

Spéléogénèse *per ascensum* par remontée du niveau de base. Interprétation des réseaux ennoyés, dénoyés, des sources vaclusiennes et des puits-cheminées

Base level rising and per ascensum speleogenesis. Interpretation of flooded karsts, vauclisian springs and chimney-shafts

Philippe AUDRA⁽¹⁾, Ludovic MOCOCHAIN⁽²⁾ et Jean-Yves BIGOT⁽³⁾

(1) Polytech'Nice - Sophia Antipolis, Université de Nice Sophia-Antipolis, 1645 route des Lucioles, 06410 Biot, France ; audra@unice.fr

(2) CEREGE, Université de Provence, Europôle Méditerranéen de l'Arbois, 13545 Aix-en-Provence cedex 4, France ; ludomochain@gmail.com

(3) Association Française de Karstologie (A.F.K.) ; catherine.arnoux@club-internet.fr

Résumé - La crise de salinité messinienne s'est traduite d'abord par un enfoncement en profondeur des circulations karstiques, ensuite par un ennoyage lors de la transgression pliocène et enfin par une restructuration des drains suite à la remontée du niveau de base. Cette restructuration s'exprime principalement par la formation de conduits ascendants : les puits-cheminées et les sources vaclusiennes. La spéléogénèse *per ascensum* apparaît dès qu'une remontée du niveau de base se manifeste, dont la cause peut être eustatique, liée à un colmatage alluvial des vallées, ou à une subsidence continentale. L'origine de la plupart des réseaux noyés profonds (non hypogènes) se trouve ainsi expliquée par une remontée du niveau de base ayant ennoyé le karst, dont le drainage est assuré par des conduits ascendants vers des émergences vaclusiennes.

Mots-clefs : spéléogénèse *per ascensum*, puits-cheminée, remontée du niveau de base, crise messinienne de salinité, karst noyé profond.

Abstract- The Messinian Salinity Crisis induced first a deepening of the karst systems, then a flooding after the Pliocene transgression, and finally a reorganization of the drains after this base level rise. This reorganization mainly corresponds to the development of phreatic lifts: the chimney-shafts and the vauclisian springs. Such a *per ascensum* model of speleogenesis appears with a base level rise caused by eustatism, by fluvial aggradation or valley infilling, or by continental subsidence. Consequently, we explain the origin of most of the deep phreatic cave systems (which are not hypogenic) by a base level rise which flooded the deep karst, producing phreatic lifts connected to vauclisian springs.

Key words: *per ascensum speleogenesis, chimney-shaft, base level rising, Messinian Salinity Crisis, deep phreatic karst.*

Introduction

En l'absence d'écran imperméable, l'étagement vertical des niveaux de cavité peut être associé à l'évolution des vallées [Granger, Fabel *et al.*, 2001 ; Anthony et Granger, 2004 ; Häuselmann, Granger *et al.*, 2007]. D'une manière générale, les auteurs ont privilégié « l'érosion », impliquant une descente du niveau de base par creusement des vallées. Implicitement, la dynamique d'étagement des réseaux est alors associée à cette évolution *per descensum*. L'âge des réseaux étant corrélé aux différents stades d'incision, l'interprétation qui en résulte démontre que plus les réseaux sont proches du fond de la vallée, plus ils sont récents, et inversement [Palmer, 1987]. Lorsque la remontée du niveau de base est prise en compte, elle est en général seulement considérée comme responsable d'un ennoyage ou d'un colmatage des réseaux.

L'étude des processus de spéléogénèse associés au cycle eustatique messino-pliocène (crise messinienne de salinité et haut niveau marin pliocène) a démontré le rôle moteur de la remontée du niveau de base dans la structuration *per ascensum* des réseaux karstiques, par création de conduits noyés remontants : les puits-cheminées [Mochain *et al.*, 2006 a, b et c].

Par extension, les autres contextes de remontée du niveau de base, principalement liés à l'alluvionnement dans les vallées, produisent les mêmes effets morphologiques. Il devient ainsi possible de généraliser le modèle de spéléogénèse *per ascensum*. Cet article présente les résultats de nos recherches, menées dans un premier temps en domaine méditerranéen affecté par les impacts de la crise de salinité. Il présente, dans un deuxième temps, les autres contextes de remontée du niveau de

base favorables à une spéléogénèse *per ascensum*, qu'ils soient d'origine eustatique et climatique (transgression et exhaussement du remplissage alluvial) ou tectonique (subsidence continentale).

I. A- Modèle de spéléogénèse *per ascensum* associé aux conséquences de la crise de salinité messinienne de Méditerranée

Le pourtour méditerranéen français montre une concentration importante de réseaux noyés profonds (figure 1). De nombreux auteurs ont utilisé le *Four State Model* [Ford, 1977] pour en expliquer la genèse en leur assignant une origine noyée profonde (*bathypheatic*). Il faut attendre la décennie 90, à la suite des idées présentées par G. Clauzon, J.-M. Puig *et al.* [1997] pour proposer la crise messinienne comme responsable de cette spéléogénèse particulière.

Cette révision s'accompagne d'outils conceptuels s'appuyant sur les oscillations de grande ampleur du niveau de base pour la formation des réseaux noyés profonds.

Les études récentes menées en karstologie ont identifié plusieurs types de réseaux ennoyés [Mocochain, 2007 ; Audra, 2007]. La classification proposée pour l'ensemble de ces réseaux ne repose pas seulement sur des critères morphologiques, mais aussi sur leur élévation actuelle par rapport au niveau de base. Ainsi distingue-t-on les réseaux ennoyés localisés en grande partie sous le niveau de base des réseaux actuellement en zone vadose mais dont une partie de la genèse s'est produite antérieurement dans la zone noyée du karst.

La classification actuelle propose trois types de modèles :

- le modèle littoral dont l'intégralité des réseaux se développe sous le niveau marin ;
- le modèle proche de la Méditerranée qui comporte l'ensemble des réseaux ennoyés le long du réseau hydrographique ;
- le modèle amont de bassin hydrographique qui comporte l'ensemble des réseaux dénoyés mais dont les morphologies témoignent d'une spéléogénèse antérieure en contexte noyé.

I.A. 1- Modèle littoral (sources sous-marines de Port-Miou) : réseau ennoyé

Les Calanques sont connues comme étant un ancien modèle karstique constitué principalement de canyons ennoyés [Collina-Girard, 1996]. Une partie des reliefs doit son façonnement à la régression messinienne [A. Tassy, thèse en cours]. Le canyon sous-marin de la Cassidaigne entaille un plateau intensément karstifié situé entre 80 et 150 m de profondeur (figure 2). La base du canyon, vers -250 m, repose sur les phyllites du socle, tandis que des baumes remplies de concrétions de calcite ont été reconnues à la base des parois du canyon [Blanc et Monteau, 1988]. Ces canyons seraient des reculées karstiques façonnées par des émergences importantes. À l'aplomb du canyon de la Cassidaigne, sur le littoral, émergent deux puissantes sources, Port-Miou et le Bestouan, dont le module cumulé entre 10 et 15 m³/s provient d'un bassin d'alimentation estimé à 1500 km² comprenant une grande partie de la Basse Provence calcaire, probablement jusqu'à la Durance, par-delà la Sainte-Victoire [Gilli, 2001 ; Blavoux, Gilli et al., 2004 ; Cavalera, 2007]. Compte tenu du

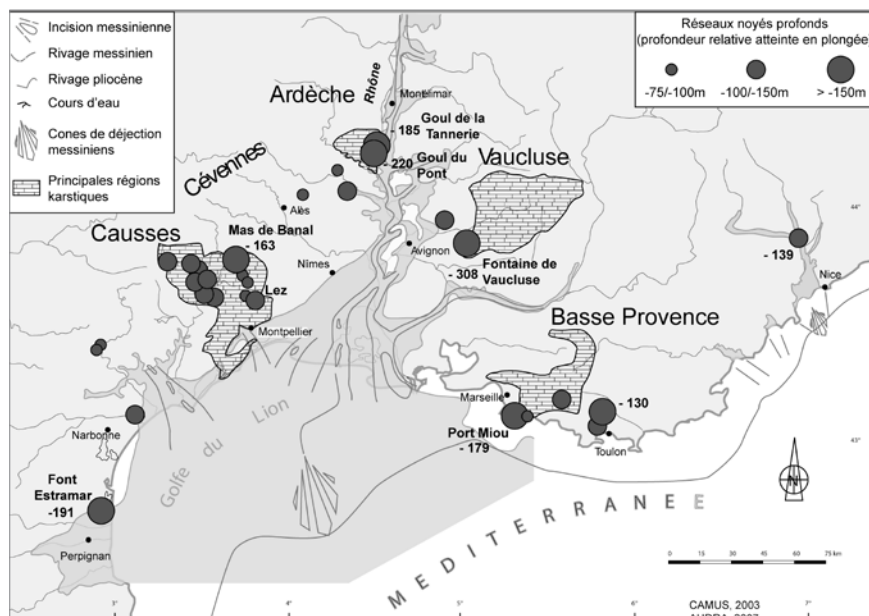


Figure 1 - Localisation des réseaux karstiques noyés profonds de la France méditerranéenne. Tous sont en relation avec la Méditerranée ou les rias pliocènes [d'après Clauzon, Puig et al., 1997 ; Camus, 2003 ; Audra, 1997].

Deep-phreatic cave systems in Mediterranean France. All cave systems are connected to the Mediterranean or to the Pliocene rias ("flooded valley").

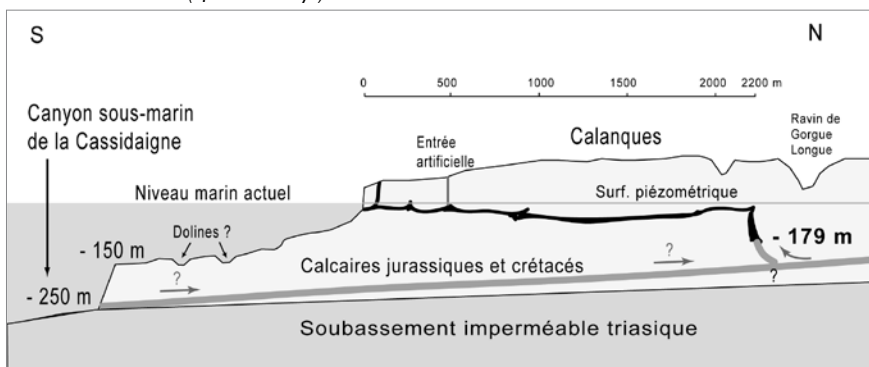


Figure 2 – Réseau de Port-Miou (Calanques de Cassis). Le réseau messinien raccordé en profondeur à l'ancienne reculée du canyon de Cassidaigne est bloqué par le barrage d'eau salée. Le drainage utilise un conduit remontant pour se raccorder à l'émergence littorale [Blavoux, Gilli et al., 2004 ; topographie d'après Douchet et Fage, 1993].

Port-Miou submarine spring. In the Messinian drain, opening offshore at the head of the Cassidaigne Canyon, the water is blocked by the density of the salt water. The underground flow follows a phreatic lift connected to the submarine spring.

cloisonnement tectonique, le drainage d'un bassin aussi vaste n'a pu se mettre en place que dans un contexte de fort gradient topographique, compatible avec celui délivré par la régression messinienne. La transgression pliocène qui a succédé à ennoyé la partie profonde du karst, contraignant les eaux à émerger en bordure des Calanques par un conduit remontant de grande dénivellation. Outre la formation du conduit remontant, l'ennoisement pliocène se répercute sur le fonctionnement hydrologique de cette émergence vaclusienne. En effet, l'émergence littorale du réseau présente une salinité provoquée par une contamination marine qui pénètre le karst profond par les anciennes

émergences messiniennes. Le mélange des eaux se produirait à la base du conduit remontant noyé (figure 2).

I.A. 2- Modèle proche de la Méditerranée (fontaine de Vaucluse) : réseau ennoyé

La fontaine de Vaucluse draine le plus grand karst de France, dont la superficie couvrant le plateau de Vaucluse-Lure est estimée à 1 130 km² (figure 1), pour un module de 23 m³/s et des crues maximales de 120 m³/s [Cognard-Plançq, Gévaudan et al., 2006]. Elle est surtout célèbre pour sa profondeur exceptionnelle de 308 m sous le niveau de la vasque à l'étiage, soit 224 m sous le niveau marin actuel [Bayle et Graillot, 1987].

La sismique a révélé un canyon messinien majeur en provenance du plateau de Vaucluse [Schlupp, Clauzon *et al.*, 1997]. Il passe de -900 m sous le niveau de la mer (NGF) à sa confluence avec le Rhône messinien vers Avignon, à -350 m NGF une dizaine de kilomètres en amont. Il est interprété comme le canyon de la paléo-Sorgue [Clauzon, comm. orale].

L'incision du canyon du Rhône a ouvert une fenêtre hydrogéologique, distante du plateau de Vaucluse. Une série

d'émergences étagées ont évolué en reculées karstiques, le long d'un canyon peu incisé à l'amont (figure 3). L'observation de perforations de lithophages pliocènes dans la vasque atteste la mise en place de la fontaine de Vaucluse au cours de la crise messinienne [Gilli et Audra, 2004]. Les lapiaz de paroi d'origine épinoyée, développés entre 120 m et 254 m de profondeur (soit jusque vers -170 m NGF) sont la preuve d'un développement et d'un fonctionnement

messinien de la fontaine de Vaucluse en trop-plein sous l'effet des mises en charge.

La transgression pliocène suivie du comblement sédimentaire des rias a fossilisé la reculée. Cette conséquence de l'élévation du niveau de base a contraint les écoulements permanents à utiliser un conduit (ancien trop-plein) de la fontaine de Vaucluse qui est devenu l'unique émergence du karst de Vaucluse et ce, jusqu'à nos jours.

Une évolution semblable a été identifiée en Ardèche, avec les émergences vauclusiennes de Tourne le long du Rhône (figure 1). Le gradient topographique délivré par l'incision du canyon messinien du Rhône a permis un drainage en profondeur du plateau calcaire de Saint-Remèze. Ce drainage englobait aussi les gorges de l'Ardèche, par formation d'un sous-écoulement de la rivière expliquant l'atrophie de son canyon messinien par rapport à celui du Rhône, deux fois plus profond (respectivement + 50 et - 236 m NGF).

Au Pliocène, l'envoyage des rias suivi de leur comblement sédimentaire, s'est également traduit dans le karst par un refoulement des eaux, dont le transit a finalement été assuré par des puits-cheminées (creusement *per ascensum*). Le fonctionnement vauclusien des gouls de Tourne (étape des rias) ainsi que l'aven de Darbousset (comblement sédimentaire du canyon messinien) illustrent le fonctionnement de ce karst ayant enregistré une succession de remontées du niveau de base (figure 4).

Du fait de sa grande profondeur (-236 m NGF), le canyon du Rhône est resté en grande partie enfoui, malgré l'exhumation de sa partie supérieure au Pléistocène. L'émergence pliocène de l'aven de Darbousset est désormais abandonnée, laissant un puits-cheminée asséché en zone vadose. Les gouls de Tourne continuent d'assurer actuellement le rôle de drainage sous la forme de sources vauclusiennes en bordure de la vallée du Rhône.

I.A. 3- Modèle amont de bassin hydrographique (Ardèche) : réseau dénoyé

Le cycle messino-pliocène est caractérisé non seulement par un surcreusement majeur du réseau hydrographique, mais également par son comblement subséquent, ayant conduit à une remontée du niveau de base sans équivalent connu. Ce contexte géodynamique est à l'origine d'une spéléogénèse *per ascensum*, où le développement des conduits suit les stades de la remontée du niveau de base au Pliocène :

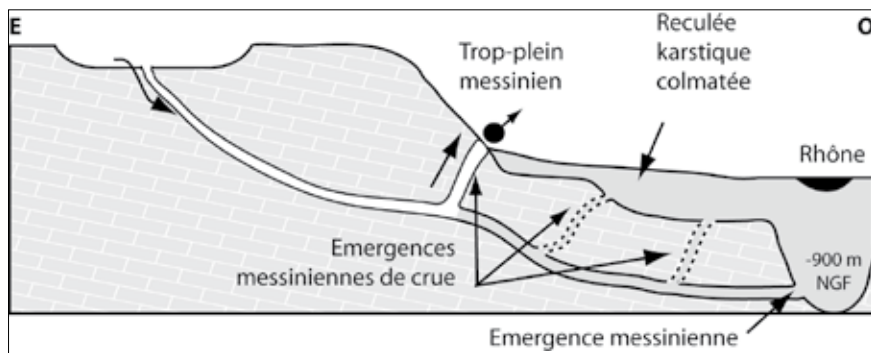


Figure 3 – Modèle de spéléogénèse du karst de Vaucluse. Le canyon messinien du Rhône, à -900 m NGF est fossilisé par les dépôts pliocènes. Le réseau messinien profond qui s'y raccordait est ennoyé puis, sans doute colmaté. Le drainage utilise une ancienne émergence de trop-plein (puits-cheminée) débouchant au niveau de base actuel, la fontaine de Vaucluse.

Speleogenetic model of the Vaucluse karst. The Messinian canyon of the Rhône River is filled with Pliocene deposits. Its bottom is at 900 m below the current sea level. The Messinian cave system, which was probably connected to this canyon, has been flooded and filled with sediment during the Pliocene. Since that time, the underground flow has used a chimney-shaft opening to the current base level at the Fontaine de Vaucluse.

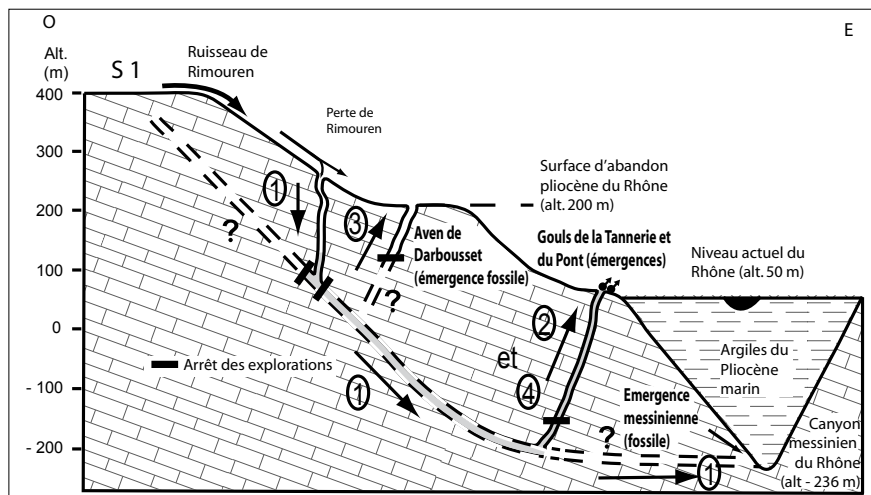


Figure 4 – Genèse des réseaux noyés profonds ardéchois en bordure du Rhône, les gouls du Pont et de la Tannerie, dits « gouls de Tourne », Bourg-Saint-Andéol [Mocochain, 2007]. Ces deux émergences vauclusiennes sont connues par plongée jusqu'à environ 200 m de profondeur, soit 150 m sous le niveau de la mer. Leur profondeur s'explique par la proximité du talweg messinien du Rhône. Un puits-cheminée, l'aven de Darbousset, domine les gouls. Il est localisé au niveau du toit du remblaiement pliocène de la ria du Rhône (surface d'abandon pliocène) et correspond à l'émergence du système au Pliocène supérieur.

Speleogenesis of the deep phreatic systems along the Rhône Valley, the goul du Pont and goul de la Tannerie, alias « gouls de Tourne », Bourg-Saint-Andéol, Ardèche. Both of these vauclusian springs have been explored by scuba diving down to a depth of 200 m, corresponding to 150 m below the sea level. Such a depth is explained by the neighboring of the Rhône Messinian Canyon. They probably appeared after the plugging of the messinian spring, which would be located at the bottom of the Canyon, now filled with impervious clays. A chimney-shaft, the Darbousset Aven opens above the springs. It locates at the same elevation as the top of the Pliocene filling of the Rhône Canyon (Pliocene Abandonment Surface), and it corresponds to an Upper Pliocene emergence.

1. lors de la remise en eau de la Méditerranée ;
2. par aggradation fluviale lors du comblement des canyons durant tout le Pliocène (figure 5).

Le karst de l'Ardèche se compose pour l'essentiel de grands réseaux horizontaux, asséchés ou actifs, disposés en étages reliés par des conduits remontants, les puits-cheminées. Le réseau de Foussoubie est un exemple démonstratif expliquant l'origine de ces conduits ascendants (figure 6) [Bigot, 2002 ; Mocochain, 2007]. Son profil en long est rectiligne entre la goule (perte) et l'évent (résurgence) en bordure de l'Ardèche, avec une pente constante de 2,5 %. Ce profil de *water table cave* exprime une organisation initiale selon une position du niveau de base située à l'altitude de l'Ardèche actuelle. Les conduits verticaux proches de l'émergence ne sont pas des avens, mais des conduits noyés où l'écoulement était ascendant, d'où leur qualification de « puits-cheminées ». Leur débouché est en corrélation avec les niveaux d'aggradation fluviales pliocènes. Ils correspondent à d'anciennes émergences vaclusiennes mises en place après le drain principal pour permettre à l'eau, en quête d'exutoire, de remonter vers le niveau de base pliocène en cours d'élévation.

Au Pléistocène, sous l'effet du glacio-eustatisme, l'exhumation complète du canyon messinien de l'Ardèche par déblaiement du remplissage pliocène a asséché les puits-cheminées du réseau de Foussoubie, tandis que le réseau messinien dénoyé demeure encore actif aujourd'hui (figure 5).

Cette spéléogénèse *per ascensum* est principalement caractérisée par des conduits noyés remontants de grande dénivellation, les « puits-cheminées ». Ils correspondent à l'adaptation du drainage, maintenant un écoulement dans les réseaux messiniens profonds et assurant un transit ascendant des eaux qui émergent vers le niveau de base sous forme de sources vaclusiennes.

L'exhumation partielle ou totale des canyons messiniens détermine la position actuelle des exutoires actifs. Les canyons partiellement exhumés maintiennent le karst ennoyé depuis la fin du Messinien, ils sont drainés par des sources vaclusiennes, cas de la fontaine de Vaucluse. Les canyons entièrement exhumés assurent le dénoyage des réseaux karstiques au cours du Pléistocène, les puits-cheminées sont asséchés, cas du réseau de Foussoubie.

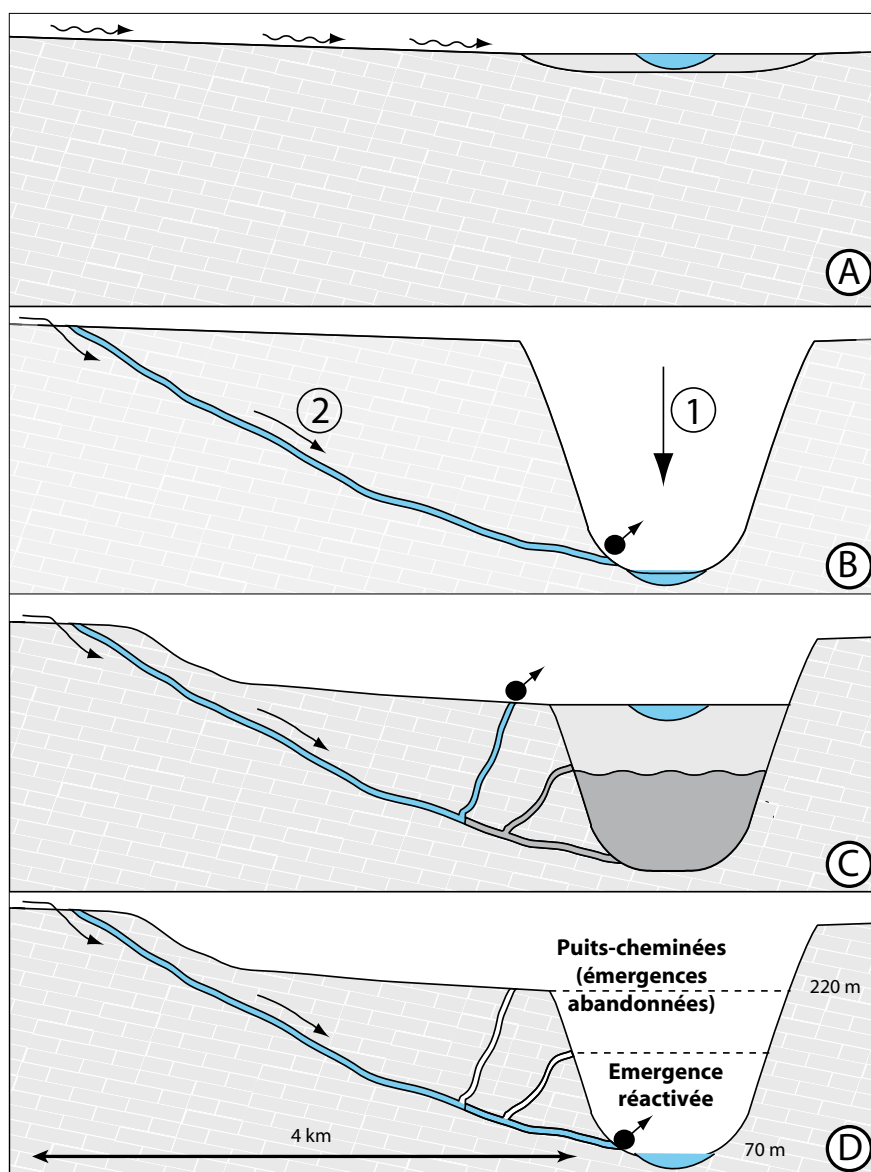


Figure 5 – Modèle général de spéléogénèse *per ascensum* lors du cycle messino-pliocène.

A- Écoulement superficiel sur la surface pré-évaporitique. B- Le surcreusement du canyon messinien provoque un enfoncement du drainage karstique. C- La remontée du niveau de base au Pliocène s'effectue en deux temps : par ingresson marine en ria (gris foncé), puis par aggradation fluviale (gris clair) ; le drainage profond utilise des conduits remontants noyés et émerge en sources vaclusiennes, marquant les positions successives de stationnement du niveau de base ; Lorsque le canyon messinien est sous le niveau de base actuel, il demeure enfouï et le karst reste noyé, drainé par une émergence vaclusienne. D- Lorsque le canyon messinien est au-dessus du niveau de base actuel, il est exhumé et le karst est dénoyé, le drainage actuel utilise le réseau profond messinien, les conduits remontants pliocènes sont abandonnés et apparaissent en puits-cheminées « fossiles ».

Per ascensum Model of Speleogenesis during the Messinian-Pliocene cycle. A- Surface runoff on the Pre-evaporitic Surface (i.e. Pre-Messinian). B- Messinian canyon entrenchment caused the deepening of karst drainage. C- Pliocene base level rise occurred in two steps – by marine ingress as ria (dark gray), then by fluvial aggradation (light gray). Deep drainage uses phreatic lifts to emerge as vaclusian springs, recording successive positions of the base level. If the Messinian canyon is located below the current base level, it remains fossil, the karst remains flooded and discharges by a vaclusian spring (fontaine de Vaucluse type). D- If the Messinian canyon is located above the current base level, the canyon is exhumed and the karst is drained. The current drainage uses the deep Messinian drain; the Pliocene phreatic lifts are abandoned as fossil "chimney-shafts".

En retour, les puits-cheminées sont identifiés comme des indicateurs de spéléogénèse *per ascensum* d'écoulant d'une remontée du niveau de base (figure 7). Le colmatage signant l'abandon partiel d'un niveau se traduit également par un développement généralisé à l'échelle régionale des formes paragénétiques de creusement de chenaux au toit des conduits colmatés de sédiments insolubles (figure 8).

La remontée du niveau de base est en conséquence interprétée comme un événement spéléogénétique fondateur. Au-delà du cycle messino-pliocène, d'autres contextes de remontée du niveau de base peuvent également être à l'origine d'une spéléogénèse

per ascensum et d'un développement systématique de puits-cheminées, notamment au droit des émergences.

II. B- Extension du modèle *per ascensum* à différents contextes de remontée du niveau de base

L'influence morphologique du cycle messino-pliocène peut se résumer à un abaissement considérable du niveau de base permettant l'approfondissement des circulations karstiques, suivi d'une remontée du même ordre de grandeur. Cette remontée du niveau de base ennoie les drains profonds et restructure le drainage karstique, principalement par formation de puits-cheminées et dans certains cas

par élaboration de nouveaux drains horizontaux comme à la grotte de Saint-Marcel [Mocochain, Clauzon *et al.*, 2006a et b ; Mocochain, Audra *et al.*, 2006a]. Il s'avère que ce type de réponse du karst s'applique à tous les contextes de remontée consécutive du niveau de base (qui succède par définition à une position déprimée du niveau de base) et ce au-delà du cycle messino-pliocène. Une remontée du niveau de base s'exprime par un ennoyage des parties basses du relief - les vallées - soit par une étendue d'eau ou de glace, soit par des sédiments. Le moteur peut être eustatique (transgression, figure 9), tectonique (subsidence), climatique (décapage par érosion des versants, avancée glaciaire), voire anthropique (retenue d'eau artificielle).

II.B. 1- Le cycle eustatique messino-pliocène de Méditerranée

Au cours de la crise de salinité messinienne (5,95 - 5,32 Ma), l'abaissement brutal de 2 000 m du plan d'eau méditerranéen provoque le creusement des canyons messiniens le long du réseau hydrographique [Clauzon, 1982]. En l'absence d'écran imperméable, cette chute du niveau de base se traduit par un gradient topographique considérable responsable de la migration en profondeur des drainages karstiques vers le niveau de base déprimé.

La transgression pliocène succédant à la crise provoque une brusque remontée du niveau de base, avant que n'intervienne le comblement sédimentaire des rias, responsable d'une seconde élévation du niveau de base. Le refoulement ainsi provoqué aux exutoires des karsts messiniens, alors ennoyés, est favorable à la formation d'exutoires vauclusiens : les puits-cheminées.

En fonction de leur profondeur de creusement, les canyons messiniens sont ensuite partiellement ou totalement exhumés au cours du Pléistocène, laissant apparaître deux familles de réseaux : les réseaux noyés profonds de type fontaine de Vaucluse (figures 1 et 3) et les réseaux dénoyés de type Foussoubie (figure 5).

II.B. 2- Autres cycles eustatiques miocènes

Le bassin d'avant-pays de Carpentras a subi au cours du Miocène plusieurs cycles eustatiques ayant provoqué des variations du niveau de base en bordure du karst de Vaucluse (figure 10). Ces oscillations sont révélées par la stratigraphie séquentielle des molasses et ont déterminé la mise en place d'un drainage karstique.

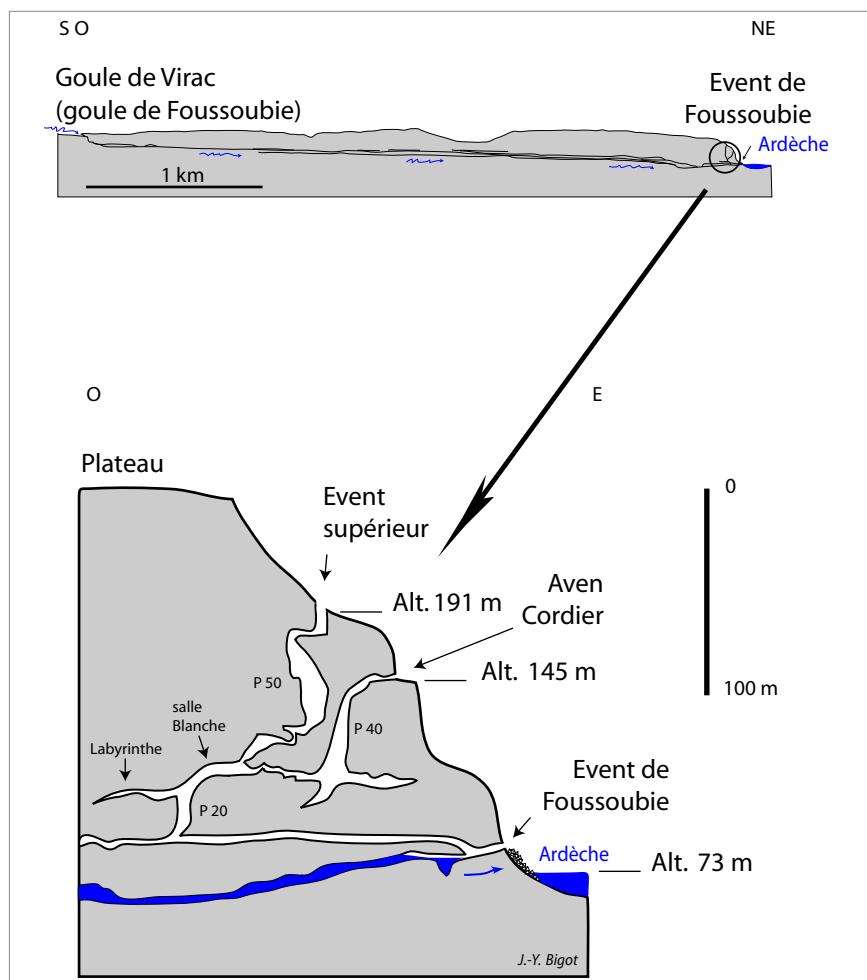


Figure 6 – Modèle de spéléogénèse du karst de l'Ardèche, exemple du système de Foussoubie. Le canyon messinien des gorges de l'Ardèche à 80 m NGF a été exhumé de ses dépôts pliocènes. Le réseau messinien profond, toujours utilisé par les écoulements torrentiels actuels, est complètement dénoyé. Les conduits remontants raccordés aux positions successives du remplissage pliocène fonctionnaient alors en émergences vauclusiennes. Ils sont depuis abandonnés en puits-cheminées « fossiles » [Bigot, 2002 ; Mocochain, 2007 ; Mocochain, Clauzon *et al.*, 2006a et b ; Mocochain, Bigot *et al.*, 2006 ; Mocochain, Audra *et al.*, 2008].

Per Ascensum Model of Speleogenesis in the Foussoubie Cave System, Ardèche. The phreatic lifts resurged as vauclusian springs (Aven Cordier and Event supérieur) connected to the higher base-level positions corresponding to the Pliocene filling. During the Pleistocene, the Messinian canyon was exhumed and entirely cleared of its Pliocene fill. Current drainage reuses the deep Messinian drain. The Pliocene phreatic lifts are abandoned as fossil "chimney-shafts".

Figure 7 - Le puits-cheminée, indicateur de remontée du niveau de base et de spéléogénèse *per ascensum*, exemple de l'aven de Noël (Bidon, Ardèche). Avec la remontée du niveau de base, le drainage profond utilise un conduit remontant pour se raccorder à la position surélevée du niveau de base. Le puits-cheminée présente des caractéristiques morpho-sédimentaires propres à son fonctionnement noyé ascendant : raccord vertical entre deux niveaux horizontaux, vagues d'érosion et sédiments se redressant à l'approche du puits-cheminée, tri ascendant des sédiments, banquettes-limites de remplissages, cloches (cliché L. Mocochain).

A chimney-shaft, recording the base level rise and the *Per Ascensum* Speleogenesis, Aven de Noël, Ardèche. Following the base level rise, the deep flow uses a phreatic lift that connects to the higher position of the base level. The chimney shaft harbors typical features and sediment facies, corresponding to a rising phreatic flow: vertical connection between two horizontal levels, the scallops and sediments shift to upward orientation close to the chimney-shaft, upgrading sorting of the sediments, rising paragenetic notches, ceiling cupolas.

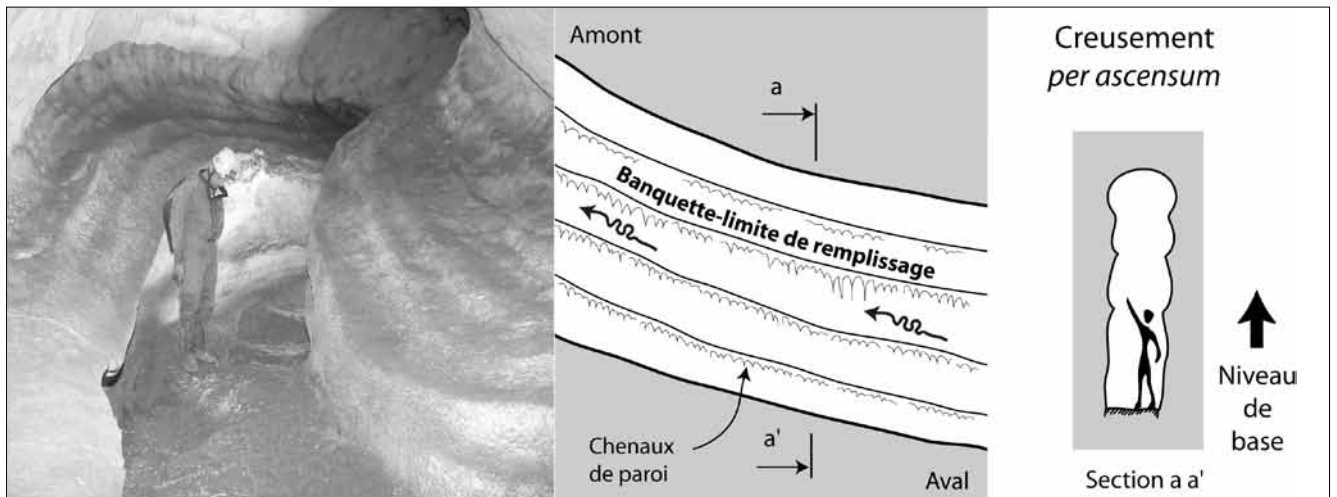
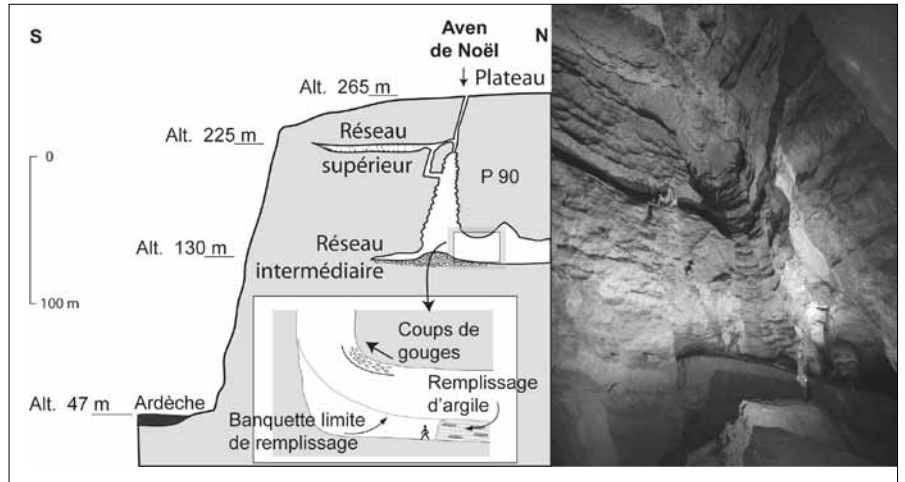
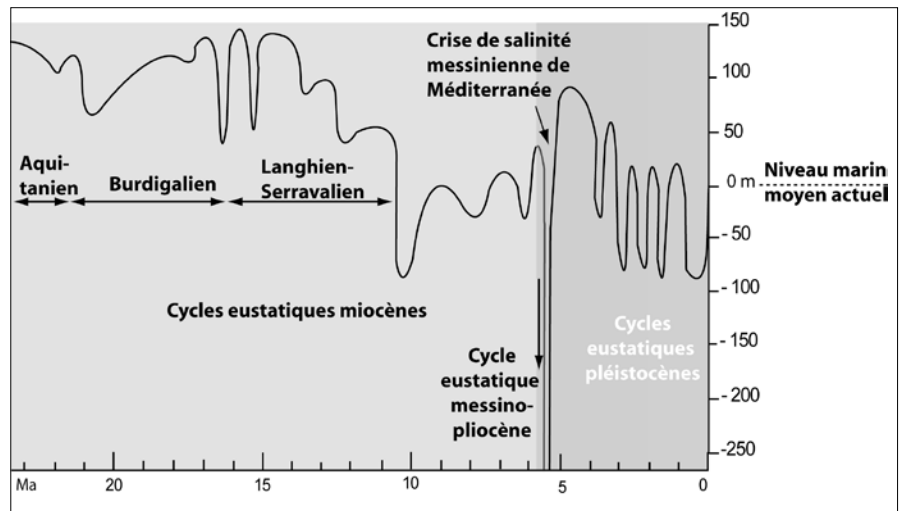


Figure 8 – Banquettes-limites de remplissages, grotte de Décagnagne, Gard. Le creusement *per ascensum* en contexte de remontée du niveau de base s'accompagne d'un remplissage sédimentaire des conduits, marqué par des formes généralisées de paragenèse (cliché L. Mocochain).

Paragenetic notches, grotte de Décagnagne, Gard. In a baselevel rise context, the per ascensum speleogenesis makes the conduits to be filled with fine sediments, and paragenetic features to be widespread.

Figure 9 - Charte eustatique des 20 derniers Ma [Haq, Hardenbol et al., 1987 ; modifié]. En abscisse, le temps en millions d'années, en ordonnée l'altitude du niveau marin.

Eustatic chart of the last 20 Ma [after Haq, Hardenbol et al., 1987]. Time on the x-axis (in Ma), sealevel altitude on the y-axis.



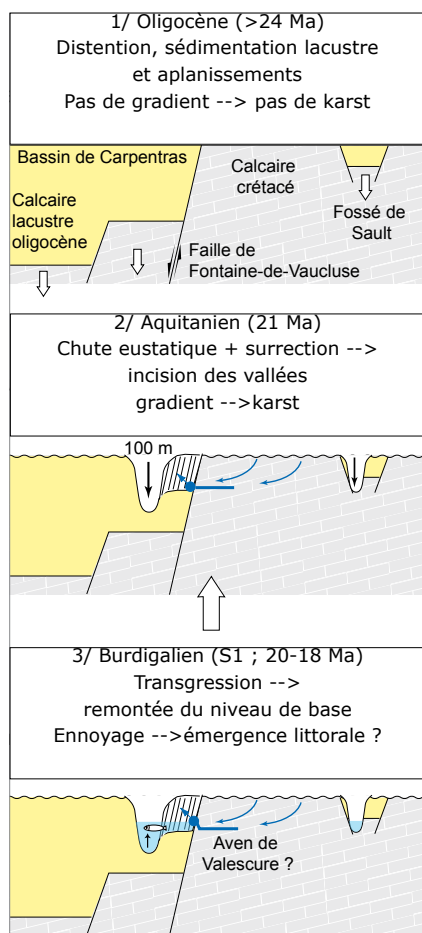


Figure 10 – Le karst de Vaucluse au Miocène inférieur. Une émergence apparaît à l'Aquitainien ; au début de la transgression du Burdigalien, l'aven de Valescure fonctionne en trop-plein [d'après Besson, Parize *et al.* 2005a ; Besson, Borgovini *et al.* 2005b ; Besson, Parize, Rubino *et al.* 1997].

Vaucluse karst during the Lower Miocene. An emergence appears during the Aquitanian. At the beginning of the Burdigalian transgression, the Aven de Valescure acts as an overflow

Au début du Miocène, la migration de la surrection alpine vers l'ouest amorce un relèvement continu de l'avant-pays. À cela s'ajoutent les cycles eustatiques de 2^e ordre qui vont déterminer des transgressions ou des émergences (figure 9).

Les travaux récents ont mis en évidence des vidanges complètes des bassins molassiques lorsque les effets de la régression et de la surrection se cumulent, ayant pour effet l'incision de vallées profondes [Besson, Parize *et al.*, 2005a ; Besson, Borgovini *et al.* 2005 ; Parize, Rubino *et al.*, 1997]. À l'Aquitainien, un réseau de vallées orienté nord-sud s'incise d'une centaine de mètres dans la surface oligocène. Deux vallées concernent le secteur : l'une suivant l'axe Montbrun-Sault-Apt, au centre de l'actuel plateau

de Vaucluse et l'autre sur sa bordure occidentale, sur l'axe Vénasque-Saumane. Au Burdigalien, deux cycles de transgression-régression (présentés en un seul sur la figure 10) se succèdent, participant à l'inondation des rias et ensuite des bassins molassiques.

Du point de vue de la spéléogénèse, l'incision aquitanienne est propice à la karstification dans un contexte de plateau avec un gradient topographique modéré.

La stratigraphie séquentielle des molasses autour de Fontaine-de-Vaucluse montre que ce secteur avait déjà acquis sa fonction de point d'émergence concentrée des eaux karstiques, bien avant la mise en place de la fontaine de Vaucluse [Besson, Parize *et al.*, 2005a ; Besson, Borgovini *et al.* 2005 ; Parize, Rubino *et al.*, 1997]. Dans le secteur Vénasque-Saumane la physiographie de la vallée aquitanienne et de son remplissage burdigalien révèle l'existence d'un cours d'eau profondément encaissé, dont l'amont bute sur le plateau sous forme d'une reculée karstique. La faiblesse des apports détritiques enregistrée dans la sédimentation de cette rivière est compatible avec un amont calcaire soumis principalement à la dissolution. Cette rivière était alimentée par une émergence située à l'extrémité de cette reculée karstique : l'aven de Valescure. Par ailleurs, les faunes livrées par les sédiments molassiques remplissant la vallée sont caractéristiques d'un milieu d'eau pratiquement douce : au début de la transgression burdigalienne, le paysage s'apparentait à une ria à l'extrémité de laquelle une émergence repoussait les eaux marines, un aspect que l'on retrouve aujourd'hui dans les calanques de Cassis.

L'aven de Valescure, contrairement à son appellation générique, n'a rien d'un gouffre (figure 11). Les formes en tube de grande taille, les cloches en plafond et le plongement incliné l'assimilent à une émergence « vauclusienne » de type puits-cheminée au regard des vagues d'érosion qui confirment un courant ascendant d'émergence. Le petit réseau au-delà du grand puits montre des formes épinoyées (seuil asymétrique), attestant du fonctionnement temporaire en trop-plein. L'émergence pérenne devait se trouver en contrebas, en relation avec le talweg de la vallée actuellement fossilisée par les molasses. En crue, l'émergence pérenne partiellement colmatée de sédiments et soumise à la densité de l'eau salée subissait des pertes de charge favorables à l'activation temporaire du trop-plein

de Valescure. À la fin de l'Aquitainien et au début du Burdigalien inférieur, l'aven de Valescure a donc fonctionné en émergence de la partie occidentale du karst de Vaucluse qui n'était alors qu'un bas plateau drainé par plusieurs émergences aux bassins beaucoup moins étendus que celui de la fontaine de Vaucluse. Cette émergence fut probablement définitivement abandonnée après sa fossilisation sous les molasses burdigaliennes.

Dans le bassin rhodano-provençal, l'influence des cycles eustatiques du Miocène est assez difficile à identifier en raison de l'empreinte laissée postérieurement par le mégacycle messino-pliocène. A *contrario*, le bassin molassique de la Paratéthys d'Europe centrale, au moins dans sa partie septentrionale (République Tchèque, Slovaquie, Pologne...) a été épargné par les effets de l'incision messinienne ; les cycles eustatiques antérieurs sont par conséquent mieux conservés. Les transgressions du Carpathien (équivalent du Burdigalien) et surtout du Badénien moyen (équivalent du Langhien-Serravalien) succèdent à des phases continentales

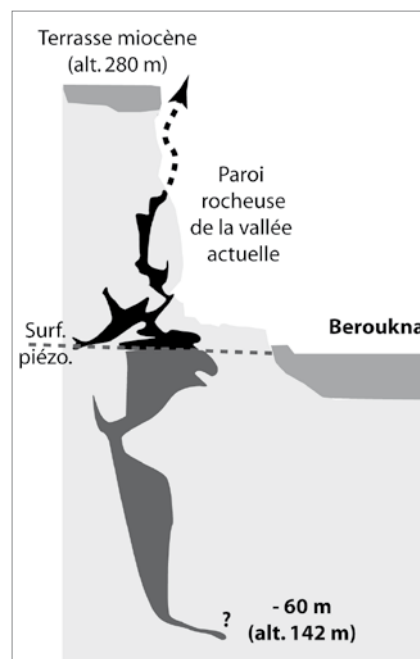


Figure 12 – Podtráťová jeskyně, karst de Moravie, Rép. Tchèque : puits-cheminée de 140 m de hauteur dont 68 m noyés sous le niveau de la vallée de la Beroukna [Bruthans et Zeman, 2003]. Il pourrait s'agir d'un témoin d'une remontée du niveau de base dans un réseau hydrographique profondément entaillé dès le Burdigalien.

Podtráťová jeskyně, Moravian karst, Czech Republic, a 140-m high chimney-shaft, the lowest part of which is flooded below the Beroukna valley. It could show a record of the base-level rise of the hydrologic network after pre-Badenian entrenchment.

d'érosion régressive, donnant des profondeurs d'incision de vallées de 150-200 m, avant la fossilisation par les molasses. Les karsts anté-badéniens sont bien connus : karst à pitons partiellement exhumé de Zbrazov en République Tchèque à proximité de la frontière polonaise, cavités remplies de molasses fossilifères du karst bohémien, cavités et morphologies fluvio-karstiques du karst morave [Kadlek, Hercman *et al.*, 2001]. Dans le karst bohémien, la Podtráťová jeskyně est un puits-cheminée partiellement dénoyé, de plus de 100 m de hauteur, connu par plongée jusqu'à -68 m. Il se développe sous le niveau de la vallée de la Beroukna, qui fut en partie incisée avant le Burdigalien puis surcreusée au Pléistocène [Bruthans et Zeman, 2003 ; figure 12]. Si certaines cavités de la région sont d'origine hypogène, la physiographie en puits-cheminée de ce réseau noyé semble bien correspondre à l'empreinte de l'adaptation *per ascensum* du karst à une remontée du niveau de base.

II.B. 3- Transgression glacio-eustatique

Les remontées marines post-glaciaires peuvent affecter des karsts littoraux et envoyer les réseaux karstiques (photo 1). Les indicateurs de creusement des réseaux en phase de bas niveau marin sont nombreux, avec des cavités développées jusqu'à 120 m sous le niveau marin et recélant des concrétions submergées. On observe notamment ce type de karst noyé sur le pourtour du golfe du Mexique :



Photo 1 – Les fontaines bleues du château de Beaulon (Charente-Maritime) sont des sources vaclusiennes, drainant un karst profond, ennoyé par transgression dans l'estuaire de la Gironde (cliché P.Audra).

The Blue Fountains of the Château de Beaulon (Charente-Maritime) are vaclusian springs fed by a deep phreatic karst, which was flooded after the last glacio-eustatic sea level rise into the Gironde estuary.

péninsule du Yucatan, *Blue Holes* des Bahama, Wakula Spring en Floride, etc. (figure 13). Les émergences actuelles correspondent à des conduits remontants sous forme de sources vaclusiennes ou littorales.

Dans l'Eure, le karst de la craie de Normandie, à 120 km de l'embouchure de la Seine mais à seulement 8 m d'altitude, est sous l'influence directe

de l'eustatisme pléistocène. Grâce à la porosité et à la forte conductivité de la craie, des variations mineures du niveau de base sont enregistrées par restructuration du karst. Dans le réseau de Caumont, une remontée de seulement 10 m a formé un puits-cheminée localisé à proximité du point d'émergence [Rodet, 1991 ; Rodet, Massei *et al.*, 2004].

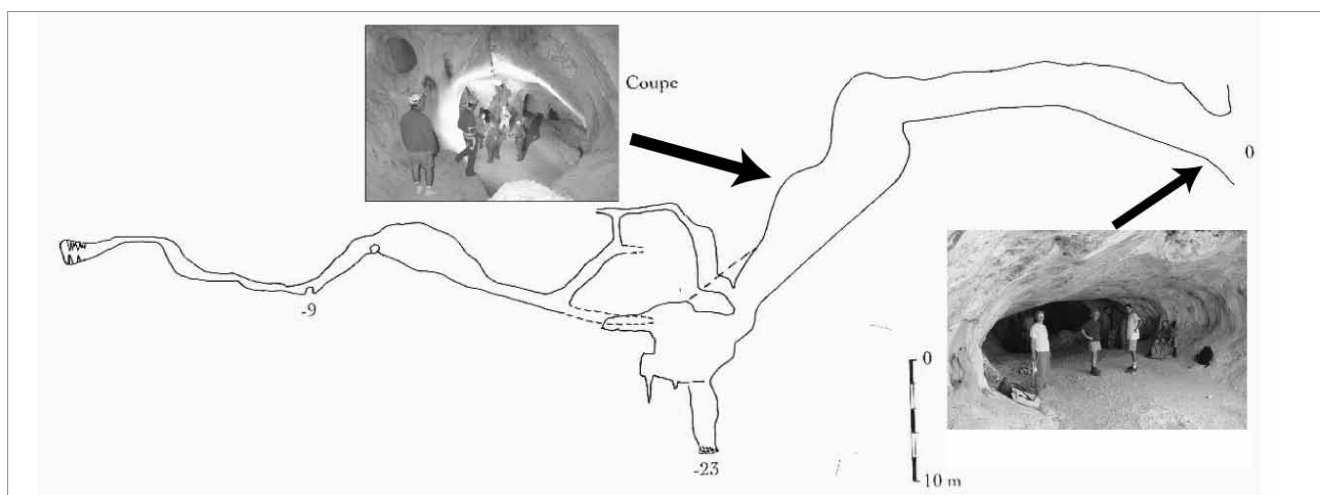


Figure 11 - L'aven de Valescure (Saumane-de-Vaucluse), une émergence burdigalienne. L'aven se situe à 415 m d'altitude, 300 m en contre-haut de la fontaine de Vaucluse (alt. 105 m), à l'apex d'une vallée fossilisée par les molasses burdigaliennes. Les formes d'érosion noyée (cloches, section en tube) et épinoyée (seuil dissymétrique) indiquent clairement un écoulement vers l'extérieur avec fonctionnement en trop-plein [clichés J.-Y. Bigot ; topographie in Gaubert et Le Falher, 1995]. Un âge burdigalien inférieur (20-18 Ma) est vraisemblable [Couturaud, 1992 ; Besson, Parize *et al.* 2005a ; Besson, Borgovini *et al.* 2005b ; Besson, Parize, Rubino *et al.* 1997].

The Aven de Valescure (Vaucluse), a Burdigalian emergence. The cave opens at an altitude of 415 m, 300 m above the famous Vaucluse spring (alt. 105 m), at the head of a pocket valley fossilized with Burdigalian molasses. The phreatic features (cupolas, tubes) and the epiphreatic features (asymmetric thresholds) clearly show an outward flow and episodic overflow flooding. A Burdigalian age (20-18 Ma) is likely.

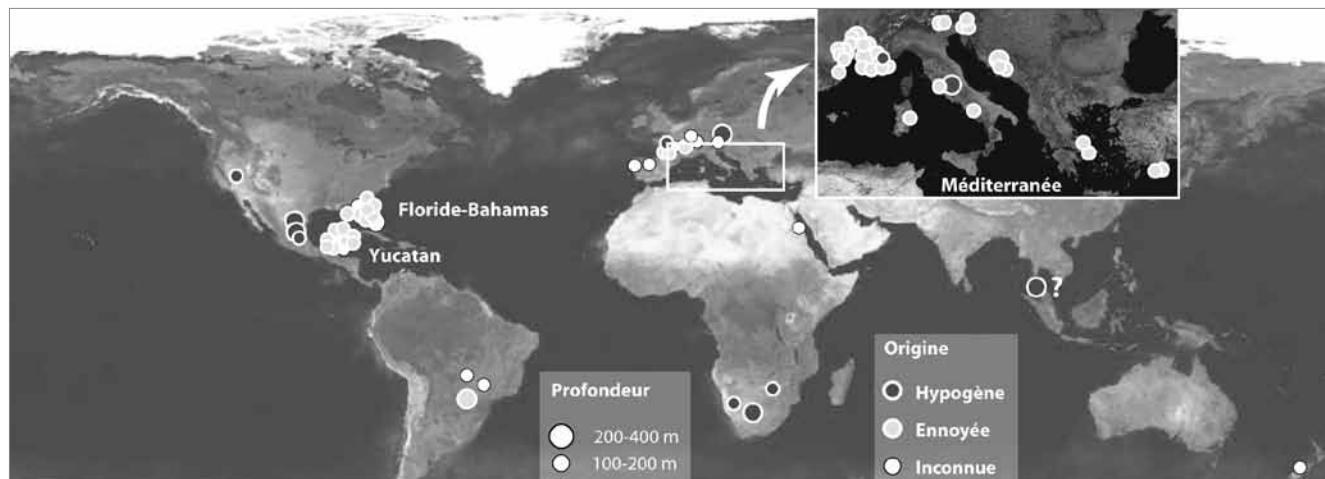


Figure 13 - Répartition et typologie des réseaux noyés profonds dans le monde.

Distribution and origin of the deepest phreatic cave systems in the world.

II.B. 4- Ennoyage fluvio-glaciaire

Le retrait glaciaire laisse des barrages morainiques dans les vallées, derrière lesquels s'accumulent des sédiments lacustres puis fluvioglaciers, parfois sur des épaisseurs de plusieurs centaines de mètres. Les anciens conduits raccordés au fond de la vallée peuvent s'en trouver colmatés. Ce contexte est alors propice à l'élaboration d'un puits-cheminée assurant l'écoulement du karst profond vers le niveau de base surélevé. La figure 14 présente trois exemples choisis dans les massifs français englacés au Pléistocène : le Jura (caborne de Menouille), les Pyrénées (grotte de Bétharram) et les Alpes (puits des Bans). Retenons que la hauteur du puits-cheminée est en partie fonction de l'ampleur de la remontée du niveau de base. La dénivellation totale d'une émergence de trop-plein peut atteindre 350 m dans le puits des Bans (Dévoluy), en raison de l'épaisseur considérable du remplissage fluvioglacière de la dépression du Trièves.

II.B. 5- Remontée du niveau de base par subsidence

Au Brésil, le lagoa Misteriosa (Jardim, Mato Grosso do Sul), est un puits noyé exploré en plongée jusqu'à 220 m de profondeur (figure 15). Cette région proche du Pantanal est affectée par une subsidence régionale [Auler, 2009]. D'un point de vue géomorphologique, les effets d'une telle tectonique sont assimilables à une remontée relative du niveau de base, provoquant l'ennoyage des vallées et par voie de conséquence l'ennoyage de la base du karst. La tectonique subsidente est probablement principalement à l'origine de ce puits noyé géant.

Néanmoins, la présence d'une branche noyée thermique nécessite de prendre également en considération la part des processus hypogènes dans la formation de cette cavité.

Les régions karstiques en subsidence sont moins fréquentes que celles en surrection. La spéléogénèse des karsts partiellement ennoyés dans ce contexte reste un domaine peu abordé.

Conclusion

La récente prise en compte du cycle eustatique messino-pliocène de Méditerranée a permis de formaliser un modèle de réponse du karst à une oscillation majeure de son niveau de base. Le principal modèle conceptuel qui s'en dégage est la formation systématique de conduits ascendants, appelés puits-cheminées, sous l'impulsion de la remontée du niveau de base pliocène.

Dans un contexte élargi aux autres causes de remontée du niveau de base (eustatisme, sédimentation fluviale, subsidence tectonique) dont l'ampleur est moins significative, il s'avère pourtant que les réseaux ennoyés par cette dynamique ont répondu et développé les mêmes formes de conduits en puits-cheminées.

Les grands réseaux noyés connus dans le monde (figure 13) peuvent ainsi trouver une explication globale à leur genèse. Un certain nombre de réseaux, d'origine hypogène, sont associés à des remontées d'eaux profondes, fréquemment thermales, carboniques et sulfuriques (Bushmanghat, Afrique du Sud ; Devil's Hole, Utah ; Zacaton, Mexique...) [Audra, 2007], mais une grande partie des autres cas peut s'expliquer par une remontée du niveau de base (figure 13). Cette

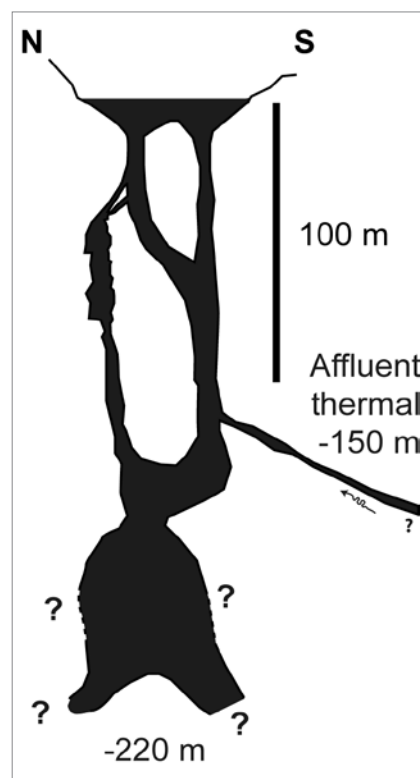


Figure 15 – Lagoa Misteriosa (Jardim, Mato Grosso do Sul, Brésil) : un puits noyé géant de plus de 200 m de profondeur. Il constitue un regard sur un karst ennoyé par la subsidence régionale de cette région proche du Pantanal (topographie G. Menezes).

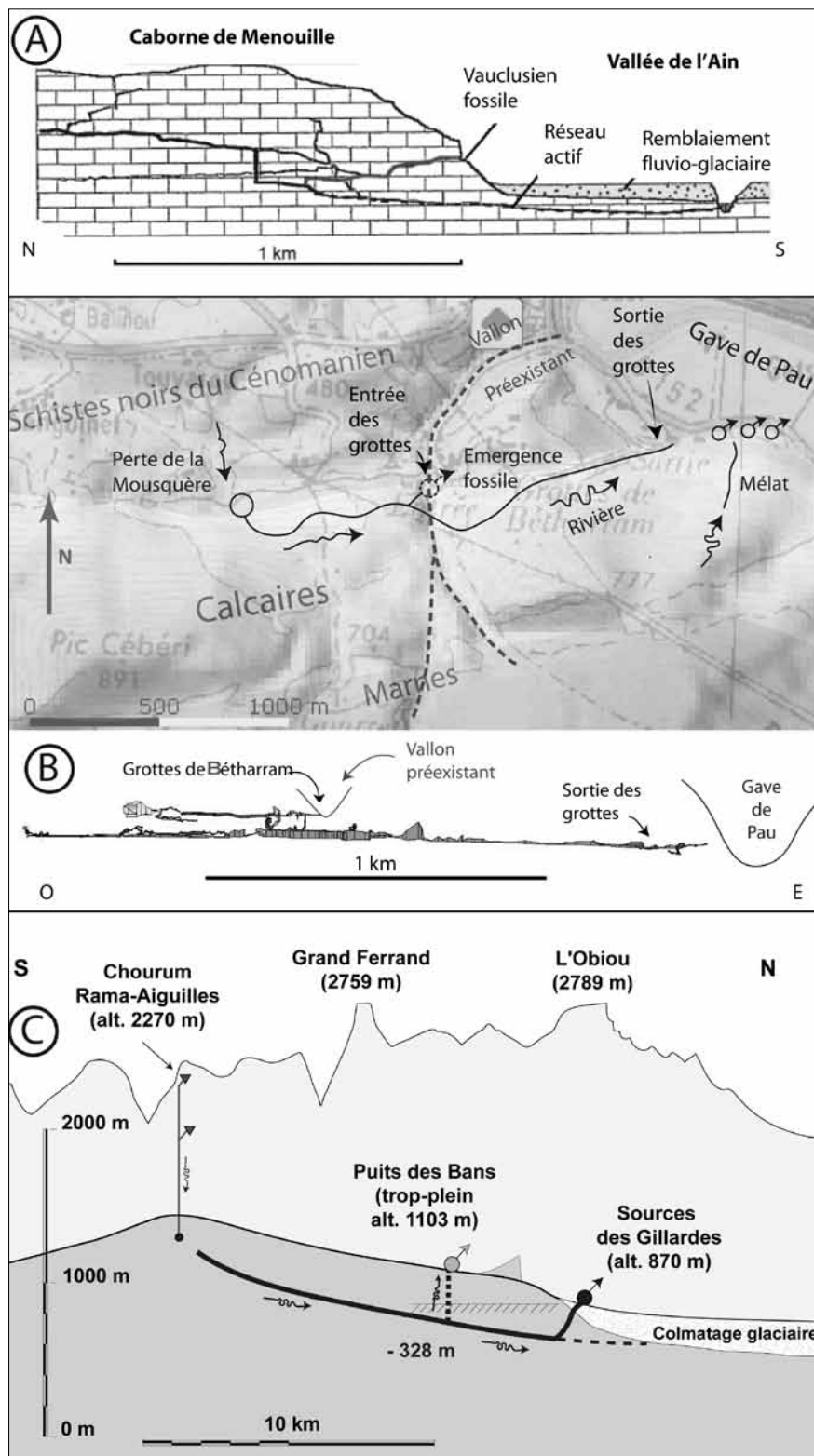
Lagoa Misteriosa (Brazil), a 200-m deep phreatic shaft, a window in a karst aquifer flooded after the subsidence of this area close to the Pantanal.

remontée - quelle qu'en soit la cause - est responsable, non seulement de l'ennoyage, mais également de la structuration des conduits ascendants, puits-cheminées et sources vauclusiennes.

Certes, tous les autres cas de grands réseaux noyés n'ont pas encore

été élucidés, mais l'hypothèse de la spéléogenèse *per ascensum* par remontée du niveau de base a permis d'identifier l'origine d'un grand nombre d'entre eux. Cette étude montre que la genèse des réseaux noyés profonds ne peut trouver comme explication le simple passage des écoulements à grande profondeur.

La majeure partie de ces réseaux noyés ont été structurés soit par des remontées d'eaux profondes (i. e. « hypogènes »), soit ont été ennoyés par une remontée du niveau de base, impliquant nécessairement une phase préalable de structuration des drains à proximité du niveau de base.



Remerciements

À J.-P. Peulvast, pour la relecture du manuscrit et pour ses remarques constructives.

Figure 14 – Mise en place de puits-cheminées débouchant sur des émergences vauclusiennes sous l'effet de remontées de niveau de base par colmatage fluvio-glaciaire des vallées. A- La Caborne de Menouille (Jura), dont l'orifice inférieur fonctionne en trop-plein, suite au remblaiement de la vallée de l'Ain [d'après Frachon, 1969]. B- La grotte de Bétharram (Hautes-Pyrénées). Le réseau inférieur a été obstrué par un remblaiement fluvio-glaciaire de la vallée du gave de Pau. Le puits-cheminée s'est raccordé à un ancien étage émergeant dans un vallon [traitement de la topographie du Groupe spéléo des Hautes-Pyrénées par J.-P. Cassou ; report J.-Y. Bigot]. C- Le puits des Bans (Dévoluy, Hautes-Alpes). Le colmatage de la dépression du Trièves par les dépôts glaciaires, fluvio-glaciaires et glacio-lacustres a bloqué l'émergence des Gillardes. Le puits des Bans est apparu en tant que puits-cheminée de plus de 300 m de dénivellation. L'obstruction des Gillardes par des dépôts de versant maintient le fonctionnement du puits des Bans en trop-plein occasionnel [schéma J.-Y. Bigot et P. Bertochio].

The filling of the valleys by fluvio-glacial sediments produced a baselevel rise, which in turn gave origin to chimney-shafts opening as vauclusean springs. A- The Caborne de Menouille (Jura). Its entrance currently acts as an episodic overflow, as a consequence of the Ain valley filling. B- The Bétharram show-cave (Pyrénées). The lower level has been plugged by the fluvio-glacial sediments of the Gave de Pau. A chimney-shaft was connected to the upper level, which opened into a small tributary valley. C- The Puits des Bans and the Gillardes Spring (French Alps). The basin fill (glacial, lacustrine, and fluvio-glacial) has blocked the Gillardes Spring. In high water, the Puits des Bans, a 300m-high chimney-shaft, floods and overflows.

Bibliographie

- ANTHONY D.M. and GRANGER D.E. - 2004 - A Late Tertiary origin for multilevel caves along the western escarpment of the Cumberland Plateau, Tennessee and Kentucky, established by cosmogenic ²⁶Al and ¹⁰Be. *Journal of Cave and Karst Studies*, vol. 66, n° 2, p. 46-55.
- AUDRA P. - 1997 - Les réseaux noyés profonds français et leur origine. *7^e Rencontre d'octobre, La Sainte-Baume. Spéléo-club de Paris*, p. 27-31.
- AUDRA P. - 2007 - Karst et spéléogénèse épigènes, hypogènes, recherches appliquées et valorisation. *Habilitation à diriger des recherches, Université de Nice Sophia-Antipolis*. 278 p.
- AULER A.S. - 2009 - Styles of hypogene cave development in ancient carbonate areas overlying non-permeable rocks in Brazil and the influence of competing mechanisms and later modifying processes. *Ukrainian Institute of Speleology and Karstology, Special Paper, 1. Proceedings of the Conference "Hypogene speleogenesis and karst hydrology of artesian basins", Chernivtsy, Ukraine*, p. 173-180.
- BAYLÉ B. et GRAILLOT D. - 1987 - Compte-rendu hydrogéologique de l'opération Spéléonaute du 2/8/85, Fontaine de Vaucluse. *Karstologia* n° 9, p. 1-6.
- BESSON D., PARIZE O., RUBINO J.-L., AGUILAR J.-P., AUBRY M.-P., BEAUDOIN B., BERGGREN W.A., CLAUZON G., CRUMEYROLLE P., DEXCOTE Y., FIET N., IACCARINO J., JIMENEZ-MORENO G., LAPORTE GALAA C., MICHAUX J., SALIS K.V., SUC J.-P., REYNAUD J.-Y. et WERNLI R. - 2005a - Un réseau fluviatile d'âge Burdigalien terminal dans le Sud-Est de la France: remplissage, extension, âge, implications. *Compte rendu Geoscience* n° 337, p. 1045-1054.
- BESSON D., BORGOVINI R., CONESA G., CORNEE J.-J., DEMORY F., DEXCOTE Y., DUVAİL C., GALLONI F., LE STRAT P., MÜNCH P., OUDET J., PARIZE O., REYNAUD J.-Y. et 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 »*.
- BIGOT J.-Y. - 2002 - Conduits ascendants dans les gorges de l'Ardèche : les avens Cordier, Rochas et de Noël. *12^e Rencontre d'octobre, La Bachelierie. Spéléo-club de Paris*, p. 15-19.
- BLANC J.-J. et MONTEAU R. - 1988 - Le karst du massif des Calanques (Marseille-Cassis). *Karstologia* n° 11-12, p. 17-24.
- BLAVOUX B., GILLI E. et ROUSSET C. - 2004 - Alimentation et origine de la salinité de l'émergence karstique sous-marine de Port Miou, Marseille - Cassis - Bouches-du-Rhône. *C.R. Geosciences*, n° 336, p. 523-533.
- BRUTHANS J. and ZEMAN O. - 2003 - Factors controlling exokarst morphology and sediment transport trough caves: comparison of carbonate and salt karst. *Acta carsologica*, vol. 32, n° 1, p. 83-99.
- CAMUS H. - 2003 - Vallées et réseaux karstiques de la bordure carbonatée sud-cévenole. Relations avec la surrection, le volcanisme et les paléoclimats. *Thèse, Université Bordeaux 3*. 675 p.
- CAVALERA T. - 2007 - Étude du fonctionnement et du bassin d'alimentation de la source sous-marine de Port-Miou (Cassis, Bouches-du-Rhône). Approche multicritères. *Thèse, Université de Marseille*, 403 p.
- CLAUZON G. - 1982 - Le canyon messinien du Rhône : une preuve décisive du "Desiccated deep-basin model" [Hsu, Cita, Ryan, 1973]. *Bulletin de la Société géologique de France*, vol. 24, n° 3, p. 597-610.
- CLAUZON G., PUIG J.-M. et GUENDON J.-L. - 1997 - Manifestations karstiques induites par le creusement messinien: exemples rhodano-duranciens. Réunion « Géomorphologie quantitative et paléogéographie dans le domaine karstique méditerranéen », La Sainte-Baume, 1-3 octobre, *Livret-guide, Association Française de Karstologie, Bordeaux et Centre aixois de géographie physique, Aix-en-Provence*. 33 p.
- COGNARD-PLANCQ A.-L., GEVAUDAN C. et EMBLANCH C. - 2006 - Apports conjoints de suivis hydroclimatologique et hydrochimique sur le rôle de filtre des aquifères karstiques dans l'étude de la problématique de changement climatique : Application au système de la Fontaine de Vaucluse, France). *8th Conference on Limestone Hydrogeology, Neuchâtel, 21-23 septembre*, p. 67-70.
- COLLINA-GIRARD J. - 1996 - Préhistoire et karst littoral : la grotte Cosquer et les Calanques Marseillaises, Bouches-du-Rhône, France. *Karstologia* n° 27, p. 27-40.
- COUTURAUD A. - 1992 - Les cavités du Comtat venaissin (Vaucluse). *Spelunca* n° 45, p. 25-32.
- DOUCHET M. et FAGE L.-H. - 1993 - En plongée sous les Calanques. Port Miou et le Bestouan. *Spéléo* n° 12, p. 3-6.
- FORD D.C. - 1977 - Genetic classification of solutional cave systems. *7th International Congress of Speleology, Sheffield, September 10-17. International Union of Speleology and British Cave Research Association, Bridgwater*, p. 189-192.
- FRACHON J.-C. - 1969 - Les reculées du Jura lédonien, étude géomorphologique. <www.Juraspeleo.com/docu/reculees>. 135 p.
- GAUBERT G. et LE FALHER B. - 1995 - Les arcanes de Vaucluse, t. 2 : Hydrologie et spéléologie des territoires alimentant en eau la fontaine de Vaucluse. *Association de Recherches et d'Études hydrologiques du Plateau d'Albion (AREHPA)*, 338 p.
- GILLI E. - 2001 - Compilation d'anciennes mesures de débit à Port Miou. Apport à l'hydrogéologie de la Provence. *7^e Colloque d'hydrogéologie en pays calcaire et milieu fissuré. 4-7 septembre 2000, Besançon*, p. 157-160.
- GILLI E. et 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. *Compte-rendu Geosciences*, t. 336, n° 16, p. 1481-1489.
- GRANGER D.E., FABEL D. and PALMER A.N. - 2001 - Plio-Pleistocene incision of the Green River, Kentucky, from radioactive decay of cosmogenic ²⁶Al and ¹⁰Be in Mammoth Cave sediments. *Geological Society of America Bulletin*, vol. 113, n° 7, p. 825-836.
- HAQ B.U., HARDENBOL J. and VAIL P. - 1987 - Chronology of fluctuating sea levels since the Triassic (250 million years ago to present). *Science* n° 235, p. 1156-1167.
- HÄUSELMANN P., GRANGER D.E., JEANNIN P.-Y. and LAURITZEN S.E. - 2007 - Abrupt glacial valley incision at 0.8 Ma dated from cave deposits in Switzerland. *Geology*, vol. 35, n° 2, 143-146.

- KADLEK J., HERCMAN H., BENES V., SROUBEK P., DIEHL J.F. and GRANGER D. - 2001 - Cenozoic history of the Moravian karst (northern segment): cave sediments and karst morphology. *Acta Musei Moraviae - Scientiae Geologicae*, t. LXXXVI, p. 11-160.
- MOCOCHAIN L. - 2007 - Les manifestations géodynamiques - externes et internes - de la crise de salinité messinienne sur une plate-forme carbonatée périméditerranéenne : le karst de la Basse-Ardèche (Moyenne vallée du Rhône ; France). *Thèse de doctorat, CEREGE, Université de Provence, Aix-en-Provence*, 221 p.
- MOCOCHAIN L., CLAUZON G., BIGOT J.-Y. et BRUNET P. - 2006a - Réponses de l'endokarst ardéchois aux variations eustatiques générées par la crise messinienne. *Bulletin de la Société Géologique de France*, t. 177, n° 1, p. 27-36.
- MOCOCHAIN L., CLAUZON G., BIGOT J.-Y. and BRUNET P. - 2006b - Geodynamic evolution of the perimediterranean karst during the Messinian and the Pliocene: evidence from the Ardèche and the Rhône Valley systems canyons, Southern France. *Sedimentary Geology*, vol. 188-189, p. 219-233.
- MOCOCHAIN L., BIGOT J.-Y., CLAUZON G., FAVERJON M. et BRUNET P. - 2006c - La grotte de Saint-Marcel (Ardèche): un référentiel pour l'évolution des endokarsts méditerranéens depuis 6 Ma. *Karstologia* n° 48, p. 33-50.
- MOCOCHAIN L., AUDRA P., CLAUZON G., BELLIER O., BIGOT J.-Y., PARIZE O. and MONTEIL P. - 2008 - The effect of river dynamics induced by the Messinian Salinity Crisis on karst landscape and caves: example of the Lower Ardèche River (mid Rhône valley). *Geomorphology*, vol. 106, n° 1-2, p. 46-61.
- PALMER A.N. - 1987 - Cave levels and their interpretation. *The National Speleological Society Bulletin*, t. 49, p. 50-66.
- PARIZE O., RUBINO J.-L. et JAVAUX C. - 1997 - Architecture et géométrie des corps tidaux bioclastiques comblant les paléovallées miocènes au sud-est du bassin de Carpentras. *6^e Congrès de l'Association des sédimentologues français, Montpellier, 17-19 novembre, Publication ASF n° 27*, p. 215-216.
- RODET J. - 1991 - La craie et ses karsts. *Thèse d'État, Université Paris IV., Centre Normand d'étude du Karst, Elbeuf et Groupe Seine, Rouen*. 560 p.
- RODET J., MASSEI N., LAIGNEL B. and DUPONT J.-P. - 2004 - The Karstic delta as a morphological consequence of base level variations. Example of a chalk karst system in the Western Paris Basin (Normandie, France). *Actes des Journées européennes de l'AFK - Le karst de la craie en Normandie, Rouen, 10-12 septembre 2003*, p. 64-65.
- SCHLUPP A., CLAUZON G. et AVOUAC J.-P. - 2001 - Mouvements post-messinien sur la faille de Nîmes : implications pour la sismo-tectonique de la Provence. *Bulletin de la Société Géologique de France*, vol. 172, n° 6, p. 697-711.