliana. L'attività ipogenica potrebbe essere stata contemporanea con il confinamento legato a una o più trasgressioni Mioceniche. Le forme paragenetiche correlate al livello di base Pliocenico sembrerebbero indicare che la grotta era ancora attiva in questo periodo, con flussi ipogenici attivi o solamente con flussi di acqua meteorica

Interpretazione dell'attività ipogenica in relazione alla paleogeografia dell'altopiano di Vaucluse

Le grotte ipogeniche con mineralizzazioni di ferro dell'altopiano di Vaucluse si trovano nella sua periferia, lungo le faglie maggiori, e a quote via via maggiori a partire dall'angolo di SO, che corrisponde al punto più basso del massiccio dove converge attualmente il drenaggio attuale. Poiché le

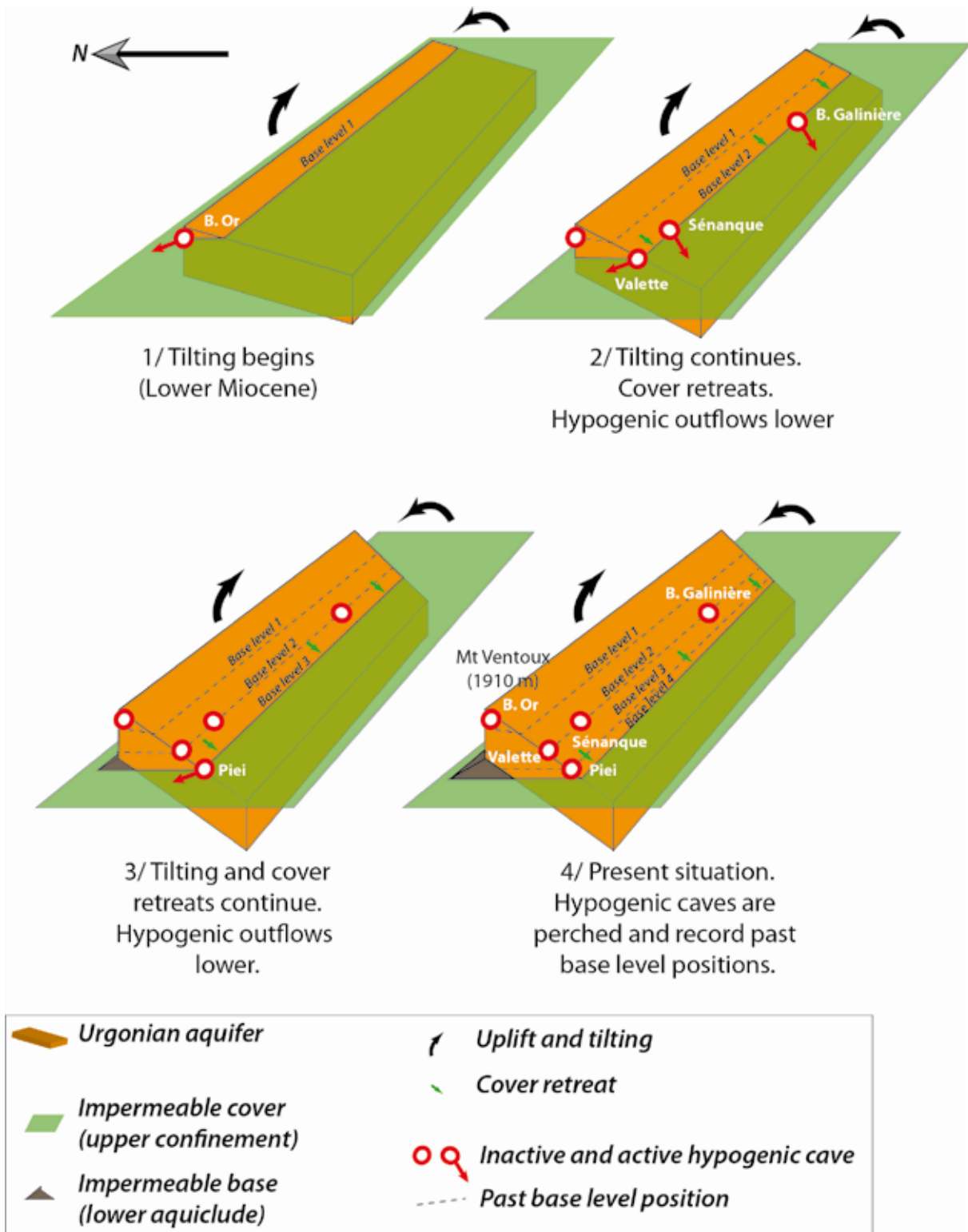


Fig. 20 - Conceptual model of hypogenic caves containing ferruginous ores, according to the uplifting and tilting of the Vacluse block since the Miocene. The hypogenic caves locate at the topographic intersection between the karst aquifer and its cover. The caves record the successive positions of the base level and the boundaries of cover outcrops during their retreat. Since the Miocene, the cave location tends to lower and to shift toward the SW at the lowest point of the plateau. / *Modello concettuale delle grotte ipogeniche che ospitano depositi ferrosi sulla base del sollevamento e inclinazione del blocco di Vacluse a partire dal Miocene. Le grotte ipogeniche si trovano nell' intersezione topografica tra il bordo dell'acquifero carsico e la sua copertura. Le grotte hanno registrato le successive posizioni del livello di base ai confini tra le coperture durante il loro arretramento. Dal Miocene le grotte tendono ad abbassarsi di quota e a spostarsi verso SO dove si trova il punto più basso dell'altopiano.*

the base level position, one can infer the following deductions:

- 1/ according to the topographic gradient lowering toward SW, remote caves to the N or to the E locate at higher elevations than their contemporaneous equivalent located closer to the SW corner. Since the merging in a unique catchment, depending on the Fontaine de Vaucluse, probably occurred only in the Messinian, it is difficult to establish chronological relationships between two distant caves, which could be contemporaneous or of different age and which could have evolved in different settings regarding their catchment, their outflow, and their base level position, respectively.

- 2/ However, in a given area, the higher the elevation is, the older the caves should be. Such a rule, based on the continuous uplifting trend, must however be carefully considered, because of the various elevations reached by the successive Miocene transgressions, which have provoked base level rises.

- 3/ Their activity in the vicinity of the base level focuses their location close to the topographic boundary between the aquifer and its confinement, or at least under a shallow cover, which could have been crossed by hypogenic flows along some faults (AUDRA *et alii.*, 2010). Consequently, such hypogenic caves not only record the base level positions contemporaneous to their activity but also the limit of the contemporaneous outcrop of confining covers.

Since the tectonic trend of the Vaucluse Plateau is characterized by uplifting and tilting that accommodate the N-S then the E-W shortening from Miocene onwards (CHAMPION *et alii.*, 2000; LE PICHON *et alii.*, 2010), one can infer that the uplifting first concerned the Ventoux-Lure crest and then propagated to the south, with a corresponding gradual withdrawal of the covers (Fig. 20).

Each stage corresponding to a stop in uplifting and its correlated base level stabilization and cover withdrawal, is recorded by the presence of hypogenic caves with ferruginous mineralizations. However, the chronology of these successive phases still remains uncertain.

cavità sono collegate al livello di base locale si possono fare le seguenti deduzioni:

- 1/ *dato che il gradiente topografico degrada verso SO, le cavità che si trovano alla periferia N o E devono trovarsi ad un'altezza maggiore delle cavità coeve posizionate più vicino all'angolo di SO. Poiché la confluenza in un unico sistema, quello della Fontana di Vaucluse, avvenne probabilmente solo nel Messiniano, è difficile stabilire rapporti cronologici tra due grotte distanti tra loro, che quindi possono indifferentemente avere la stessa età o no e che possono essere evolute in una condizione di alimentazione, di risorgenza e del loro livello di base relativo.*

- 2/ *Tuttavia in una data area più alta è la quota più antica dovrebbe essere la grotta. Questo postulato, basato su un trend continuo di sollevamento, deve essere valutato con molta cautela, anche in funzione delle differenti quote raggiunte dalle successive trasgressioni Mioceniche, che ovviamente hanno causato innalzamenti del livello di base.*

- 3/ *La loro evoluzione in prossimità del livello di base mette in evidenza la loro localizzazione vicino ai confini topografici tra l'acquifero e le formazioni che ne causano il confinamento, dato che solo una sottile copertura di queste formazioni impermeabili potrebbe essere stata attraversata dei flussi ipogenici lungo alcune faglie (AUDRA *et alii.*, 2010). Conseguentemente queste grotte ipogeniche non solo hanno registrato il livello di base al tempo del loro sviluppo, ma anche il limite di affioramento delle coperture impermeabili. Poiché il trend tettonico dell'altopiano di Vaucluse è caratterizzato da un sollevamento e una rotazione che spiega gli accorciamenti N-S e quindi, dal Miocene in avanti, E-O (CHAMPION *et alii.*, 2000; LE PICHON *et alii.*, 2010), si può dedurre che il sollevamento ha interessato prima la cresta Ventoux-Lure e quindi si è propagato verso Sud, con un corrispondente graduale arretramento delle coperture (Fig. 20). Ogni stadio corrispondente a uno stop nel sollevamento e conseguentemente la stabilizzazione del livello di base sono puntualmente registrati dalla presenza di grotte ipogeniche con mineralizzazioni ferrose. Tuttavia la cronologia di queste fasi successive è ancora incerta.*

Conclusion

The Piei mine cave owes its origin to hypogenic rising flows, focused along the Salon-Cavaillon fault, at the boundary of the upper confinement of the Urgonian aquifer. Deep reduced water transporting iron rose up along faults and karstified hydraulic breccia.

At shallow depth below the water table, the mixing of hypogenic flow with meteoric water caused the cave to develop and the ferruginous sediments to deposit.

The role of microbial activity is evidenced in the upper oxygenated zone with ferruginous facies, such as poolfingers and mucoliform concretions.

The timing of Neogene hypogenic activity requires some refining, but could roughly be placed between Miocene and/or Pliocene. More generally, using other sites in the periphery of the Vaucluse Plateau, one can infer that their location depends on hypogenic rising flows, which are systematically focused at the intersection between major faults and the aquifer's upper confinement limits. Such occurrence is also a guide for investigation of hypogenic caves in the field.

The identification of such hypogenic caves, which record base level positions and aquifer confinement limits, both contemporaneous to their activity, is essential, on one hand for the characterization of paleogeographic reconstructions, and on the other hand for the quantification of the uplifting stages.

The way of dating these hypogenic caves is still under investigation. Moreover, a detailed study of the mineralizations and of the microbial facies would allow a better characterization of the physical and chemical environment, of the speleogenetic conditions, and of the role of microbial communities – simple opportunistic hosts or catalysts of the speleogenetic processes? Finally, the Piei mine cave also represents a strong element of the proto-industrial mining patrimony, integrated to the historical regional metal-working industry.

This mining activity often used places in karst caves, the Piei mine cave being the most significant, by the extension of passages revealed by extraction, by the characteristics of the still present mineralizations, and by the remnants of nicely visible

Conclusioni

La grotta-miniera di Piei deve la sua genesi a flussi ipogenici in risalita, essenzialmente lungo la faglia Salon-Cavaillon, al confine superiore del confinamento dell'acquifero Urgoniano. Acque riducenti profonde contenenti ferro risalgono lungo le faglie e le brecce idrauliche carsificate. Poco al di sotto del livello piezometrico la miscela delle acque ipogeniche con quelle di infiltrazione meteorica ha causato sia un allargamento della cavità sia la deposizione di sedimenti ferruginosi. Il ruolo dell'azione microbica è evidente nella parte superiore ossigenata con facies ferrose quali i poolfinger e le concrezioni mucolitici. La cronologia dell'attività ipogenica nel Neogene necessita ancora di essere meglio definita tra il Miocene e il Pliocene. Più in generale, utilizzando anche altri siti periferici dell'altopiano di Vaucluse, si può ricavare che la loro localizzazione dipende dai flussi di risalita delle acque ipogeniche, che si osservano sempre all'intersezione delle principali faglie e i limiti superiori del confinamento dell'acquifero. Questo permette di fornire una guida per la ricerca di grotte ipogeniche sul terreno. L'identificazione delle grotte ipogeniche, che corrispondono a livelli di base locali e a limiti di confinamento sempre contemporanei al loro sviluppo, è fondamentale sia per la caratterizzazione delle ricostruzioni paleogeografiche sia per la definizione quantitativa della velocità di sollevamento.

Il modo di datare queste grotte ipogeniche è ancora allo studio. Inoltre, una analisi dettagliata delle mineralizzazioni e delle facies microbiche potrebbe permettere una migliore caratterizzazione dell'ambiente chimico-fisico, delle condizioni in cui la speleogenesi si è sviluppata e del ruolo che le associazioni microbiche (semplicemente opportuniste o catalizzatori dei processi speleo genetici?). Infine la grotta-miniera di Piei rappresenta anche un importante esempio di patrimonio minerario del periodo proto-industriale, integrato nella storia dell'industria regionale di trasformazione dei metalli. Questa attività mineraria ha utilizzato spesso aree di grotte carsiche, di cui la grotta-miniera di Piei è la più importante, per la dimensione delle gallerie svuotate dallo scavo minerario, per le caratteristiche delle mineralizzazioni ancora presenti e per le tracce ancora ben visibili

crafty techniques.

Acknowledgements

L. Bruxelles for the Vaucluse DEM; A. Couturaud for having highlighted this astonishing cave, for the common field work, and for thorough remarks; J.-L. Guendon for the detailed review of the text.

delle tecniche estrattive utilizzate.

Ringraziamenti

Si ringrazia L. Bruxelles per il DEM di Vaucluse; A. Couturaud per avere notato questa straordinaria grotta, per il lavoro comune sul terreno, e per le utili discussioni; J.-L. Guendon per la revisione del testo.

References / Citazioni bibliografiche

- 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 [Accepted]
- AUDRA P. & HOFMANN B. A., (2004), *Les cavités hypogènes associées aux dépôts de sulfures métalliques (MVT)*. Le Grotte d'Italia 5, pp. 35-56.
- AUDRA P., MOCOCHAIN L., CAMUS H., GILLI E., CLAUZON G. & BIGOT J.-Y., (2004), *The effect of the Messinian Deep Stage on karst development around the French Mediterranean*. Geodinamica Acta 17 (6), pp. 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 181 (4), pp. 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*. Thèse, École des Mines, Paris, 357 p.
- 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., VON SALLIS K., 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 337, pp. 1045-1054.
- BESSON D., BORGOVINI R., CONESA G., CORNÉE J.-J., DEMORY F., DEXCOTÉ Y., DUVAİL C., GALLONI 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. (Ed.), *Grottes et karsts de France*. Association Française de Karstologie, Karstologia Mémoires 19, pp. 232-233.
- BOTTRELL S., (2004), *Sulfide minerals in karst*. In: Gunn J. (Ed.), *Encyclopedia of Caves and Karst Science*, Fitzroy Dearborn, London, pp. 713-714.
- BUFFARD R., (1993), *Les gisements de fer de la région de Kisanga (Shaba méridional, Zaïre), colmatages d'un paléokarst du Protérozoïque supérieur*. Karstologia 21, pp. 51-55.
- CHAMPION C., CHOUKROUNE P. & CLAUZON G., (2000), *La déformation post-Miocène en Provence occidentale*. Geodinamica Acta 13, pp. 67-85.
- COUTURAUD A., (1992), *Les cavités du Comtat venaisien (Vaucluse)*. Spelunca 45, pp. 25-32.
- COUTURAUD A., (1993), *Hydrogéologie de la partie occidentale du système karstique de Vaucluse (karstification et aquifère sous couverture)*. Thèse, Université d'Avignon, 161 p.
- DE WAELE J. & NASEDDU A., (a cura di) (2005), *Le grotte di Miniera. Tra economica mineraria ed economica turistica*. Memorie dell'Istituto Italiano di Speleologia, 2(17) (Convegno « Le grotte de miniera », Monteponi 2004), 200 p.
- DZUNLYŃSKI S. & SASS-GUTKIEWICZ M., (1989), *Pb-Zn ores*. In: Bosák P., Ford D.C., Glazek J. & Horáček J. (Ed.), *Paleokarst: a systematic and regional review*, Elsevier, Amsterdam & New York, pp. 377-397.
- FILIPPOV A.G., (2004), *Mineral deposits in karst*. In: Gunn J. (Ed.), *Encyclopedia of Caves and Karst Science*, Fitzroy Dearborn, London, pp. 514-515.
- FORD D.C., (2006), *Karst geomorphology, caves and cave deposits: A review of North American contributions during the past half century*. In: Harmon R.S. & Wicks C.W., (Eds.), *Perspectives on karst geomorphology, hydrology and geochemistry*. GSA Spec. Paper 404, Boulder, Colorado, pp. 1-14.
- FORTI P., (2005), *L'importanza scientifica delle « grotte di miniera »*. Memorie dell'Istituto Italiano di Speleologia 2(17) (Convegno « Le grotte de miniera », Monteposi 2004), pp. 15-22.
- GAUCHON C., (1991), *Mise en valeur et exploitation traditionnelles des ressources du karst souterrain dans le Sud-Est de la France*. Karstologia 17, pp. 11-18.
- GAUCHON C., (1997), *Des cavernes et des hommes*. Karstologia Mémoires 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 336 (16), pp. 1481-1489.
- GAUBERT G. & LEFALHER B., (1995), *Les arcanes de Vaucluse, Hydrologie et spéléologie des territoires alimentant en eau la fontaine de Vaucluse*, AREHPA 2, 338 p.
- 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, 337 (3), pp. 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 62 (2), pp. 60-71.
- HILL C. & FORTI P., (1997), *Cave minerals of the world*, National Speleological Society, Huntsville, 464 p.
- 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, 181 (6), pp. 477-501.
- LOCCI J.-P., (1988), *Fonderies et fondeurs, histoire des établissements métallurgiques aux XIX^e-XX^e siècles*, Assoc. pour la sauvegarde et la promotion du patrimoine industriel en Vaucluse, Avignon, 238 p.
- 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. (Ed.), *Speleogenesis. Evolution of karst aquifers*, National Speleological Society, Huntsville, pp. 473-480.
- MARTEL P., (1951), *Les gorges du Calavon à Oppedette (Basses-Alpes)*. Annales des Basses-Alpes XXXII (187), Société scientifique et littéraire des Alpes-de-Haute-Provence, Digne, pp. 21-28.
- MOCOCHAIN L., AUDRA P. & BIGOT J.-Y., (2011), *Base level rise and Per Ascensum Model of Speleogenesis (PAMS). Interpretation of deep phreatic karsts, vauclusian springs and chimney-shafts*. Bulletin de la Société géologique de France, 182, pp. 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*, Projet collectif de recherches. Vaucluse ; Série Histoire des techniques, Service Régional de l'Archéologie - PNR Lubéron – ERMINA, 140 p.
- ONAC B. P., (2005), *Minerals*. In: Culver D & White W.B. (Ed.), *Encyclopedia of Caves*, Academic Press, New York, pp. 371-378.
- PAREIN R. & LANGUILLE A., (1981), *La Haute-Provence souterraine*, Auto-édition, 422 p.
- 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 27 (6^e Congrès ASF, Montpellier), pp. 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 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*, Geological Society of America, Boulder, Colorado, O-2, pp. 461-483.
- 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 8S23 (« Mines de fer »), pièce non numérotée.