

Grégory DANDURAND¹,
Hubert CAMUS²,
Céline PALLIER¹,
Jean-Yves BIGOT²,
Laurent BRUXELLES^{1 et 3},
Didier CAILHOL¹,
Richard MAIRE⁴
et Yves QUINIF⁵

Speleogenesis challenged by new paradigms

La spéléogénèse à l'épreuve des nouveaux paradigmes

ABSTRACT: New paradigms, new ways of seeing and explaining the origin, evolution and functioning of karst systems have been developed since the beginning of the 21st century. Identifying and interpreting subterranean forms implies to consider the long-term scale of the reservoir, the medium-term scale of the karst network, and the short-term or even very short-term scale of the cave. We note a paradigm change from a speleogenesis limited for a long time to the scale of the network and the massif, towards a paradigm more focused either on the reservoir or on the cave.

KEY WORDS: deep phreatic theory, vadose theory, epigenic system, hypogene karst, ghostrock karstification, biogenic corrosion.

RÉSUMÉ : De nouveaux paradigmes, de nouvelles façons de voir et d'expliquer l'origine, l'évolution et le fonctionnement des systèmes karstiques ont émergé depuis le début du XXI^e siècle. L'identification et l'interprétation des formes souterraines imposent de raisonner de l'échelle du réservoir et du temps long à celle du réseau karstique et du temps moyen jusqu'à celle de la grotte et du temps court, voire très court. L'évolution des connaissances se marque par un glissement de paradigme qui passe d'une spéléogénèse longtemps limitée à l'échelle du réseau et du massif vers une conception davantage centrée soit sur le réservoir soit sur la grotte.

MOTS-CLEFS : creusement phréatique profond, théorie vadose, système épigène, karst hypogène, variations du niveau de base, fantômisation, biocorrosion.

Introduction

The discovery of new caves and the ever-deeper exploration of caves have significantly changed our perception and understanding of the underground world and of karst landscape in general. Speleo-karstogenesis, which is defined as the series of processes, dynamics and morpho-sedimentary forces that determined the formation and evolution of karst networks and caves, is based on the observation of their morphologies and their infillings.

The interpretation of diagnostic formations, forms and microforms has become more complex due to the multiplication of observations at every spatial and temporal scale [Audra, 2010; Camus, 2019]. Indeed, the identification of morphosedimentary features replaced in their morphodynamic framework allows to identify karstification stages according to the dominant successive processes. Nevertheless, if it is true that in rare cases, these processes are linked to a relatively simple "monogenic" story (i.e., hypogenic or cryptokarstic), it is commonly accepted that most of the time, karstification is associated with a multiphase story, included in the temporality of geological

Introduction

La découverte de nouvelles cavités et l'exploration toujours plus profonde des grottes ont considérablement modifié notre perception et notre compréhension du monde souterrain et du karst d'une manière plus globale. La spéléo-karstogénèse, qui se définit comme l'ensemble des processus, des dynamiques et des moteurs morphosédimentaires qui ont présidé à la formation et à l'évolution des réseaux karstiques et des grottes, repose sur l'observation de leurs morphologies et de leurs remplissages.

La caractérisation et l'interprétation des remplissages, des formes et des microformes diagnostiques se sont complexifiées du fait de la multiplication des observations à toutes les échelles géographiques et temporelles [Audra, 2010 ; Camus, 2019]. En effet, l'identification des marqueurs morphosédimentaires replacés dans leur cadre morphodynamique permet de diagnostiquer des étapes de karstification en fonction des processus successifs dominants. Néanmoins, s'il est vrai que dans de rares cas, ces processus sont liés à une histoire « monogénique » relativement simple (i.e. hypogène ou cryptokarstique), il est couramment

(1) Inrap, UMR 5608 TRACES CNRS-Université Jean Jaurès, Maison de la Recherche, 5 allées A. Machado, 31058 Toulouse Cedex 9, France. gregory.dandurand@inrap.fr, celine.pallier@inrap.fr, laurent.bruxelles@inrap.fr, didier.cailhol@inrap.fr.

(2) Association Française de Karstologie. hubert.camus@cenote.fr, jeanbigot536@gmail.com.

(3) GaeS, Université du Witwatersrand, Johannesburg, Afrique du Sud

(4) UMR 5319 Passages CNRS- Université de Bordeaux-Montaigne, Maison des Suds, 12 Esplanade des Antilles, 33600 Pessac, France. richard.maire49@gmail.com.

(5) Équipe Spéléo du Centre et de Mons (ESCM), Department of Geology & Applied Geology, Faculty of Engineering, Université de Mons, 9, rue de Houdain, 7000 Mons, Belgium. yves.quinif2@gmail.com.

and environmental evolutions, which implies a complex record of successive speleo-karstogenic stages. Basically, this story begins long timescales with deep alterations at the scale of the reservoir, then with the incision and erosion of the superficial covers (i.e. variation of the base levels and the development of erosion surfaces), the drainage networks are vertically structured and spatially organized at the scale of the massif and of the karstic system in the mid-term – or even in the short term in the case of the removal of ghostrock – and it ends after the abandonment of this “hydrogeologically active” functioning. Therefore, the evolution of the caves as “fossil” caves depends on processes linked to the modification of the conditions of connection with the surface, in particular because of the intersecting of the underground voids by the erosion of the topographic surface during the mid- to short time (i.e., collapse of the walls...). These three stages of karstification can follow one another, overlap, coexist or be repeated several times during the geological and geomorphological evolution of karstic massifs.

I. Classical speleogenic models of karst flow organization: time of the networks scale

“Classical” theories of speleogenesis and flow organization in caves have focused mainly on the organization of networks in epigenic systems [Jakucs, 1977; Bögli, 1980; Palmer, 1991; Ford & Williams, 2007; Audra & Palmer, 2011; Klimchouk, 2015]. They are all based on the idea that most karst systems are created by the infiltration and dissolution of CO₂-rich waters of meteoric origin (the vadose theory) from the surface [Cvijić, 1918]. Their circulations imply a hydraulic and hydrochemical potential, spatially bounded by a recharge zone and a restitution zone, and which manifests itself in a great diversity of style of spatial organization and vertical structuring of networks.

If, at first, the idea of dissolution by flowing water prevailed [Martel, 1928], very soon the theories based on the presence of a phreatic zone, an idea supported by Grund since 1903, became dominant: deep phreatic theory by Davis [1930], intervention of sedimentation phenomena by Bretz [1942]. Other authors adapted this model, focusing on the efficient dissolution more or less close to the piezometric surface [see Corbel, 1951]. The model of Swinnerton [1932] suggesting that the development of karst passages must take place near the surface of the water table (water-table cave theory) has had a strong influence [Mangin, 1975; Dreybrodt, 1987]. In this way, it has made it possible to propose a correlation between the position of the local base-level and the position of the water-table in the evolution of the drainage system [White, 1989]. One should note the interest of this model for syn- or paragenetic epigenic networks [Renault, 1968; Palmer, 2007], allowing the identification of cave levels which recorded geodynamic events such as the incision of valleys induced by tectonic surrection or variations in base-level [Palmer, 1987; Audra *et al.*, 2001 and 2007; Jaillot *et al.*, 2002; Hez *et al.*, 2015; Harmand *et al.*, 2017].

Another model that has prevailed is the Four-State Model [Ford & Ewers, 1978], which associates the

admis que la plupart du temps, la karstification est associée à une histoire polyphasée, inscrite dans la temporalité des évolutions géologiques et environnementales, qui implique un enregistrement complexe de phases successives spéléo-karstogéniques. Schématiquement, cette histoire débute sur le temps long par des altérations profondes à l'échelle du réservoir, puis avec l'incision et l'érosion des couvertures (i.e. les variations du niveau de base et la mise en place des surfaces d'érosion), les réseaux de drainage se structurent verticalement et s'organisent spatialement à l'échelle du massif et du système karstique sur le temps moyen (de plusieurs Ma à quelque 100 ka) – voire court (< 100 ka) dans le cas de la vidange de fantômes –, et elle s'achève après l'abandon de ce fonctionnement « hydrogéologique actif ». Dès lors l'évolution des cavités en tant que grottes dites « fossiles » dépend de processus liés à la modification des conditions de connexion avec la surface, notamment en raison du recoupement des vides souterrains par l'érosion de la surface topographique sur le temps moyen à court, voire très court (i.e. écroulement de parois...). Ces trois temps de la karstification peuvent se succéder, se surimposer, se côtoyer ou se répéter à plusieurs reprises au cours de l'évolution géologique et géomorphologique des massifs karstiques.

I. Les modèles spéléogéniques classiques d'organisation des écoulements karstiques : le temps des réseaux

Les théories « classiques » de la spéléogénèse et de l'organisation des écoulements dans les cavités se sont principalement focalisées sur l'organisation des réseaux au sein des systèmes épigènes [Jakucs, 1977 ; Palmer, 1991 ; Ford & Williams, 2007 ; Audra & Palmer, 2011 ; Klimchouk, 2015]. Elles reposent toutes sur l'idée que la plupart des systèmes karstiques sont creusés par l'infiltration des eaux météoriques chargés en CO₂ (la théorie vadose) [Cvijić, 1918]. Leurs circulations supposent une perméabilité initiale du substrat et un potentiel hydraulique et hydrochimique, contraint spatialement par une zone de recharge et une zone de restitution, et qui se traduit par une grande diversité de style d'organisation spatiale et de structuration verticale des réseaux.

Si dans un premier temps, l'idée d'un creusement par les eaux courantes a prévalu [Martel, 1928], très vite les théories basées sur l'existence d'une zone phréatique, idée soutenue par Grund dès 1903, se sont imposées : creusement phréatique profond (*deep phreatic theory*) de Davis [1930], intervention des phénomènes de sédimentation de Bretz [1942]. D'autres auteurs réajustèrent ce modèle, en insistant sur un creusement effectif plus ou moins éloigné de la surface piézométrique [Corbel, 1951]. Le modèle de Swinnerton [1932] proposant que le développement des conduits karstiques doit avoir lieu près de la surface de la nappe phréatique (*water-table cave theory*) a eu une influence durable [Mangin, 1975 ; Dreybrodt, 1987]. Il a permis dans ce sens l'idée d'une corrélation entre la position du niveau de base local et la position de la nappe phréatique dans l'évolution du système de drainage [White, 1989]. On notera l'intérêt de ce modèle pour expliquer le creusement des réseaux épigènes, syn- ou paragénétiques



Photo 1 : Cave of Barrage (Saint-Anastasio, Gard). Lateral bench and roof channel clearly attest to a paragenetic evolution. Grotte du Barrage (Saint-Anastasio, Gard). Banquette latérale et chenal de voûte attestent clairement d'une évolution paragenétique. Photo J.-Y. Bigot

permeability of the karstified massif with the geometry of the passages in the phreatic and epiphreatic zones. An alternate model has been proposed [Häuselmann *et al.*, 2003; Audra, 2007; Audra & Palmer 2011 and 2013] highlighting the significance of erosion in the epiphreatic zone, which is much more important than in the vadose zone.

All these models are coupled and adjusted according to a question that mainly focuses on karst systems at the massif scale. The models do not take into account a possible superposition of the network to a previous deep alteration pattern or to previous paleokarst structures that could have modified the permeability of the massif by the creation of prior voids. But what about the microforms of detail? What about the morphologies which do not offer a suitable explanation? How to integrate this speleogenesis on the longer time scale of the reservoirs? There are still missing pieces to complete the puzzle.

II. Paradigm shifts

Four main models have been developed during the last twenty years. They have significantly renewed the analysis of the processes at the origin of caves or of some karst dynamics or morphologies. Other geological scales have also been promoted: that of the reservoir and that of the cave.

A. The model of extreme base-level variations: the Messinian Salinity Crisis example

Regional geological features have led to theories that take this into account specifically. The most studied in France is the karstification resulting from the Messinian Salinity Crisis which stemmed from a significant drop of the Mediterranean sea level (about 2,000 m) between 5.60 and 5.46 Ma [Clauzon, 1982]. As a consequence of the deep topographic depression, the tributary karstic

[Renault, 1968; Palmer, 2007]. La water-table cave theory identifie des niveaux de grottes qui, par leur étagement, enregistrent des événements géodynamiques (photo 1) comme l'incision des vallées, induite par la surrection tectonique ou les variations du niveau de base [Palmer, 1987; Audra *et al.*, 2001 et 2007; Jailliet *et al.*, 2002; Hez *et al.*, 2015; Harmand *et al.*, 2017].

Un autre modèle qui s'est démarqué est le *Four-State Model* [Ford & Ewers, 1978], qui associe la perméabilité du massif karstifié à la géométrie des conduits dans les zones noyée et épinoyée. Une alternative à ce modèle a été proposée (Häuselmann *et al.*, 2003; Audra, 2007; Audra & Palmer, 2011 et 2013) mettant en avant la prédominance de l'érosion en zone épinoyée, beaucoup plus importante qu'en zone vadose.

Tous ces modèles se combinent et s'ajustent en fonction d'une problématique essentiellement centrée sur les systèmes karstiques à l'échelle d'un massif. Cependant ils ne prennent pas en compte une éventuelle surimposition du réseau à un maillage d'altération profonde antérieure ou à des structures paléokarstiques préexistantes qui pourraient avoir modifié la perméabilité du massif par l'existence de vides préalables. *Quid* également des microformes de détail? Que dire des morphologies qui ne trouvent pas d'explication satisfaisante? Comment intégrer cette spéléogénèse sur le temps long, celui des réservoirs? Il manque encore des pièces au puzzle.

II. Les changements de paradigme

Quatre modèles principaux ont été développés ces vingt dernières années. Ils ont permis de renouveler considérablement l'analyse des processus à l'origine des cavités ou de certaines dynamiques ou morphologies karstiques. Ils mettent en avant d'autres échelles géologiques : celle du réservoir et celle de la grotte.

drainages became vertical and then evolved by ascending speleogenesis model during the Pliocene transgression [Audra *et al.*, 2004; Mocochain *et al.*, 2006]. The influence of base-level oscillations on the vertical structure of the networks through successive upward floodings and formation of shafts [Camus, 2003; Mocochain *et al.*, 2009, 2011], the *per ascensum* multi-storey structuring of the cave levels through fluvial aggradation and the organization of horizontal karstic underground short-cuts [Bigot, 2011] are both major contributions to that new speleogenic model.

B. Hypogene speleogenesis

Hypogenic speleogenesis involves slow sub-vertical upwelling of flows in the saturated zone (mineralized, hydrothermal or with high salinity and density), more or less aggressive and mineralized, and/or by expulsion of captive fluids along cracks or deep-rooted faults [Klimchouk, 2013 and 2017; Audra and Palmer, 2015].

The processes occurring are related to the introduction of CO₂ from a deep lower hydrostratigraphically unit in areas of metamorphism, magmatic activity, organic matter mineralisation, or H₂S in the presence of sulphates and pyrites which produce sulphides that oxidise to H₂SO₄ by mixing with meteoric water and cooling. These processes result in the formation of often maze-like caves and occur in the mixing zones of hypogenic flows and meteoric waters within the reservoir, near the piezometric surface and at springs [Audra 2007; De Waele *et al.*, 2016].

Even if hypogenic caves are very few and often poorly identified, the morphologies and mineralizations associated with that kind of speleogenesis have made it possible to explain the organization of some particularly representative networks in France (e.g. Grotte du Chat in Daluis, Grotte des Serpents in Aix-les-Bains, Grotte-Mine du Piéi, Grotte des Iboussières, Baume Galinière, Denis Parisi, for other examples see Audra *et al.*, 2008).

C. Ghostrock karstification and its consequences

There is now evidence that ghostrock karstification [Vergari 1997; Quinif 1999 and 2010; Quinif & Brussels, 2011; Laverty, 2012; Dubois *et al.* 2014] in association with deep or cryptokarst developed from buried weathering [Camus 2003; Jaillet, 2005] plays a major role in preparing karst connections within a reservoir.

The alteration of the reservoirs in the phreatic zone occurs both from the surface and from deep circulations [Dandurand *et al.*, 2019]. The connection of a mesh of insoluble porous alteration sediment corridors, left in situ depending on precise geological and hydrostatic conditions, and dissolution breccias at depth determines the heterogeneous and discontinuous permeability of the reservoir. After this long period of geodynamic stability, subterranean voids and conduits suddenly form as the hydraulic gradient conditions (variations in the local base level, glacio-eustatic movements or surrection) allow the opening up of drainage paths towards an exit point. The total removal of several altered corridors organises a real maze-like network depending on different hydrodynamic patterns [Quinif, 2010; Bruxelles and Camus, 2010; Dandurand, 2011]. The flooding of the networks by autogenic or allogenic recharge and/or the aerology

A. Le modèle de variations extrêmes du niveau de base : l'exemple de la crise de salinité messinienne

Des contingences géologiques régionales ont conduit à des théories qui tiennent compte de certaines spécificités géodynamiques. La plus étudiée en France est la karstification découlant de la crise de salinité messinienne en Méditerranée. Suite à l'énorme dépression topographique (environ 2000 m) que représente la Méditerranée, vidée entre 5,60 et 5,46 Ma [Clauzon, 1982], les drainages karstiques tributaires se verticalisent avant de connaître une spéléogénèse de type ascendant lors de la transgression marine au Pliocène [Audra *et al.*, 2004 ; Mocochain *et al.*, 2006]. Le rôle de l'oscillation du niveau de base dans la structuration verticale des réseaux par des mises en charge et creusements ascendants successifs des puits-cheminées [Camus, 2003 ; Mocochain *et al.*, 2009 et 2011], et de l'étagement *per ascensum* des niveaux de grottes par aggradation fluviale et la mise en place de captures karstiques horizontales [Bigot, 2011] sont les apports morphologiques majeurs de ce nouveau modèle spéléogénique.

B. Le modèle de la spéléogénèse hypogène

La spéléogénèse de type hypogène fait intervenir des remontées subverticales lentes de flux dans la zone saturée (minéralisés, hydrothermaux ou de salinité et de densité importante) à partir d'une unité hydrostratigraphiquement plus basse. Ces flux sont plus ou moins agressifs et minéralisés, et se caractérisent par une expulsion de fluides captifs le long de fissures ou de failles, qui s'enracinent profondément dans le socle [Klimchouk, 2013 et 2017 ; Audra et Palmer, 2015].

L'agressivité de l'eau provient des interactions chimiques entre des concentrations plus ou moins fortes de sulfures, sulfates ou dioxyde de carbone dissous, des métaux ou des éléments traces issus des domaines du métamorphisme, d'activité magmatique ou de minéralisation de matière organique. Lors de la remontée des flux, ces échanges provoquent des dissolutions et des précipitations à la rencontre des aquifères sus-jacents. Ces processus aboutissent à la formation de cavités souvent labyrinthiques et se produisent dans des zones de convergence des flux hypogènes et des eaux météoriques au sein du réservoir, près de la surface piézométrique et au niveau des émergences [Audra 2007 ; De Waele *et al.*, 2016].

Même si les cavités hypogènes sont des cas rares et souvent mal identifiés, les morphologies et les minéralisations diagnostiques associées à ce type de spéléogénèse ont permis d'expliquer l'organisation de quelques réseaux particulièrement représentatifs (ex. grotte du Chat à Daluis ; grotte des Serpents à Aix-les-Bains ; grotte-mine du Piéi ; grotte des Iboussières ; baume Galinière ; réseau Denis Parisi ; voir Audra *et al.*, 2008).

C. Le modèle de karstification par fantômisatation et ses conséquences

Il a été démontré que la karstification par fantômisatation [Vergari 1997 ; Quinif 1999, 2010 ; Quinif & Bruxelles, 2011 ; Laverty, 2012 ; Dubois *et al.* 2014] et les altérations profondes ou sous couvertures crypto-karstiques associées [Camus 2003 ; Jaillet, 2005] jouent un rôle déterminant



Photo 2: Steep slope of the Tarn Gorges above the village of Les Vignes (Causse de Massegros, Lozère). Large pockets of alteration in which the initial structure of the rock is preserved. Note the transition from the "healthy" rock to the weathering rock in which we can follow the flint beddings.

Corniche des gorges du Tarn au-dessus du village des Vignes (Causse de Massegros, Lozère). Grandes poches d'altération dans lesquelles la structure initiale de la roche est conservée. On observe le passage de la roche saine vers les altérites dans lesquelles on peut suivre en continuité les lits de chailles.

Photo L. Bruxelles

favour the direct corrosion of the walls and roofs of the passages. Then another story of the speleogenesis begins.

D. Biogenic corrosion: internal evolution of caves

Basically, corrosion due to condensation on cave walls is the result of a physico-chemical process that affects specific parts and sections of galleries depending both on the local aerology (geometry of the cave, open or closed passages, etc.) and on the cave features. At given times, the surface temperature of the walls is colder than the temperature of the air flowing through them. A thin film of condensation water forms on the surface of the wall. This water film is in chemical equilibrium with the partial pressure of carbon dioxide ($p\text{CO}_2$). The slightly acidic solution corroding the limestone is called condensation-corrosion [Gabrovšek et al., 2010; D'Angeli et al., 2018].

For a few years now, biocorrosion, mainly due to the presence of bat roosts in caves, has appeared as a major factor in recent speleogenesis models [Bigot, 2014; Bruxelles et al., 2016; Audra et al., 2018]. The presence of bats and the formation of guano heaps disturb the environment considerably, inducing thermal, chemical and microbiological conditions that are as dynamic as they are aggressive. Their impact is not limited to the sole alteration of the walls, but also to a real modification of the morphology of the whole gallery section by condensation-corrosion and cryptocorrosion buried under guano deposits. This phenomenon can lead to the complete remodelling of the galleries and even to their expansion up to 3 to 4 times the initial volume of the gallery [Audra et al., 2018]. Many of the erosion morphologies observed on the

dans la préparation des connexions karstiques au sein d'un réservoir.

L'altération des réservoirs dans la zone saturée se produit aussi bien à partir de la surface que par des circulations profondes [Dandurand et al., 2019]. La mise en connexion d'un maillage de couloirs d'altérites poreuses plus ou moins insolubles, laissées sur place dans certaines conditions géologique et hydrostatique, et de brèches de dissolution en profondeur conditionne la perméabilité hétérogène et discontinue du réservoir (photo 2). Après ce temps long de stabilité géodynamique, des vides souterrains se forment soudainement dès que les conditions de gradients hydrauliques (variations du niveau de base local, mouvements glacio-eustatiques ou surrection) permettent l'établissement de chemins de drainage vers un exutoire. Le déboufrage de plusieurs couloirs altérés organise un véritable réseau labyrinthique selon différentes modalités hydrodynamiques [Quinif, 2010 ; Bruxelles et Camus, 2010 ; Dandurand, 2011]. La mise en charge des réseaux et/ou l'aérologie autorisent la corrosion directe de l'encaissant. Une autre histoire de la spéléogenèse commence alors.

D. La corrosion d'origine biogénique : l'évolution interne des cavités

En général, la corrosion liée à la condensation sur les parois des grottes résulte d'un processus physico-chimique qui intervient dans certaines parties et portions de galeries en fonction de l'aérologie locale (géométrie de la cavité, orifices ouverts ou fermés, etc.) et de la structure du système spéléologique. À des périodes spécifiques, la température à la surface des parois est plus froide que la température de l'air qui y circule. Il se forme alors une pellicule d'eau de condensation sur des portions de parois. Ce film d'eau est en équilibre chimique avec la pression partielle de dioxyde de carbone ($p\text{CO}_2$). La solution légèrement acide corrode le calcaire. C'est ce processus qui est appelé la corrosion de condensation (*condensation-corrosion* en anglais) [Gabrovšek et al., 2010 ; D'Angeli et al., 2018].

Depuis quelques années, la biocorrosion, due essentiellement à l'occupation des cavités par des colonies de chauves-souris, apparaît comme un facteur de première importance dans les nouveaux modèles de spéléogenèse [Bigot, 2014 ; Bruxelles et al., 2016 ; Audra et al., 2018]. La présence des chiroptères et la constitution de tas de guano modifient radicalement le milieu, en induisant des conditions thermiques, chimiques et microbiologiques aussi dynamiques qu'agressives (photo 3). Leur impact ne se limite pas à la seule altération des parois, mais à une véritable modification de la morphologie de toute la section de la galerie par la corrosion de condensation et la cryptocorrosion sous guano. Ce phénomène peut aboutir au remodelage complet des galeries, voire à leur expansion pouvant atteindre 3 à 4 fois le volume initial du conduit [Audra et al., 2018]. Nombre de morphologies d'érosion sur les concrétions, les parois et les voûtes étaient jusque-là interprétées comme des indices de ré-ennoyage des conduits. La prise en compte de la biocorrosion comme agent de



Photo 3 : Coutach Saltpetre Cave (Sauve, Gard). Tinajitas are corrosion holes due to bat droppings, here drilling a huge broken stalagmitic massif.

Grotte du Salpêtre de Coutach (Sauve, Gard). Tinajitas, cupules de corrosion dues aux déjections de chauves-souris, sur massif stalagmitique.
Photo J.-Y. Bigot

concretions, walls and ceilings were previously interpreted as indicators of re-flooding of the passages. Therefore, taking biocorrosion into account implies a complete revision of speleo-karstological interpretations for caves where we have evidence that they have been used by bats roosts.

These new tools for interpreting cave landscapes are on the way to radically change our knowledge of the evolution of karst reservoirs, speleological networks and caves after the end of their hydrogeological functioning, but also in the fields of archaeology, with the study of wall state-condition and in a taphonomic perspective as well.

III. The Mas d'Azil Cave: new viewpoints, new hypotheses

A good example of the relevance of that new approach integrating all the previous processes is the study of Mas d'Azil Cave in Ariège (Pyrenees), known for the abundance of its Upper Palaeolithic archaeological remains. It was commonly accepted that its network was formed by successive karstic levels, in relation to the downcutting of the Arize valley by the river which flows through it.

During the last few years, a global and interdisciplinary study of the cave has been completed. A detailed geomorphological map has allowed the identification of all the sediment formations, all the morphologies and the wall state-condition. It was completed by a systematic stratigraphy survey and the analysis of the geometric relationships between the different fillings, including the whole archaeological data.

Thanks to the new paradigms that have recently developed, the observed elements have been interpreted in a new way, by assembling them into various indices: the morphology of the karstic loop network associated with the fluvial fillings and the morphologies of aggradation benchmarks, channels and ceiling lapiaz provide evidence for the formation of most of the network by paragenetism,

transformation du milieu souterrain implique donc de revoir totalement les interprétations spéléo-karstologiques dans les tronçons de cavités ayant été occupées par des colonies de chauves-souris.

L'ensemble de ces nouveaux outils d'interprétation des paysages souterrains des grottes sont en passe de bouleverser les connaissances sur l'évolution des réservoirs karstiques, des réseaux spéléogéniques et des grottes après l'abandon de leur fonctionnement hydrogéologique, mais aussi dans les disciplines liées à l'archéologie et à l'étude des états de parois, ou dans une perspective taphonomique.

III. La grotte du Mas d'Azil : nouveaux regards, nouvelles hypothèses

Un exemple particulièrement représentatif de l'importance de ce nouveau regard intégrant l'ensemble de ces processus est l'étude de la grotte du Mas d'Azil, en Ariège, connue pour la richesse de ses vestiges archéologiques du Paléolithique supérieur. Il était classiquement admis que son réseau s'était creusé par étagement karstique, en relation avec l'enfoncement de la vallée de l'Arize, la rivière qui la traverse.

Ces dernières années, une démarche d'étude globale et interdisciplinaire de la grotte a été entreprise. Une cartographie morphokarstique précise a permis d'inventorier toutes les formations sédimentaires, les morphologies et états des parois. Elle a été complétée par le relevé systématique des stratigraphies et l'analyse des relations géométriques entre ces différents remplissages, le tout intégrant l'ensemble des informations archéologiques.

Grâce aux nouveaux paradigmes émergents depuis quelques années, les éléments observés ont été interprétés de façon nouvelle, en les regroupant en faisceaux d'indices : la morphologie du réseau en boucles karstiques associée aux remplissages fluviaux et aux morphologies de banquettes d'aggradation, chenaux et lapiaz de voûte témoignent ici



Photo 4: The Mas d'Azil Cave (Ariège, Pyrénées), is the eponymous site of the last culture of the Upper Paleolithic, the Azilian. Ceiling shapes (notches and domes) and blackish hydroxyapatite coatings of biogenic origin are superimposed on the initial phreatic morphologies. These are all indications of an ancient bat occupation that is incompatible with the preservation of cave paintings in the Mandement Room.

Grotte du Mas d'Azil (Ariège). Formes au plafond (encoches et coupoles) et enduits d'hydroxyapatite noirâtres d'origine biogénique se surimposent aux morphologies phréatiques initiales. Autant d'indices d'une occupation de chauves-souris ancienne incompatible avec la préservation d'œuvre pariétale dans la salle Mandement. Photo D. Cailhol

in correlation with the hydrodynamic variations of the river during the Penultimate Glacial Period [Pallier *et al.*, 2016; Pallier, 2021].

That method also allows us to consider the evolution processes of the cave, and in particular the link between archaeological gaps and palaeoenvironmental conditions which have influenced both the human settlements and the conservation of the archaeological remains. The analysis of wall state-conditions and the identification of different kind of weathering processes, notably biogenic corrosion, demonstrated a clear opposition between weathered surfaces and those onto which the parietal art is still preserved [Bruxelles *et al.*, 2016].

The contribution of these new paradigms has made it possible to suggest new and convincing hypotheses on the speleogenesis and the evolution of the cave in order to answer archaeological questions concerning the occurrence of Paleolithic settlements, related to the palaeo-climatic variations of the Upper Pleistocene.

Conclusion

A particularly dynamic and innovative discipline, the French karstology has evolved considerably over the last two decades. The classical concepts of speleogenesis have been disrupted by a series of new paradigms which now require to review each cave, each sinkhole, each underground network. A new inventory of forms and typology must be carried out.

Indeed, from hypogenous speleogenesis to ghost-rock models, via biocorrosion, the main lines of thought currently running through French karstology are challenging the studies of wall conditions, parietal morphologies and all types of karst deposits.

Supported by 3D tools, new analysis and dating techniques, the speleo-karstological approach responds to numerous and very varied issues, from expertise in the field of geoarchaeology, hydrogeology, knowledge of reservoirs, to the assessment of risks and hazards in the sector of development and civil engineering, including the protection of underground heritage.

du creusement d'une grande partie du réseau par paragénétisme, corrélativement aux variations hydrodynamiques de la rivière au cours de l'avant-dernière glaciation [Pallier *et al.*, 2018 ; Pallier, 2021].

Cette démarche permet aussi d'envisager les processus d'évolution de la grotte, et notamment le lien entre lacunes archéologiques et conditions paléoenvironnementales. Ces dernières ont en effet conditionné les occupations mais aussi la préservation des vestiges. L'analyse des états de parois et la détermination de différents processus d'altération, en particulier la corrosion d'origine biogénique (photo 4), a clairement montré une exclusion mutuelle des zones altérées avec celles dans lesquelles l'art pariétal est préservé [Bruxelles *et al.*, 2018].

L'apport de ces nouveaux paradigmes a permis de proposer des hypothèses nouvelles et argumentées sur la spéléogénèse et l'évolution de la grotte et de répondre aux problématiques archéologiques sur les raisons des présences ou absences de vestiges, en lien direct avec les variations climatiques du Pléistocène supérieur.

Conclusion

Discipline particulièrement dynamique et innovante, la karstologie en France a considérablement évolué ces deux dernières décennies. Les concepts classiques de spéléogénèse ont été bousculés par une série de nouveaux paradigmes qui obligent dorénavant à revoir chaque cavité, chaque gouffre, chaque réseau. C'est tout un travail d'inventaire de formes et de typologie qu'il nous faut réaliser.

En effet, des modèles de spéléogénèse hypogènes à la fantômisatation, en passant par la biocorrosion, les grands courants qui traversent actuellement la karstologie française mettent à l'épreuve l'étude des états de paroi, des morphologies pariétales et des remplissages karstiques de toute nature. Portée par des techniques et des outils d'analyse 3D et de datations, l'approche spéléo-karstologique répond à des enjeux multiples et très variés, de l'expertise dans le domaine de la géoarchéologie, de l'hydrogéologie, de la connaissance des réservoirs à l'évaluation des risques et des aléas dans le domaine de l'aménagement et du génie civil en passant par la protection du patrimoine souterrain.

- AUDRA P., 2007** - Karst et spéléogénèse épigènes, hypogènes, recherches appliquées et valorisation. HDR, Univ. de Nice, 278 p.
- AUDRA P. (éd.), 2010** - Grottes et karsts de France. Karstologia-Mémoires 19, Association Française de Karstologie, 358 p.
- AUDRA P., D'ANTONI-NOBECOURT J.-C. et BIGOT J.-Y., 2008** - Les cavités d'origine hypogène en France. *Spéléoscope* 32/33, Actes du Congrès Vercors 2008, Spelunca-Mémoires 33, pp. 18-21.
- AUDRA P., BARRIQUAND L., BIGOT J.-Y., CAILHOL D., CAILLAUD H., VANARA N., NOBECOURT J.-C., MADONIA G., VATTANO M. et RENDA M., 2018** - L'impact méconnu des chauves-souris et du guano dans l'évolution morphologique tardive des cavernes, *Karstologia*, 68, p. 1-20.
- AUDRA P., BINI A., GABROVSEK F., HÄUSELMANN P., HOBLEA F., JEANNIN P.-Y., KUNAVAR J., MONBARON M., ŠUSTERSIC F., TOGNINI P., TRIMMEL H. and WILDBERGER A., 200** - Cave and Karst Evolution in the Alps and their Relation to Palaeotopography. *Time in Karst*, 53-67 Postojna [http://carsologica.zrc-sazu.si/downloads/361/audra6.pdf]
- AUDRA P., CAMUS H. et ROCHETTE P., 2001** - Le karst des plateaux jurassiques de la moyenne vallée de l'Ardeche : datation par paléomagnétisme des phases d'évolution plio-quaternaires (aven de la Combe Rajeau). *Bull. Soc. géol. France*, 172(1), p. 121-129.
- AUDRA P., MOCOCHAIN L., CAMUS H., GILLI É., CLAUZON G. and BIGOT J.-Y., 2004** - The effect of the Messinian Deep Stage on karst development around the French Mediterranean. *Geodinamica Acta*, 17(6), p. 27-38.
- AUDRA P. & PALMER A.N., 2011** - The pattern of caves: controls of epigenic speleogenesis. *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 4, p. 359-378.
- AUDRA P. & PALMER A.N., 2013** - The vertical dimension of karst: controls of vertical cave pattern, in: J.E.I.C. Shroder, A.E. Frumkin (Eds.), *Treatise on Geomorphology*. Academic Press, pp. 186-206.
- AUDRA P. & PALMER A.N., 2015** - Research frontiers in speleogenesis. Dominant processes, hydrogeological conditions and resulting cave patterns. *Acta Carsologica*, 44(3), p. 315-348.
- BIGOT J.-Y., 2011** - Les captures karstiques subverticales et subhorizontales, quelques exemples. *Actes de la 20^{ème} Rencontre d'Octobre*, Labastide-Murat, 9-10 octobre 2010, S. C. Paris, p. 35-44.
- BIGOT J.-Y., 2014** - La corrosion pariétale des grottes par les aérosols d'origine animale. *Actes de la 23^{ème} Rencontre d'Octobre*, Le Châtelard 2013, p. 14-21.
- BRETZ J.H., 1942** - Vadose and phreatic features of limestone caverns. *J. of Geology*, 50, p. 675-811.
- BRUXELLES L., JARRY M., BIGOT J.-Y., BON F., DANDURAND G. et PALLIER C., 2018** - La biocorrosion, un nouveau paramètre à prendre en compte pour interpréter la répartition des œuvres pariétales : l'exemple de la grotte du Mas d'Azil en Ariège, *Karstologia*, 68, p. 21-30.
- BRUXELLES L. et CAMUS H., 2010** - Cryptoaltération et karstification dans les Grands Causses. In AUDRA Ph. (Dir.), *Grottes et karsts de France*. Karstologia Mémoires, n°19, Association Française de Karstologie, p. 314-315.
- CAMUS H., 2003** - Vallées et réseaux karstiques de la bordure carbonatée sud cévenole. *Relations avec la surrection, le volcanisme et les paléoclimats*. Thèse de doctorat Univ. Bordeaux 3, 720 p.
- CAMUS H., 2019** - « Comprendre les cavités naturelles et leurs remplissages par l'approche karstologique ». In : Laroche M., Bruxelles L., Galant Ph. et Ambert M. (dir.), *Paysages pour l'Homme*, Actes du colloque international en Hommage à Paul Ambert, Cabrières – Hérault, 15-19 octobre 2019, pp. 45-60.
- CLAUZON G., 1982** - Le canyon messinien du Rhône : une preuve décisive du "Desiccated deep-basin model". *Bul. Soc. géol. France*, 24(3), p. 597-610.
- CORBEL J., 1951** - Les études sur le karst depuis dix ans. *Revue de géographie de Lyon*, vol. 26, n°1, pp. 67-70.
- CVJIČIĆ J., 1918** - Hydrographie souterraine et évolution morphologique du karst. *Recueil des travaux de l'Inst. de Géog. Alpine*, t. 6, n° 4, p. 375-426.
- D'ANGELI I., SANTAGATA T., TOGNINI P., FOIANINI I., AUDRA P., CAILHOL D., VALME J., MILLER A., SAIZ-JIMENEZ C. and DE WAELE J., 2018** - Late stage condensation-corrosion in high mountain marble caves (Val di Scerscen, Bernina Massif, Valtellina, Italy), EGU General Assembly 2018, Vienna, Austria, 8 April-13 Apr 2018, EGU2018-8296, 2018.
- DANDURAND G., 2011** - Cavités et remplissages de la nappe karstique de Charente (bassin de la Touvre, La Rochefoucauld) – Spéléogénèse par fantômisat, archives pléistocène et holocène, rôle de l'effet de site. Thèse de Doctorat, Université de Bordeaux 3, 317 p.
- DANDURAND G., QUINIF Y., GUENDON J.-L. et GRUNEISEN A., 2019** - Sources vauclusiennes et fantômes de roche. *Karstologia*, 74, p. 31-46.
- DAVIS W.M., 1930** - Origin of limestone caverns. *Bull. of the Geol. Society of America*, 41, p. 475-628.
- DE WAELE J., AUDRA P., MADONIA G., VATTANO M., D'ANGELI I.M., BIGOT J.-Y. and NOBECOURT J.-C., 2016** - Sulfuric acid speleogenesis (SAS) close to the water table: examples from southern France, Austria, and Sicily. *Geomorphology*, 253, p. 452-467.
- DREYBRODT W., 1987** - The kinetics of calcite dissolution and its consequence to karst evolution from the initial to the mature state. *NSS Bulletin*, 49, p. 31-49.
- DUBOIS C., QUINIF Y., BAELE J.-M., BARRIQUAND L., BINI A., BRUXELLES L., DANDURAND G., HAVRON C., KAUFMANN O., LANS B., MAIRE R., MARTIN J., RODET J., ROWBERRY M.D., TOGNINI P. and VERGARI A., 2014** - The process of ghost-rock karstification and its role in the formation of cave systems. *Earth Science Reviews*, 131, p. 116-148.
- FORD D.C. & EWERS R.O., 1978** - The development of limestone cave systems in the dimensions of length and depth. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 15, p. 1783-1798.
- FORD D.C. & WILLIAMS P.D., 2007** - *Karst Hydrogeology and Geomorphology*. John Wiley & Sons, 576 p.
- GABROVŠEK F., DREYBRODT W. and PERNE M., 2010** - Physics of condensation corrosion in caves. In: Andreo, B., Carrasco, F., Durán, J., LaMoreaux, J. (Eds.), *Advances in Research in Karst Media*. Environmental Earth Sciences. Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 91-96.
- GRUND A., 1903** - Die Karsthydrographie: Studien aus Westböhmen. *Geographischen Abhandlungen von A. Penck*, 7(3), p. 103-200.
- HARMAND D., ADAMSON K., RIXHON G., JAILLET S., LOSSON B., DEVOS A., HEZ G., CALVET M. and AUDRA P., 2017** - Relationships between fluvial evolution and karstification related to climatic, tectonic and eustatic forcing in temperate regions. *Quaternary Science Reviews*, 166, p. 38-56.
- HÄUSELMANN P., JEANNIN P.-Y. and MONBARON M., 2003** - Role of the epiphreatic flow and soutirages in conduit morphogenesis: the Bärenschacht example (BE, Switzerland). *Zeitschrift für Geomorphologie*, 47(2), p. 171-190.
- HEZ G., JAILLET S., CALVET M. et DELANNOY J.-J., 2015** - Un enregistreur exceptionnel de l'incision de la vallée de la Têt : le karst de Villefranche-de-Conflent (Pyrénées-Orientales). *Karstologia*, 65, p. 9-32.
- JAILLET S., 2005** - Le Barrois et son karst couvert. *Karstologia Mémoires* 12, 336 p.
- JAILLET S., LOSSON B., BRULHET J., CORBONNOIS J., HAMELIN B., PONS-BRANCHU E. et QUINIF Y., 2002** - Apport des datations U/Th de spéléothèmes à la connaissance de l'incision du réseau hydrographique de l'Est du Bassin parisien. *Revue de Géographie de l'Est*, 42(4), p. 1-18.
- JAKUCS L., 1977** - *Morphogenetics of Karst Regions - Variants of Karst Evolution*. Adam Hilger Ltd., Bristol, 284 p.
- KLIMCHOUK A.B., 2013** - Hypogene speleogenesis. In: Shroder J. and Frumkin A. (ed.), *Treatise on Geomorphology*. Academic Press, San Diego, CA, vol. 6, *Karst Geomorphology*, pp. 220-240.
- KLIMCHOUK A., 2015** - The Karst Paradigm: Changes, Trends and Perspectives. *Acta Carsologica*, 44(3), p. 289-313.
- KLIMCHOUK A., 2017** - Types and Settings of Hypogene Karst. In: Klimchouk A., Palmer A.N., De Waele J., Auler A.S. and Audra P. (eds) *Hypogene Karst Regions and Caves of the World. Cave and Karst Systems of the World*. Springer, Cham, 911 pp.
- LAVERY M., 2012** - Preparing the ground – new mechanisms for karst and speleogenesis: 'altération', fantomisation and replacement. *Cave and Karst Science*, vol. 39, n° 2, Transactions of the British Cave Research Association, 72-76 p.
- MANGIN A., 1974-75** - Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques. *Annales de Spéléologie*, 1974, 29(3), p. 283-332; 1974, 29(4), p. 495-601; 1975, 30(1), p. 21-124.
- MARTEL E.-A., 1928** - *La France ignorée. Sud-Est de la France*. Delagrave, Paris, 290 p.
- MOCOCHAIN L., CLAUZON G., BIGOT J.-Y. and BRUNET P., 2006** - Geodynamic evolution of the peri-Mediterranean karst during the Messinian and the Pliocene: evidence from the Ardeche and Rhône Valley systems canyons, Southern France. *Sedimentary Geology*, 189, p. 219-233.
- MOCOCHAIN L., AUDRA P., CLAUZON G., BELLIER O., BIGOT J.-Y., PARIZE O. and MONTEIL P., 2009** - The effect of river dynamics induced by the Messinian Salinity Crisis on karst landscape and caves: Example of the Lower Ardeche river (mid Rhône valley). *Geomorphology*, 106(1-2), p. 46-61.
- MOCOCHAIN L., AUDRA P. and BIGOT J.-Y., 2011** - Base level rise and per ascension model of speleogenesis (PAMS). Interpretation of deep phreatic karsts, vauclisian springs and chimney shafts. *Bull. Soc. Géol. France*, 182(2), p. 87-93.
- PALLIER C., 2021** - *De l'enregistrement sédimentaire en milieu karstique à la taphonomie des sites archéologiques du Paléolithique supérieur (MIS 3 – MIS 2) : les apports de la grotte du Mas d'Azil et de la vallée de l'Arize (Ariège, France)*. Thèse de doctorat Université Jean Jaurès Toulouse, 237 p.
- PALLIER C., JARRY M., BON F., CAMUS H., RABANIT M. et BRUXELLES L., 2018** - Évolution karstique et occupations humaines de la grotte du Mas d'Azil (Ariège, France). *Karstologia*, 68, p. 31-38.
- PALMER A.N., 1987** - Cave levels and their interpretation. *NSS Bulletin*, 49, p. 50-66.
- PALMER A.N., 1991** - Origin and morphology of limestone caves. *Geological Society of America Bulletin*, 103(1), p. 1-21.
- PALMER A.N., 2007** - *Cave Geology*. Cave Books, Dayton, Ohio. 454 pp.
- QUINIF Y., 1999** - Fantômisat, Cryptoaltération et Altération sur roche nue – Le Triptyque de la Karstification. *Actes du colloque Karst-99* (colloque européen ; Grands Causses – Vercors) [http://www.karstologie.com/triptyque-karst.html]
- QUINIF Y., 2010** - *Fantômes de Roche et fantômisat : essai sur un nouveau paradigme en karstogénèse*. Karstologia Mémoires 18, 196 p.
- QUINIF Y. et BRUXELLES L., 2011** - L'altération de type « fantôme de roche » : processus, évolution et implications pour la karstification. *Géomorphologie*, 4, p. 349-358.
- RENAULT P., 1968** - Contribution à l'étude des actions mécaniques dans la spéléogénèse, thèse d'État, *Annales de spéléologie*, CNRS, Paris, 700 p.
- SWINNERTON A.C., 1932** - Origin of limestone caverns. *Bull. of the Geol. Soc. of America*, 43, p. 662-693.
- VERGARI A., 1998** - Nouveau regard sur la spéléogénèse : le "pseudo-endokarst" du Tournaisien (Hainaut, Belgique), *Karstologia*, 31, p. 12-18.
- WHITE W.B., 1989** - *Geomorphology and Hydrology of Karst Terrains*. Oxford University Press, Oxford, 464 p.