

Ludovic MOCOCHAIN¹⁻²,
Jean-Yves BIGOT³,
Georges CLAUZON¹,
Marc FAVERJON⁴
et Philippe BRUNET⁵

(1) Université Aix-Marseille I, CEREGE,
Europole Méditerranéen de l'Arbois,
BP 80, 13545 Aix-en-Provence cedex 4

(2) Ecole des Mines de Paris
Laboratoire de sédimentologie,
35, rue Saint-Honoré,
77305 Fontainebleau cedex
ludomochain@gmail.com

(3) Les 7 portes, 04400 Barcelonnette

(4) Salita del Molinello, 32/5,
16035 Rapallo (GE), Italia

(5) 21, rue L. Sablet, 94200 Ivry

La grotte de Saint-Marcel (Ardèche) : un référentiel pour l'évolution des endokarsts méditerranéens depuis 6 Ma

RÉSUMÉ : Le plateau de Saint-Remèze est formé d'une plate-forme carbonatée d'âge mésozoïque qui borde la moyenne vallée du Rhône. Cette plate-forme est intensément karstifiée, comme l'atteste la grotte de Saint-Marcel dont le développement dépasse 53 km. La grotte de Saint-Marcel présente un étagement des réseaux sur plusieurs niveaux. Deux de ces niveaux (intermédiaire et supérieur) présentent des conduits dont une grande partie est abandonnée par les écoulements, ils présentent de grandes sections de conduits qui se développent horizontalement sur plusieurs kilomètres. Le troisième niveau (inférieur) est actif et partiellement noyé, il a été reconnu en plongée jusqu'à 65 m sous le niveau de l'Ardèche. L'étagement des niveaux horizontaux n'a aucun lien avec la structure géologique qui est recoupée sans distinction. Cette observation permet de saisir le rôle structurant du niveau de base et de prendre en compte son évolution dans la formation du karst ardéchois.

Dans le périmètre des gorges de l'Ardèche et de la moyenne vallée du Rhône, l'investigation des niveaux repères générés par la crise de salinité messinienne permet une restitution de l'évolution du niveau de base régional. Cette restitution de l'évolution des niveaux a permis d'étudier la grotte de Saint-Marcel dans un cadre géodynamique et chronologique d'une durée de six millions d'années. Couplées aux variations du niveau de base, les investigations morphologiques menées dans la grotte ont restitué trois grandes phases de spéléogénèse et deux grands modes de circulation des eaux souterraines. Il s'agit en premier lieu de la structuration en profondeur du drainage du plateau de Saint-Remèze lors du creusement des canyons messiniens durant la crise de salinité. Au lendemain de la crise, à 5,32 Ma, la transgression pliocène a provoqué une brusque remontée du niveau de base

produisant un refoulement hydrologique aux exutoires du karst messinien. La résistance hydraulique a déclenché le creusement *per ascensum* de conduits vaclusiens : les puits-cheminées. La réponse du système de drainage s'est reproduite au cours du Pliocène à chaque stade de la remontée du niveau de base.

Durant le Pliocène (5,32 à 2 Ma), lors du remblaiement des rias, l'Ardèche a aussi connu de longues phases de stabilité propices à la spéléogénèse.

Il s'agit d'un drainage des eaux du plateau de Saint-Remèze sur lequel se sont connectés de larges recoupements souterrains de méandre de l'Ardèche.

L'observation détaillée des grands niveaux de l'endokarst a révélé en retour l'existence de stades intermédiaires dans l'évolution du niveau de base et permis d'affiner et d'enrichir la connaissance de l'évolution du niveau de base régional.

MOTS-CLÉS : Ardèche, grotte de Saint-Marcel, crise de salinité messinienne, puits-cheminée, karst profond, spéléogénèse *per ascensum*, recoupement souterrain de méandre.

ABSTRACT: SAINT MARCEL CAVE: AN IMPORTANT SITE FOR THE EVOLUTION OF THE MEDITERRANEAN ENDOKARST IN THE LAST 6 MILLION YEARS.

The plateau of Saint-Remèze is a mesozoic carbonate platform located close to the Rhône valley. This carbonate platform is intensely karstified, as proven by Saint-Marcel Cave, which is 53 km long. It displays several horizontal levels. The upper and middle levels are dry most of the time. They are composed of large horizontal conduits extending over several kilometers. The lowermost third level is active and partly drowned. Scuba divers have reached a depth of 65 m below the Ardèche. The horizontal levels are not controlled by geological structure. Consequently, the distribution of the horizontal levels depends only on the

base level which constrains the whole organisation of the Ardèche karst. Around the Ardèche Canyon and the Rhône Valley, the identification of the marks made by the messinian salinity crisis allows to reconstruct the evolution of the local base level.

This reconstruction allowed us to study the Saint-Marcel Cave in a geodynamical and chronological frame over the last six million years. The morphological investigations in the cave, combined with the study of the base level change, have shown three main stages of speleogenesis and two main types of water flow. Following entrenchment of the deep messinian canyons during the salinity crisis, cave levels developed according to the very deep base level of that time. At the end of the crisis, at 5.35 Ma, the Pliocene transgression caused a sudden rise of the base level. The messinian valleys as well as the karst outflows were flooded.

This hydraulic change produced a *per ascensum* genesis of some shafts that are called chimney-shafts. This *per ascensum* genesis of chimney-shafts repeated itself at each stage of the Pliocene base level rise. During the Pliocene (5.32 to 2 Ma), the infilling of the messinian canyons by fluvial sediments shows that the Ardèche river had several long stages of base level stability, allowing the development of new cave levels. The karst system was fed by both local recharge from the Saint-Remèze Plateau and large underground shortcuts through the Ardèche river meanders. The detailed study of the main levels in Saint-Marcel Cave reveals the existence of intermediate stages in the evolution of the base level, allowing us to refine its knowledge.

KEY WORDS: Ardeche, Saint Marcel Cave, Messinian salinity crisis, aven-pitch, deep phreatic karst, speleogenesis *per ascensum*, fluvial meander shortcut.

Introduction

La grotte de Saint-Marcel est une grande classique spéléologique française qui fait l'objet d'une exploitation touristique tout en restant accessible aux spéléologues. La grotte doit son succès à ses galeries à grands volumes qui s'étendent sur plusieurs kilomètres sous le plateau de Saint-Remèze (doc. VI, hors texte).

La cavité s'ouvre en rive gauche de l'Ardèche et se développe principalement sur trois grands étages. Deux étages sont fossiles et situés très en contre-haut de l'Ardèche; le troisième est actif et se développe en grande partie sous ou au niveau de l'Ardèche. L'étagement des réseaux est indépendant des données structurales du massif. En effet, le profil en long des réseaux recoupe sans incidence la structure plissée du massif. L'indépendance du karst et de la structure géologique montre le caractère polyphasé de l'endokarst dont l'étagement résulte des positions successives du niveau de base contrôlé par l'Ardèche [Guérin, 1973; Belleville, 1985]. Les récentes études menées dans la vallée du Rhône [Clauzon, 1982] et dans la basse vallée de l'Ardèche [Martini, 2005; MocoCHAIN, 2001, 2002, 2004; MocoCHAIN *et al.*, 2006a & b] proposent un canevas géodynamique et chronologique pouvant inclure toutes les étapes de formation de l'endokarst.

L'article présente les résultats d'une étude qui s'appuie sur une relecture morphologique et sédimentaire des réseaux de la grotte de Saint-Marcel; cette étude est ensuite replacée dans un cadre géodynamique régional fortement marqué par le cycle eustatique messinopliocène. L'approche karstologique proposée ici s'articule autour d'une double problématique, d'une part le fonctionnement hydrologique des grands niveaux de karstification et, d'autre part, la dynamique d'étagement liée aux positions occupées par l'Ardèche au cours de son évolution.

I. Morphogénèse du plateau de Saint-Remèze

Le plateau de Saint-Remèze est formé d'une puissante série carbonatée crétacée de faciès urgonien (250-300 m). Elle est délimitée : au nord, par les massifs de la Dent de Rez (719 m) et du Serre de Barrès (667 m), au sud, par le synclinal d'Issirac d'axe est-ouest et recouvert de sédiments éocènes au faciès

calcaire peu karstifiable, à l'est par la vallée du Rhône et à l'ouest par la plaine de Vallon-Pont-d'Arc qui prolonge la terminaison septentrionale du fossé d'Alès (doc. I, hors texte).

Cette épaisse série carbonatée a été plissée à l'Eocène durant la phase pyrénéenne, pour former un large brachyanticlinal d'orientation est-ouest, puis hachée ensuite par diverses phases tectoniques oligo-miocènes [Pascal *et al.*, 1989]. Cette structure plissée et faillée est recoupée par trois épisodes d'aplanissement, lui conférant son caractère morphologique de plateau [Baulig, 1928; Cornet, 1988; MocoCHAIN *et al.*, 2006b].

Au cours de la formation des Alpes, les reliefs ardéchois se trouvaient en périphérie immédiate de la mer péri-alpine miocène. Cette position en bordure de la mer péri-alpine a exposé ces reliefs à l'action du sapement des vagues, lors des hauts niveaux marins du Miocène moyen. Cette érosion est responsable d'un aplanissement généralisé d'ampleur régionale correspondant à une surface fondamentale située à 400 m d'altitude encore bien visible dans le paysage. Cette surface fondamentale recoupe notamment le sommet de l'anticlinal de Saint-Remèze [MocoCHAIN *et al.*, 2006b]. Au cours du Miocène supérieur, entre 10 et 6 Ma, la mer se retire du plateau (surface fondamentale) pour laisser place aux rivières drainant la retombée des Cévennes. L'Ardèche s'installe sur la surface fondamentale comme l'atteste la présence d'épandage épars de galets siliceux sur les plateaux (formations observées sur la butte du bois de Saleyron). A partir de cette position, la rivière évolue en encaissement par surimposition entre l'anticlinal de Saint-Remèze au nord et celui de Saleyron au sud. Le second aplanissement est emboîté dans le précédent. Il est le résultat de l'action conjuguée de la rivière et des mécanismes de crypto-corrosion. Cet aplanissement, en partie démantelé par l'érosion, forme une surface à l'altitude moyenne de 330 m. La genèse du second aplanissement a pu être corrélée à l'épisode décrit dans les travaux de J. Martini qui correspond à de larges recoupements souterrains de méandre de 7 km de développement entre les altitudes de 380 m et 360 m, il s'agit de paléo-drains appelés « paléo-rivière souterraine de Saint-Remèze ». Ces paléo-drains

démantelés par le recul du versant, attestent la présence de la paléo-Ardèche à la fin du Miocène sur le plateau [Martini, 2005]. L'Ardèche est alors tributaire du paléo-Rhône qui coule vers 330 m d'altitude au droit du belvédère de Saint-Remèze [Clauzon, 1982].

Les reliefs générés par la crise de salinité messinienne

La crise de salinité correspond à un abaissement de 2500 m du niveau de la mer Méditerranée par évaporation [Ryan *et al.*, 1973]. Cet effondrement du niveau marin provoque le creusement de profonds canyons comme celui du Rhône qui atteint 1500 m de profondeur au droit des Saintes-Maries-de-la-Mer [Clauzon, 1982], ou encore celui du Nil [Barber, 1981] qui atteint 2000 m de profondeur à son embouchure. Le creusement du canyon du Rhône, jusqu'à -236 m NGF au niveau de Pierrelatte [Demarq, 1960; Clauzon, 1982; doc. I, hors texte], entraîne le creusement des gorges de l'Ardèche au maximum jusqu'à leur profondeur actuelle à 50 m NGF au droit de Saint-Martin d'Ardèche [Belleville, 1985; MocoCHAIN, 2001; MocoCHAIN *et al.*, 2006b]. Ce différentiel de creusement de 300 m, entre les canyons messiniens du Rhône et de l'Ardèche (+50 Ardèche et -236 m Rhône), est vraisemblablement d'origine karstique à en juger par la découverte d'un important karst noyé reconnu en plongée sous le lit de l'Ardèche [Brunet, 2000]. On peut penser que la genèse de ce karst noyé a en effet ralenti, sinon stoppé, l'incision du canyon messinien de l'Ardèche par engouffrement des eaux de la rivière dans des pertes afin de rejoindre par un trajet souterrain la vallée messinienne du Rhône. L'exploration du karst noyé a révélé l'existence de morphologies de la zone vadose du karst, au moins reconnues à 45 m sous le niveau actuel de l'Ardèche (doc. VII, hors texte). La genèse de telles formes implique un niveau de base situé en dessous des formes vadoses observées, ce qui conforte l'hypothèse d'un écoulement souterrain de l'Ardèche en direction du Rhône messinien.

La formation d'un karst profond au cours de la crise de salinité est aussi attestée en bordure du canyon du Rhône. En effet, les six cents mètres d'incision verticale du fleuve ont provoqué la formation d'un drainage très profond, reconnu en plongée jusqu'à -150 m

NGF, et qui alimente les gouls de Tourne (Bourg-Saint-Andéol, Ardèche), [doc. I, hors texte et fig. 1 ; Mocochain *et al.*, 2006b].

La crise messinienne de salinité prend fin brutalement par la remontée du niveau marin à 5,32 Ma au tout début du Pliocène [Cita, 1975]. La vallée du Rhône [Clauzon *et al.*, 1995] et la partie aval des gorges de l'Ardèche, sont envahies par la mer (rias), ce qui correspond au haut niveau marin de l'époque [à + 80 m NGF sur la courbe eustatique universelle; Haq *et al.*, 1987]. Le terme de ría désigne des canyons submergés par la mer [Guilcher, 1954]. Ces profondes rias subissent alors un remblaiement important dû à l'apport sédimentaire du Rhône et de l'Ardèche. Le colmatage des rias débute par un cône deltaïque qui avance de l'amont vers l'aval par progradation, il s'agit d'un *Gilbert-type-fan-deltas* [Clauzon *et al.*, 1995]. Corrélativement, la progression du *Gilbert-delta* dans la ría génère un allongement du lit des rivières vers l'aval (fig. 2). En un point donné du paysage, cet allongement s'accompagne de l'exhaussement du lit des rivières par aggradation.

Au fil de leur progression, les *Gilbert-deltas* enregistrent la position du niveau marin sous forme d'une discontinuité sédimentaire séparant les sédiments terrestres du lit des rivières des sédiments déposés en mer au-delà du front des deltas. Dans la littérature [Clauzon *et al.*, 1995; Clauzon, 1996], cette discontinuité est appelée transition marin/continental. En bordure du plateau de Saint-Remèze, la **transition marin/continental** s'est élaborée à +80 m NGF, elle est visible sur le site de Trignan (Saint-Marcel-d'Ardèche; Ardèche) à l'altitude de 130 m pour un âge estimé à 4,7 Ma [Mocochain, 2001; Mocochain *et al.* 2006a]. Après sa formation, la **transition marin/continental**, ainsi que l'ensemble du plateau de Saint-Remèze, ont subi une surrection tectonique de 50 m qui explique leur altitude actuelle à 130 m NGF [Clauzon et Mocochain in Besson *et al.*, 2002]. Le remblaiement des rias par aggradation, s'est achevé dans la région de Saint-Marcel-d'Ardèche, vers 200 m d'altitude au niveau de la plaine de Granouillet [Mocochain, 2002; Mocochain *et al.*, 2006b].

Depuis le Pléistocène, l'Ardèche et le Rhône ont entamé une ré-incision

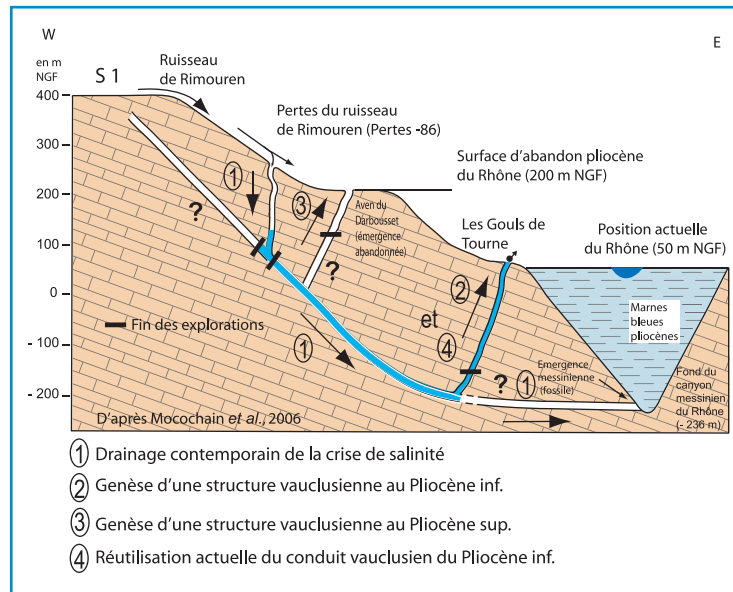


Figure 1 : Schéma simplifié en coupe de l'évolution du fonctionnement de la rivière souterraine de Tourne en rapport avec la vallée du Rhône. S1 : Surface fondamentale. Schematic profile of the evolution of the subterranean Tourne River in relation to the Rhone valley.

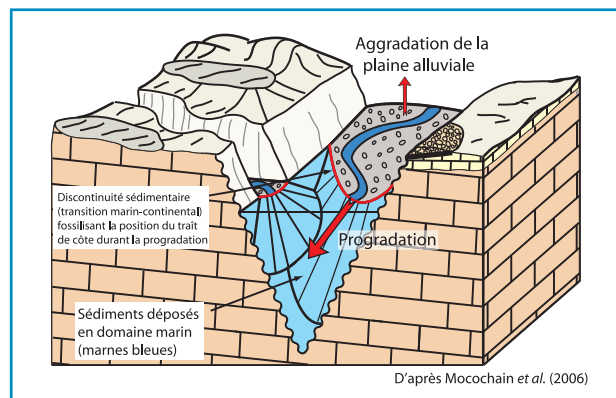


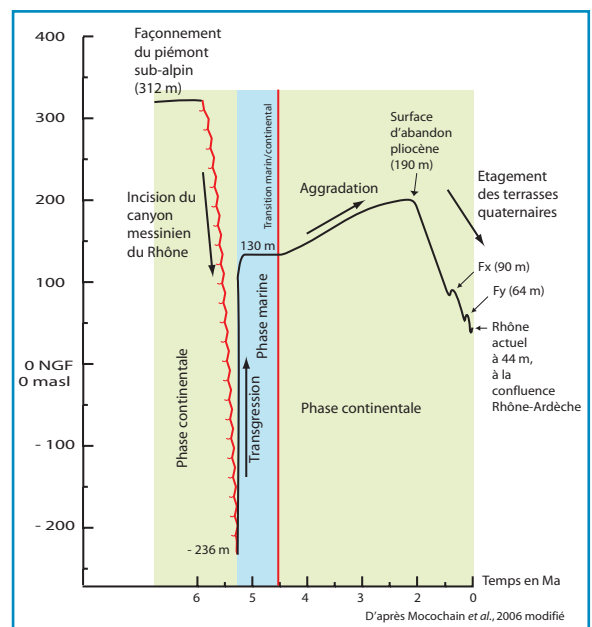
Figure 2 : Bloc diagramme illustrant l'évolution en comblement d'une ría par un Gilbert-delta. Three-dimensional sketch of a ría infill by Gilbert-type delta sediments.

par paliers de leur vallée, sous contrôle des fluctuations climatiques des cycles glaciaires. Cette ré-incision, toujours canalisée par les gorges de l'Ardèche, entraîne la disparition totale du remblaiement pliocène dans l'ensemble des gorges. L'Ardèche finit par occuper sa position actuelle, presque identique à sa position messinienne.

En résumé, la crise de salinité a généré dans le paysage ardéchois **quatre grands niveaux repères** qui retracent l'évolution du Rhône et de l'Ardèche depuis 6 Ma (fig. 3) : vers 6 Ma, l'Ardèche se situe à

l'altitude de 360 m, au niveau de la paléo-rivière souterraine de Saint-Remèze [Martini, 2005]. L'aplanissement formé par cette ancienne position de l'Ardèche, est appelé, dans la littérature, **surface d'abandon pré-évaporitique** [Clauzon, 1996] car elle marque

Figure 3 : Courbe d'évolution du niveau de base restituée d'après l'étude des niveaux repères en moyenne vallée du Rhône. Reconstitution of the base-level evolution by Messinian Pliocene benchmark levels in the middle Rhone valley.



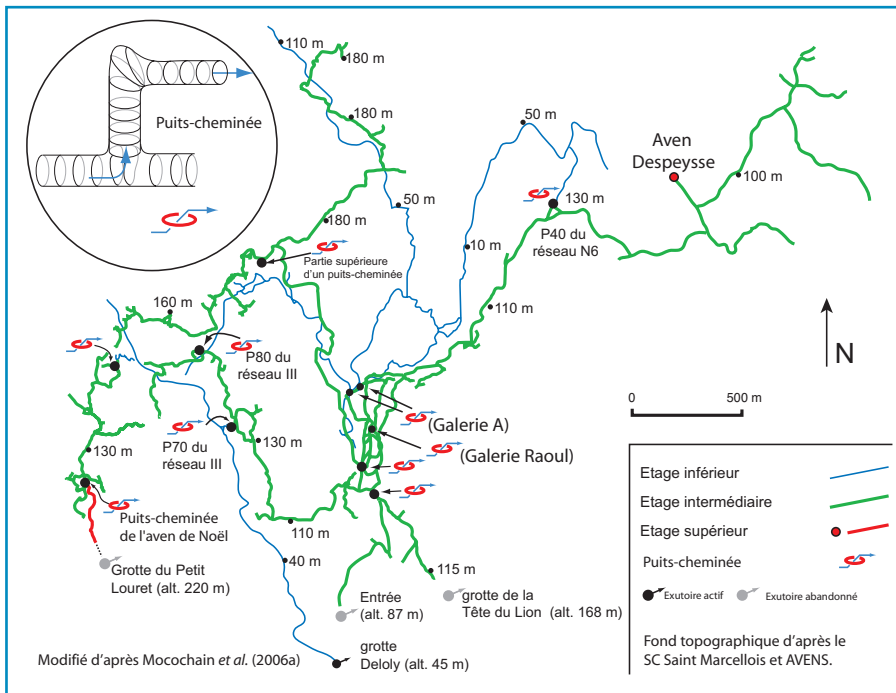
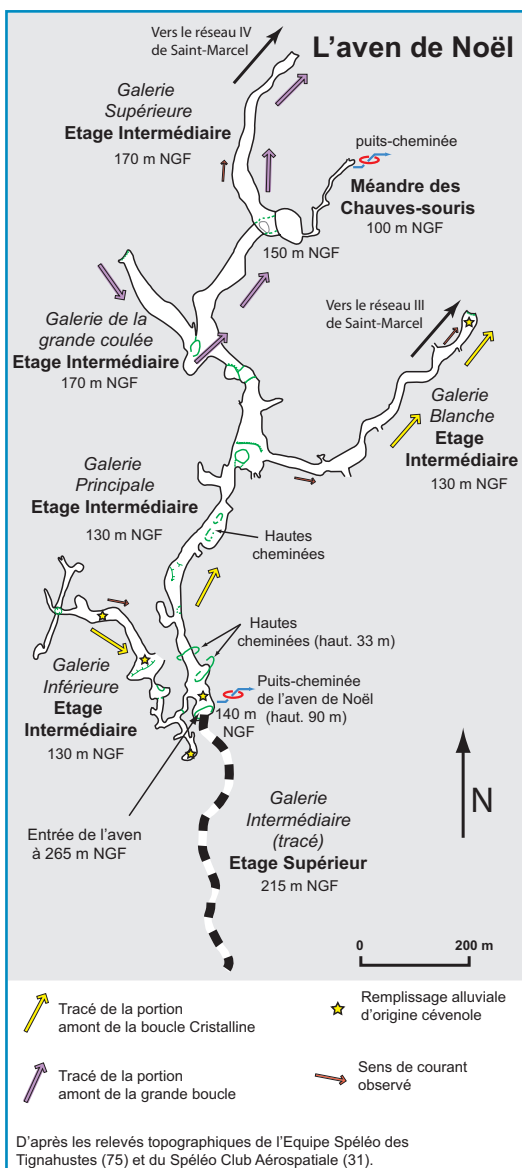


Figure 4 : Carte de localisation des puits-cheminées de la grotte de Saint-Marcel.
Location of aven-pitches in Saint Marcel Cave.



la position de l'Ardèche avant l'incision de son canyon messinien.

Le déclenchement de la crise de salinité à 5,95 Ma provoque une incision des canyons du Rhône et de l'Ardèche qui prend fin à 5,32 Ma. Le fond des talwegs se trouvant aux altitudes respectives de -236 m NGF [Clauzon, 1982] pour le Rhône et 50 m NGF au maximum pour l'Ardèche [Mocochain *et al.*, 2006b] constitue le second niveau repère. Il restitue la position des cours d'eau à la toute fin de la crise, juste avant leur submersion par la remise en eau pliocène.

A 5,32 Ma, la remise en eau de la Méditerranée fait remonter brusquement le niveau marin qui va ensuite demeurer stable jusqu'à l'arrivée progradante des Gilbert-deltas vers 4,7 Ma [Mocochain, 2002; Mocochain *et al.*, 2006a]. La position du haut niveau marin est restituée vers 130 m NGF par la transition marin/continental sur le site de Trignan (Ardèche; doc. I, hors texte).

Figure 5 : Plan de l'aven de Noël.
Map of Aven Noël Cave.

Le remblaiement des rias a pour conséquence l'exhaussement du lit des rivières par aggradation de 130 m à 200 m NGF entre 4,7 Ma et 2 Ma [Mocochain *et al.*, 2006a]. Cette position rehaussée des plaines alluviales sera ensuite abandonnée par ré-incision des vallées par les rivières au cours du Pléistocène, il s'agit de la surface d'abandon pliocène [Clauzon, 1996].

L'étude de ces niveaux repères fixe un cadre géodynamique et restitue les grandes tendances de l'évolution du niveau de base régional. Il se trouve que l'intégralité des réseaux de la grotte de Saint-Marcel s'inscrit dans les limites altimétriques des oscillations du niveau de base fixées par le cadre géodynamique. Ce cadre autorise ainsi une relecture des grandes phases de spéléogénèse du plateau de Saint-Remèze implicitement liées à l'évolution du niveau de base.

II. Les étages de la grotte de Saint-Marcel

La grotte de Saint-Marcel présente plusieurs étages de galeries subhorizontales qui sont superposés sur près de 230 m entre -10 et 220 m NGF. Les altitudes respectives des réseaux de Saint-Marcel permettent d'identifier trois grands étages : l'étage inférieur, dont le développement est compris entre -10 et 50 m d'altitude, l'étage intermédiaire, entre 80 m et 180 m d'altitude, et enfin l'étage supérieur qui se développe autour de 220 m d'altitude (fig. 4).

A) L'étage inférieur

L'étage inférieur, principalement composé du réseau V (doc. II, hors texte) comprend toute la partie noyée et post-siphon des réseaux de Saint-Marcel. Ils sont en général actifs et totalisent un développement de plus de 17 km. La difficulté d'exploration de l'étage inférieur rend difficile l'étude de son fonctionnement et son interprétation. Toutefois, nous savons que les eaux de l'Ardèche, chargées de détritiques provenant des pertes de la Cadière, empruntent une partie du réseau V. Les plongées ont aussi révélé un mélange des eaux turbides de la rivière avec des eaux plus froides et claires provenant du plateau. Principalement, deux rivières, celles de Saint-Marcel et de Bidon, alimentent en eaux claires le réseau V. Cette observation résulte de la mesure simultanée des températures, à la fois dans l'Ardèche

au niveau des pertes de la Cadière, dans la rivière souterraine de Bidon et enfin à la source du Bateau. Le phénomène de mélange des eaux est d'ailleurs visible (turbidité et densité différentes observées en plongée par Ph. Brunet) lorsque les eaux de l'Ardèche, en transit depuis les pertes de la Cadière, confluent dans le réseau Solvay qui semble collecter les eaux du poljé de Bidon. L'alimentation de l'étage inférieur (réseau V) est donc mixte, incluant les pertes de l'Ardèche sur lesquelles se greffent les eaux karstiques provenant du plateau. Dans les parties aval de l'étage inférieur, les circulations s'effectuent principalement en régime noyé, parfois à grande profondeur (−10 m NGF dans l'Aval Profond), avant de resurgir en bordure de l'Ardèche selon un mode vaclusien.



B) L'étage intermédiaire

L'étage intermédiaire regroupe la plus grande partie des réseaux de l'aven de Noël et de la grotte de Saint-Marcel : le réseau I, la galerie du Lac, le réseau IV, la galerie Raoul, l'intégralité des réseaux II et III (doc. II, hors texte), la galerie Principale et la galerie Supérieure de l'aven de Noël (fig. 5). Ces réseaux sont réputés « fossiles », toutefois, lors d'orages violents sur le plateau certaines portions de galeries peuvent se mettre en charge ou connaître des écoulements importants [Audra *et al.*, sous presse].

1) Le réseau II

Le réseau II forme un ensemble de galeries qui se développent assez loin sous le plateau en direction du nord-est à une altitude moyenne de 100 m NGF (doc. II, hors texte). Depuis l'entrée naturelle de la grotte de Saint-Marcel jusqu'au réseau N 14 (proche du fond actuel), cet ensemble de galeries présente un caractère remarquablement horizontal dont l'altitude oscille en moyenne de plus ou moins

quinze mètres. La direction générale et la longueur du réseau montrent qu'il est exclusivement alimenté par des eaux issues du plateau. Le réseau II présente une morphologie en tube, orné de nombreuses cupules et coupoles et autres formes pariétales de la zone noyée ou épinoyée du karst (photo 1). En plusieurs endroits, le sol en roche de la galerie apparaît ce qui permet d'observer des sections de galerie creusées aux dépens d'un joint de strates. Il faut pourtant noter que l'effet du pendage de l'encaissant ne pourrait pas permettre au réseau de conserver à grande échelle son horizontalité. D'une manière générale, le détail de la coupe longitudinale des réseaux de Saint-Marcel présente un profil en long en « dents de scie ». L'incidence du pendage est en fait corrigée par l'existence de plusieurs petits puits creusés sur diaclases qui relient un drain creusé sur joint de strate à son prolongement situé en contre-haut ou en contrebas (photo 2 a et b), ce qui permet de conserver la remarquable horizontalité des profils en long des étages de Saint-Marcel.

Photo 1 : Forme de conduit observée dans la galerie N du réseau II (étage intermédiaire, grotte de Saint-Marcel).

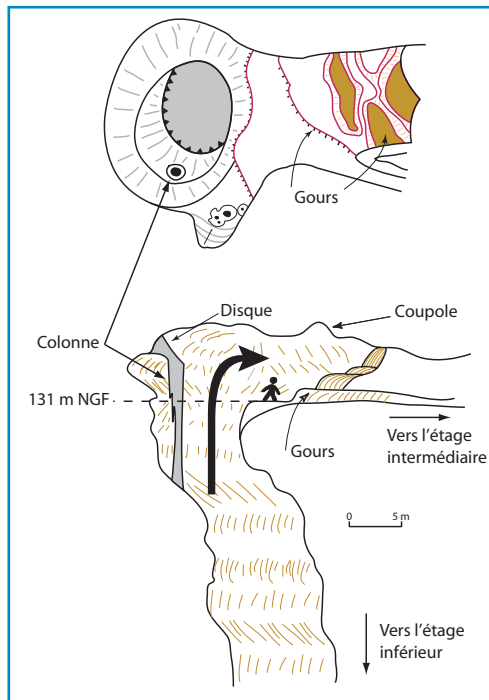
Cliché L. Mocochain.

Morphology of a drain of "Galerie N" (middle level of Saint Marcel Cave).

Photo 2 a et b : Exemple d'une galerie sur joint de strate (a) et d'un puits de raccordement (b) qui permet à la galerie de conserver un profil en long horizontal à l'échelle d'un étage (Puits Ascendant de la galerie N 13, réseau II de la grotte de Saint-Marcel). Clichés J.-Y. Bigot. *Example of a connecting shaft between two drains of the same level.*



Figure 6 : Coupe et plan simplifiés du puits-cheminée 'P40' du réseau N6 (réseau II) connectant l'étage inférieur à l'étage intermédiaire. Section and plan of the "P 40" aven-pitch (N6 system). This aven-pitch connects the lower level with the middle level of Saint Marcel Cave.



Bien que proches de la surface piézométrique, ces crans aux morphologies de la zone noyée du karst semblent avoir fonctionné en régime noyé permanent, ce qui est par ailleurs conforme au profil en long du réseau en « dents de scie », incompatible avec un écoulement libre gravitaire. Le réseau II comporte également de remarquables puits, comme le P 40 du réseau N 6 (fig. 4 et 6) ou ceux de la galerie A. Ces puits indiquent la filiation entre les niveaux noyés (étage inférieur) et le réseau II (étage intermédiaire). Cette filiation apparaît évidente sur la topographie où les conduits fossiles se superposent aux conduits noyés, ce qui tend à montrer que les variations du niveau de base ne changent rien à la logique de ces circulations karstiques.

Photo 3 : Les remplissages alluviaux provenant de l'Ardèche et jalonnant le parcours en recoupement de méandre de la boucle Cristalline (Galerie Inférieure, Aven Noël). Cette séquence de dépôt donne l'indication du sens de courant par l'inclinaison des galets.

Cliché J.-Y. Bigot.

Alluvial filling from the Ardèche River, found in a shortcut of the fluvial meander in Saint Marcel Cave. The flow direction is indicated by imbrication of the pebbles.



2) Le réseau III

Le réseau III présente deux parties distinctes : une partie aval au profil en long horizontal autour de 100 m NGF et une partie amont, la galerie B, qui se développe à l'altitude de 130 m. La limite entre la partie aval (est) et la partie amont (ouest) est marquée par le « P 70 » (doc. II, hors texte) qui met en relation le réseau III et l'étage inférieur (fig. 8).

La partie aval du réseau III montre des morphologies bien spécifiques de la zone noyée du karst (galerie en tube ornée de cupules et grands coups de gouge). Cette partie aval prend naissance au niveau de la galerie des Gours Suspendus, c'est-à-dire au sommet du « P 70 ». Ce conduit vertical, dit « P 70 », est la seule continuité observée de l'amont de la galerie des Gours suspendus ; le « P 70 », qui n'accuse en fait que 50 m de dénivellation, assure le lien et matérialise la filiation avec l'étage inférieur (fig. 4 et 8).

La partie amont du réseau III, la galerie B, se situe en contre-haut, en moyenne autour de 130 m NGF. Elle est géographiquement proche de l'Ardèche et conserve un profil longitudinal horizontal vers 130 m d'altitude. Les morphologies de la galerie B diffèrent peu de la partie aval du réseau III. Le terminus spéléologique actuel de la galerie B est très proche de la galerie Blanche de l'aven de Noël. Les altitudes identiques de ces deux galeries, ainsi que leurs morphologies identiques,



Photo 4 : Le sommet du "P80" vers 130 m d'altitude dans le réseau III (grotte de Saint-Marcel). On peut observer à droite du personnage les lapiaz de paroi qui caractérisent le fonctionnement épinoyé de cette partie du réseau. Cliché L. Mocochain.

The top of aven-pitch "P 80", around 130 m a.s.l., in the middle level of Saint Marcel Cave. We observe wall karren to the right of the person, proving of the epiphreatic nature of this part of the cave.

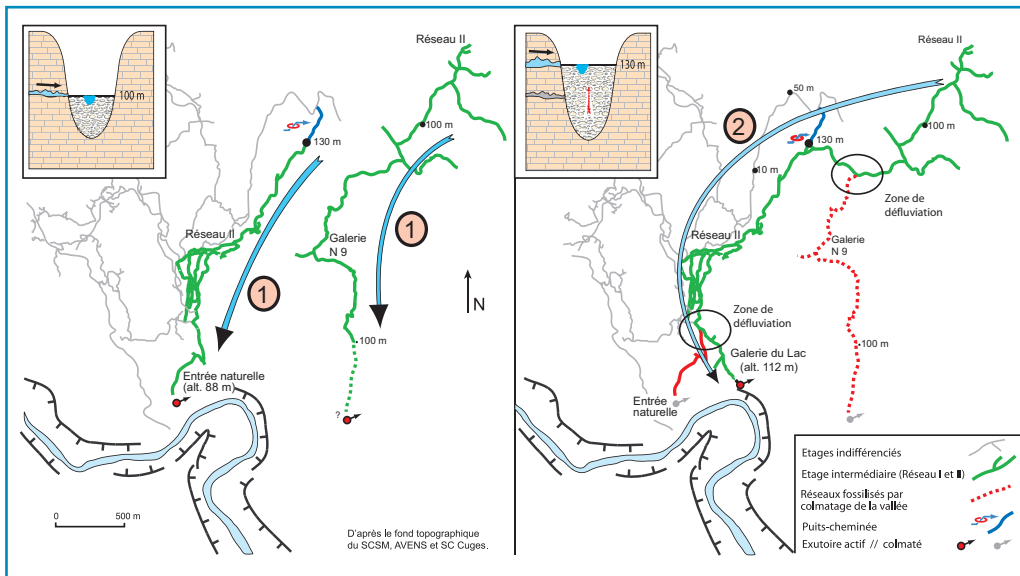


Figure 7 : Figure explicative du détournement d'une partie du drainage du réseau II vers le réseau I à la suite de l'obstruction de l'exutoire de la galerie N9.
Diagram illustrating the drainage diversion of "réseau II" towards "réseau I" as a result of a blockage of the N9 exit.

Figure 8 : Coupe topographique du « P 70 » et du réseau III. Médaillon : schéma simplifié d'une galerie prenant naissance au sommet d'un puits-cheminée. Longitudinal section of aven-pitch "P 70" and "réseau III". Inset: Diagram illustrating the start of a passage at the top of an aven-pitch.

montrent qu'il s'agit du même réseau. En effet, il existe dans les deux galeries un remplissage fluvial identique composé de dragées de quartz, schistes et micaschistes, des éléments transportés par l'Ardèche. La galerie Blanche de l'aven de Noël et le réseau III de Saint-Marcel sont situés vers 130 m NGF et jalonnés d'alluvions d'origine allochtone. Le cortège minéralogique de ces alluvions montre que ces galeries résultent de la mise en place d'un vaste recoupement souterrain d'un méandre sub-aérien de l'Ardèche [Mocochain, 2002]. En outre, le sens de circulation de l'eau est par ailleurs attesté par des coups de gouge et la disposition inclinée des galets des formations alluviales (photo 3).

La galerie B est aussi connectée à l'étage inférieur par un puits, le « P 80 » (fig. 4). Au sommet du puits, à l'altitude 130 m, on peut observer des cannelures verticales (lapiaz de paroi) profondément incisées sur les parois de la galerie et dominées par de belles coupoles (photo 4). Ces indicateurs morphologiques attestent de la proximité immédiate de la surface piézométrique, et donc du niveau de base [Audra, 1994 ; Lismonde, 2000]. La circulation torrentielle observée dans la galerie B, attestée par les graviers roulés, et la présence des lapiaz de paroi, au débouché du puits-cheminée dit « P 80 », permettent de confirmer un stade de stabilité de l'Ardèche à 130 m dans la partie aval des gorges.

3) Les réseaux I et IV

Le réseau I présente les plus grandes sections de galeries (doc. VI, hors texte), du moins jusqu'à la Grande Barrière (doc. II, hors texte). L'étude morphologique de détail de la bifurcation de la Grande Barrière (fig. 9) permet de constater que l'amont des grandes galeries du réseau I se situent plutôt vers le réseau IV en direction du sud-ouest, opérant ainsi un

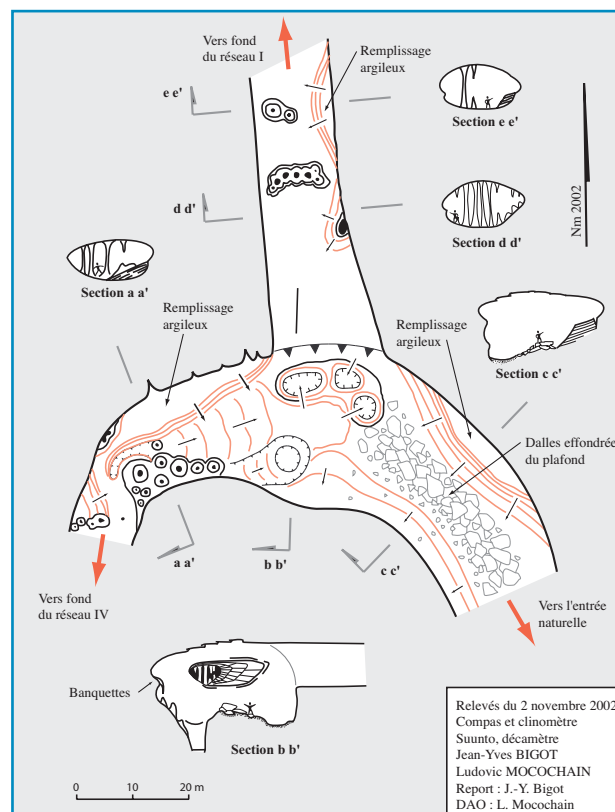
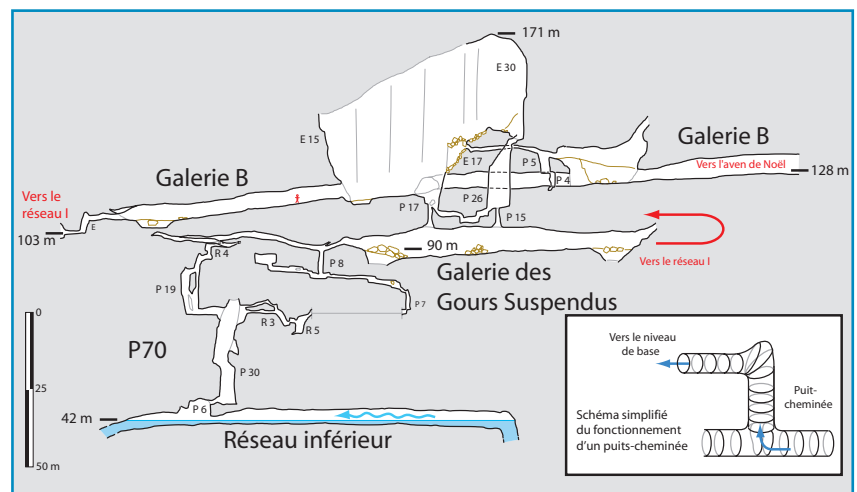


Figure 9 : Topographie de la zone de la Grande Barrière ou 'Carrefour en T' marquant la confluence entre la grande boucle et l'amont du réseau I. Plan of "Grande Barrière". This section is the confluence between the "Grande Boucle" and the upstream part of "réseau I".

Photo 5 : Remplissage argileux ayant pratiquement atteint la voûte de la galerie de la Chaussée des Géants en amont du réseau I (étage intermédiaire de la grotte de Saint-Marcel). Cliché J.-Y. Bigot. *Clay filling plugs the "Galerie de la Chaussée des Géants" passage (middle level of Saint Marcel Cave).*



retour vers l'Ardèche. En revanche, on observe qu'un chenal de voûte visible au plafond du réseau I ne se prolonge pas vers le réseau IV, mais vers l'amont du réseau I qui s'étend au nord, vers l'intérieur du plateau. Ces observations suggèrent que le conduit original est celui du réseau I, de section plus modeste (photo 5) et alimenté par les eaux du plateau. La connexion du réseau IV, provenant de l'Ardèche, sur le réseau I a eu lieu plus tardivement. Cette connexion a dû entraîner une recalibration du tube entre la Grande Barrière et la Cathédrale, c'est-à-dire le tronçon qui correspond aux grandes galeries du réseau I.

Le terminus spéléologique du réseau IV se trouve très proche et à la même altitude, 160 m NGF, que le terminus de la galerie Supérieure de l'aven de Noël, il s'agit en fait du même réseau. Les vastes conduits que présente cette portion de réseau (gal. Sup & réseau IV) sont ornés de grands coups de gouge (photo 6) et contiennent un remplissage détritique fin allochtone composé de sables à éléments de quartz et argiles à micas de couleur beige et rouge [Blanc et Chamley, 1975]. Les galeries des réseaux I et IV présentent de nombreuses banquettes de remplissage évoquant une évolution paragénétique [Renault, 1967] de la voûte des galeries.

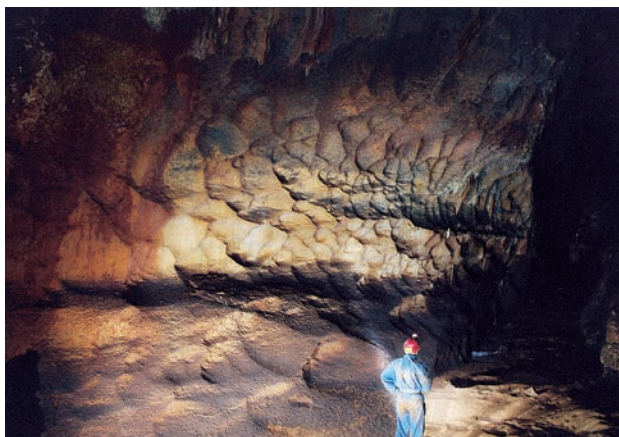


Photo 6 : Les coups de gouge ornant la galerie principale du réseau I vers + 160 m NGF (étage intermédiaire de la grotte de Saint-Marcel). Cliché J.-Y. Bigot. *Scallop across the side of Scallops in the main passage of "Réseau I", at 160 m a.s.l. (middle level of Saint Marcel Cave).*



Photo 7 : Un massif stalagmitique de la galerie du Lac complètement 'meulé' par la corrosion (étage intermédiaire de la grotte de Saint-Marcel). Cliché L. Mocochain. *A stalagmite, completely corroded (middle level of Saint Marcel Cave).*

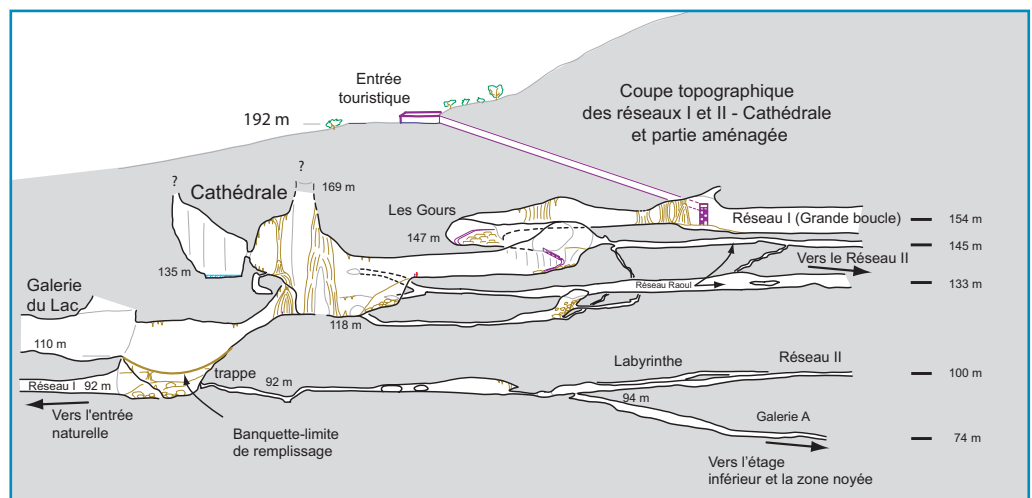


Figure 10 : Coupe topographique de la Cathédrale et du débouché des réseaux I, II et Raoul. *Longitudinal section of the "Cathédrale" and the connections with the "réseaux I, II" and "Raoul".*



Photo 8 : Les coupoles ornant la première section en pan incliné de l'aven Despeysse au départ de la galerie N du réseau II (étage intermédiaire de la grotte de Saint-Marcel).
Cliché J.-Y. Bigot.
Ceiling pockets in the first section of Aven Despeysse Cave, near the bifurcation of passage N.

En certains endroits, le remplissage est encore en place (photo 5) et montre que la section fonctionnelle de la galerie devait être plus réduite que la section actuellement visible, parfois complètement dégagée de son remplissage. Ce paragénétisme est probablement la conséquence d'une dynamique en légère aggradation du niveau de base autour de l'altitude moyenne du réseau, vers 160 m NGF.

4) La galerie du Lac

Comme l'aval du réseau I (galerie de l'entrée naturelle), la galerie du Lac correspond à un exutoire des grottes de Saint-Marcel. Cette galerie se développe à une altitude moyenne de 115 m. Elle prend naissance dans un nœud de galeries appelé la Cathédrale (doc. II, hors texte et fig. 10) où converge une grande partie des réseaux. La galerie du Lac se termine quelque 400 m plus au sud sur un cône de grèzes très proche du versant des gorges. Un peu avant ce terminus, un remplissage témoin (photo 13) composé d'argiles beiges finement laminées indique que la galerie a été entièrement colmatée jusqu'à la voûte. Au cours de son évolution, la galerie du Lac, a été obstruée, puis abandonnée probablement au profit d'autres conduits.

Ajoutons que la galerie du Lac semble avoir connu des phases d'assèchement et de réennoiment comme l'attestent les massifs stalagmitiques extrêmement corrodés (photo 7) qui scellent une série de remplissages argileux. Des concrétions corrodées ont été également observées dans la partie touristique du réseau I toute proche. La remise en eau de galeries après une phase de concrétionnement est un phénomène assez commun dans les gorges de l'Ardèche que l'on retrouve aussi dans la grotte Chauvet [Delannoy *et al.*, 2004].

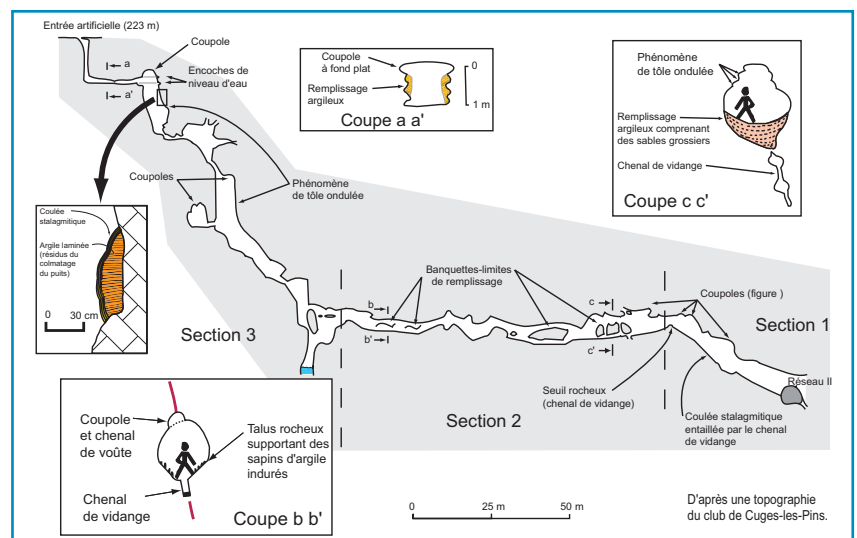
C) L'étage supérieur

L'étage supérieur comprend la « galerie Intermédiaire » de l'aven de Noël et les galeries décapitées du site de la Charbonnière. On trouve également, au sommet de certaines hautes cheminées, des morphologies témoins de cette phase de spéléogénèse (cas de l'aven Despeysse).

1) L'aven Despeysse

L'aven Despeysse se raccorde à la partie amont du réseau II vers l'altitude de 100 m (doc. II, hors texte). Sur la coupe (fig. 11), on peut identifier trois ensembles de conduits : un conduit horizontal séparé par deux ensembles de conduits verticaux. La partie inférieure de la cavité est un large pan incliné (env. 35°) dont la voûte est ornée de coupoles (photo 8). Cette partie prend fin 35 m plus haut pour laisser place à un conduit sub-horizontale d'une centaine de mètres de longueur (alt. 130 m), appelé abusivement

Figure 11 : Coupe topographique de l'aven Despeysse annotée d'observations.
Longitudinal section of Aven Despeysse Cave (part of Saint Marcel Cave) with observations.



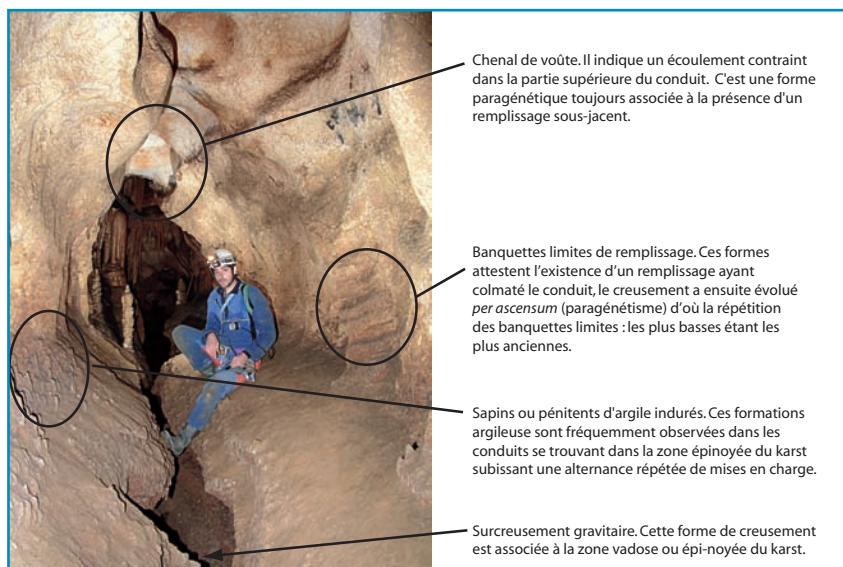


Figure 12 : Détails morphologiques et sédimentaires de la section 2 de l'aven Despeysse.
Morphological and sedimentary details of the second section of Aven Despeysse Cave.

Photo 9 : La partie tout à fait supérieure du puits de l'aven Despeysse marquée d'encoches de niveau d'eau vers + 218 m NGF (étage supérieur de la grotte de Saint-Marcel). Cliché J.-Y. Bigot. *The very top of Aven Despeysse Cave, around 218 m a.s.l. (upper level of Saint Marcel Cave).*



Photo 10 : Base du puits-cheminée de l'aven de Noël au départ de la Galerie Principale à + 130 m NGF. Observez la banquette limite de remplissage se trouvant à gauche du premier personnage. Cette morphologie s'infléchit verticalement lorsque le conduit horizontal débouche dans le puits. Cliché L. Mocochain. *Base of the aven-pitch of Aven Noël, at the bifurcation of the main passage at 130 m a.s.l. To the right of the person, a wall structure proves of a sedimentary fill. This structure turns vertical where the horizontal passage joins the shaft.*

« méandre ». La voûte de cette galerie comporte de nombreuses coupoles, dont certaines à fond plat, reliées entre elles par un chenal de voûte qui parcourt l'intégralité du conduit (fig. 12). Les parois présentent de nombreuses banquettes-limites de remplissage, parallèles entre elles et espacées seulement de quelques centimètres. Dans la partie basse du conduit, on observe de part et d'autre de la galerie des talus rocheux à pente régulière (env. 45°) se terminant dans une sorte de fissure étroite de quelques dizaines de centimètres de largeur (fig. 11 et 12). On peut observer sur ce talus rocheux de nombreux sapins d'argile indurés, témoins d'anciennes phases de mises en charge. La partie supérieure de l'aven Despeysse prend un caractère vertical plus accusé, où alternent puits et pans fortement inclinés. Malgré un concrétionnement important, les morphologies phréatiques dominent dans toute cette partie. La succession des puits se présente comme une suite de cheminées raccordées les unes aux autres. La coupole sommitale, creusée en roche, ne présente aucun lien apparent avec la surface si ce n'est l'ouverture artificielle pratiquée par les spéléologues qui lui vaut le nom d'aven Despeysse. Cette coupole sommitale est entaillée par des encoches de niveau d'eau en rapport avec un petit conduit horizontal (photo 9). Ce conduit et les encoches se trouvent 12 m sous la surface, soit vers 218 m d'altitude et marquent un niveau d'écoulement et de stagnation de l'eau. Ce niveau d'écoulement ne peut être que postérieur au colmatage du puits, ou plutôt de la cheminée, situé juste en dessous. On retrouve d'ailleurs des témoins de cette phase de colmatage sur toute la hauteur de la cheminée, ces témoins se présentent sous forme d'un placage de lamines argileuses recouvertes par un concrétionnement récent.

L'omniprésence des formes pariétales de la zone noyée du karst, les restes d'un remplissage ayant colmaté pratiquement tout l'aven ainsi que les deux stades indiquant une stabilité durable du niveau de base conduisent à penser que la formation de l'aven Despeysse résulte d'un long processus d'ennoiement de la grotte de Saint-Marcel. L'agencement des différentes formes et formations indique qu'il ne peut pas s'agir de phénomènes de mises en charge mais plutôt d'un processus de remontée du niveau de base depuis l'altitude du réseau II à 100 m NGF jusqu'à 218 m NGF. Les formes observées dans la portion horizontale située à 130 m montrent un premier arrêt du niveau de base dans son processus d'exhaussement. Cette stabilisation de l'Ardèche a été accompagnée, dans le réseau, de mises en charge qui expliquent la

présence de formes pariétales de la zone épinoyée dans le conduit situé à 130 m. Les banquettes de remplissage et le caractère paragénétique du chenal de voûte indiquent un ennoyage et un comblement de la galerie qui correspondent sans doute à une reprise de l'exhaussement du niveau de base se terminant vers 210 m NGF, altitude à laquelle correspond le comblement de l'aven Despeysse suivi d'un petit épisode d'écoulement vadose responsable des profondes encoches de niveau d'eau entaillant le sommet de l'aven.

2) Le puits de Noël et la « galerie Intermédiaire » de l'aven de Noël

La « galerie Intermédiaire », mal nommée, de l'aven de Noël représente le plus haut niveau horizontal des réseaux de Saint-Marcel situé vers 220 m d'altitude. Cette galerie, longue de seulement 200 mètres, prend fin sur un cône d'éboulis de grèzes très proche du versant des gorges (doc. VIII, hors texte). Le caractère horizontal bien marqué de ce conduit, dominé par des morphologies caractéristiques d'un écoulement noyé, est représentatif d'une position stable de l'Ardèche. Dans sa partie nord, la galerie se termine au sommet d'un remarquable puits-cheminée : le puits de Noël, qui marque le prolongement vertical de la galerie. Ce puits qui correspond au puits d'entrée de l'aven de Noël est un vaste conduit vertical où dominent les formes noyées du karst (photo page de couverture), il relie la galerie Principale de l'aven de Noël, qui se développe dans l'étage intermédiaire (alt. 130 m), à l'étage supérieur situé vers 220 m (photo 10; fig. 5 et 13).

3) Les galeries décapitées du site de la Charbonnière

Le site de la Charbonnière se situe en bordure immédiate des gorges à 220 m d'altitude (doc. I, hors texte). Le site se présente sous la forme d'une large galerie décapitée par le recul du versant et partiellement colmatée par un remplissage fluvatile composé de galets et de sables de l'Ardèche, scellé dans une brèche calcaire. L'altitude de cette galerie est la même que celle de la « galerie Intermédiaire » de l'aven de Noël et du sommet de l'aven Despeysse; tous ces sites constituent autant de jalons morphologiques et sédimentaires de nature à identifier une ancienne position de l'Ardèche autour de 220 m d'altitude.

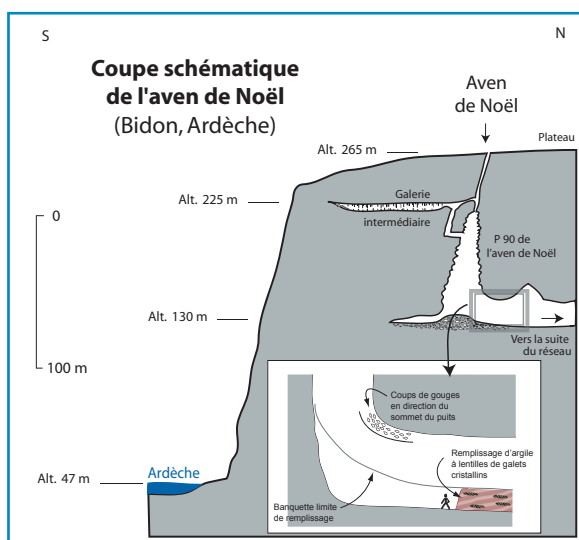
III. Chronologie de la mise en place et du fonctionnement des étages de la grotte de Saint-Marcel

Chaque étage de la grotte de Saint-Marcel se compose de galeries horizontales qui se développent et recoupent la structure légèrement inclinée de l'encaissant calcaire. Hormis la fracturation, préalable à la spéléogénèse, le rôle des facteurs structuraux et lithologiques dans le creusement horizontal des galeries s'en trouve écarté au profit du contrôle par le niveau de base régional.

Ce constat autorise l'investigation de niveaux repères de surface afin d'établir une corrélation géométrique et une imputation chronologique avec les étages de l'endokarst. Cependant, cette démarche s'avère parfois insuffisante en présence de deux niveaux repères situés à la même altitude mais d'âges différents, comme les terrasses quaternaires de l'Ardèche qui peuvent interférer avec

la transition marin/continental (130 m) du Pliocène. Pour s'affranchir du risque d'interférences entre niveaux repères d'âges différents, il faut étudier l'organisation et la morphologie des conduits verticaux reliant entre eux les étages de l'endokarst. En effet, ces conduits

Figure 13 : Coupe simplifiée de la galerie Intermédiaire de l'aven de Noël et de son puits-cheminée. Simplified longitudinal section of the middle passage of Aven Noël Cave with its aven-pitch.



verticaux matérialisent une filiation entre les différents étages qui traduit une dynamique d'évolution du niveau de base extérieur. Les puits de filiation gravitaires (fig. 14 a) (puits-méandres, puits en éteignoir, etc.), conduisent à chercher deux niveaux repères successifs formés dans un contexte de descente du niveau de base. En revanche, lorsque le niveau de base remonte, les puits de filiation sont ascendants, on les appelle alors « puits-cheminées » [fig. 14 b; Bigot, 2004a; Mocochain *et al.*, 2006a], il faut alors rechercher les deux niveaux repères successifs qui correspondent à cette dynamique de remontée du niveau de base.

Les puits de jonction de l'endokarst attestent des types de relations hydrologiques que les étages entretiennent entre eux et révèlent la dynamique d'évolution du niveau de base. La reconnaissance de ces puits de jonction permet de proposer une chronologie relative de la formation des différents étages de l'endokarst, tout en discriminant les niveaux repères de surface associés à la spéléogénèse.

A) Etagement et fonctionnement des réseaux

Les trois étages de la grotte de Saint-Marcel possèdent de nombreux puits-cheminées de telle sorte que Saint-Marcel se présente comme un maillage de galeries horizontales superposées et interconnectées par des drains verticaux. L'examen de ces étages a révélé plusieurs positions occupées par l'Ardèche au cours de son évolution, ce qui autorise une comparaison géométrique entre étages de l'endokarst et niveaux repères. En outre, l'identification des puits-cheminées qui relient les étages entre eux, révèle aussi la dynamique d'évolution du niveau de base indispensable à la discrimination des niveaux repères associés à la spéléogénèse des étages de l'endokarst.

1) Genèse de l'étage inférieur

L'Aval Profond est un conduit qui se trouve 60 m sous le niveau de l'Ardèche, soit à la cote -10 m NGF. Les difficultés techniques n'ont pas permis d'explorer complètement ce conduit situé à grande profondeur, cependant un traçage a confirmé sa liaison avec le canyon de l'Ardèche. L'Aval Profond fonctionne donc actuellement en système vaclusien, ce qui permet aux

Quelques notions sur les puits-cheminées

Traditionnellement en géomorphologie et en karstologie, on admet que les galeries les plus anciennes sont situées parmi les plus hautes en altitude et inversement, les galeries les plus basses en altitude sont considérées comme les plus récentes. L'étagement des niveaux de galeries, implicitement lié à la baisse du niveau de base, est souvent associé à l'étagement des terrasses quaternaires ; on parle alors de modèle de creusement *per descensum* du karst. Ce modèle de creusement (fig. 14 a) a été largement utilisé pour expliquer l'étagement des réseaux, y compris en Ardèche [Guérin, 1973 ; Gombert, 1988 ; Belleville, 1985 ; Debard, 1997]. Or, la morphologie des puits de jonction de la grotte de Saint-Marcel invalide cette interprétation [Mocochain *et al.*, 2006a], car, à quelques exceptions près, tous les puits qui relient les grands niveaux de Saint-Marcel sont des puits-cheminées (fig. 14 b et 4). Les exceptions correspondent à des puits de trépanation creusés par l'infiltration d'un écoulement de surface, débutant généralement le long d'un plan de fracture, et qui par gravité, vont recouper à l'emporte-pièce une galerie. Dans certains cas exceptionnels, ces puits peuvent recouper deux étages les mettant ainsi en liaison mais sans assurer le moindre rôle hydrologique entre les étages. Un de ces puits de trépanation a été reconnu entre l'étage supérieur et l'étage inférieur, il s'agit des puits du réseau Solvay (doc. II, hors texte).

Les puits-cheminées creusés *per ascensum* ont été observés depuis longtemps en France par différents auteurs [Chevalier, 1944 ; Rodet, 1992 ; Camus, 2003 ; Bigot, 2004 a et b] qui ont parfois invoqué le remblaiement des vallées [Frachon, 1963]. Toutefois, la compréhension de leur fonctionnement hydrodynamique est beaucoup plus récente [Boinet & Camus, 1998] et encore discutée [Mocochain *et al.*, 2006a et b]. Si l'identification morphologique des puits-cheminées est maintenant admise, la discussion porte à présent sur les modalités de formation et de fonctionnement hydrologique. Deux hypothèses assez différentes coexistent :

- La première hypothèse voit dans les puits-cheminées la marque répétée d'importantes mises en charge provoquées par un abaissement drastique du niveau de base. Dans ce modèle, les nouveaux réseaux profonds en cours de creusement (effet diaphragme) ne pouvant pas absorber de forts débits de crue, se mettent en charge sur des hauteurs pouvant parfois dépasser les 200 m. Ce mode de formation et de fonctionnement a été étudié par H. Camus [Camus, 1997 ; Boinet et Camus, 1998 ; Camus, 1999 et 2003] dans les massifs languedociens.

- La deuxième hypothèse interprète les puits-cheminées comme des volumes verticaux ennoyés en permanence, se développant à partir de conduits horizontaux submergés dans lesquels les eaux continuent de circuler. La submersion, provoquée par une remontée du niveau de base local, entraîne la formation de puits-cheminées et de cheminées qui peuvent fonctionner soit comme émergences (gouls de Tourne, Bourg-Saint-Andéol, Ardèche), soit comme liaisons ascendantes entre deux niveaux d'âges différents [Mocochain *et al.*, 2006a & b], soit comme simples cheminées sans fonctionnement hydrologique particulier (aven Despeysse).

Bien que ces deux hypothèses soient différentes, elles ne s'opposent pas car elles correspondent à des fonctionnements de réseaux karstiques évoluant dans des contextes géodynamiques différents.

En Ardèche, la période Pliocène se caractérise par deux importantes remontées du niveau de base. La première correspond à la remise en eau de la Méditerranée permettant localement l'élévation du niveau de base de -236 m à 130 m, soit une remontée de plus de 350 m et la seconde correspond à l'aggradation des rivières qui, localement passent de 130 m à 200 m lors du comblement des rias. Sur le secteur étudié des gorges de l'Ardèche, ces deux remontées cumulent 450 m d'exhaussement total sur une durée de 3,32 Ma (fig. 3). Sur le plateau de Saint-Remèze, l'examen des avens a montré la présence quasi-systématique de puits-cheminées : avens du Faux Marzal (Saint-Remèze), du Devès de Virac (Labastide-de-Virac), ou encore le « puits » de l'aven de Noël. Certains d'entre eux dépassent les 100 m de dénivellation, voire 200 m dans l'aven du Faux Marzal. Compte tenu du faible gradient topographique existant entre le plateau de Saint-Remèze et les gorges de l'Ardèche, ces hauteurs d'enneiement paraissent difficilement conciliables avec une dynamique de mises en charge. En revanche, le contexte géodynamique d'exhaussement du niveau de base, peut expliquer la formation des nombreux puits-cheminées observés en Ardèche [Mocochain *et al.*, 2006a & b]. Par ailleurs, la position et l'agencement de nombreux puits-cheminées situés en bordure des gorges de l'Ardèche, souvent associés à des émergences actuelles ou fossiles, ne sont pas le fruit du hasard. On pourra retenir deux exemples assez démonstratifs de ces puits-cheminées : l'aven de Noël et l'aven Rochas (Saint-Remèze) qui se développent en bordure du canyon de l'Ardèche. La position de ces puits-cheminées en bordure des gorges permet d'émettre l'hypothèse que leur formation a pu être facilitée le long des fentes de décollement provoquées par l'appel au vide des flancs du canyon.

eaux du réseau V, en grande partie noyé, d'émerger au niveau de l'Ardèche après un transit en profondeur. Le profil d'écoulement de certains conduits du réseau V conserve une pente d'écoulement régulière, y compris dans leur partie noyée. L'acquisition de cette pente d'écoulement, totalement inadaptée à la position actuelle de l'Ardèche, n'a pu se réaliser qu'en rapport à une position très déprimée du niveau de base. Les plongées dans ces parties noyées confirment cette hypothèse en révélant aussi l'existence de morphologies spécifiques de la zone vadose jusqu'à -40 m sous le niveau de l'Ardèche (doc. VII, hors texte). La courbe d'évolution du niveau de base restituée d'après l'étude des niveaux repères (fig. 3), permet de proposer la crise messinienne de salinité comme seule période possible à l'acquisition de cette morphogénèse vadose [Mocochain *et al.*, 2006 a & b]. L'étage inférieur de la grotte de Saint-Marcel serait la marque de la spéléogénèse profonde induite par la crise de salinité.

Par ailleurs, l'étage inférieur est relié en plusieurs endroits à l'étage intermédiaire par des puits-cheminées tels que les puits « P 70 » et « P 80 » du réseau III, « P 40 » du réseau N6 (fig. 6), ainsi que ceux de la galerie A (fig. 14 b et 4). Ces puits-cheminées suggèrent une formation de l'étage intermédiaire postérieure à l'étage inférieur et intervenant à la suite d'une remontée du niveau de base.

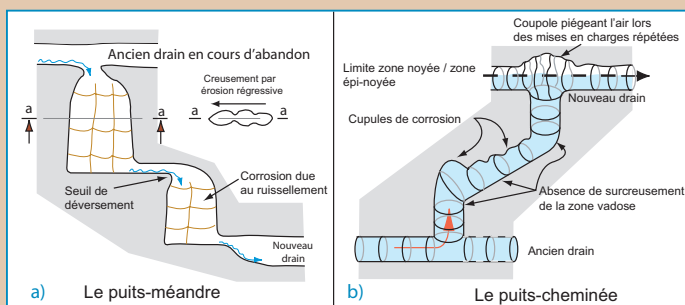
2) Genèse de l'étage intermédiaire

Le réseau II

L'horizontalité du réseau II est la marque d'un niveau de spéléogénèse situé aux alentours de 100 m NGF. Cette altitude est identique à celle de la grotte des Copains d'Abord (Aiguèze) qui s'ouvre en rive droite de l'Ardèche, en vis-à-vis de la grotte de Saint-Marcel. Cette grotte, récemment découverte, forme un recoupement souterrain de méandre traversant le pédoncule du méandre de Ribeirrol (fig. 15). La grotte des Copains d'Abord, ainsi que le réseau II, indiquent un niveau de base tributaire d'une position durablement stable de l'Ardèche à 100 m NGF.

Le réseau II est en liaison en deux endroits avec l'étage inférieur par des puits-cheminées. Il s'agit des puits-cheminées de la galerie A et du puits-cheminée « P 40 » du réseau N6 (fig. 4 et 6). Le réseau II se trouve aussi en liaison, par un système de galeries remontantes et de puits-cheminées, avec la galerie Raoul, superposée trente mètres en contre-haut. La galerie Raoul est une galerie horizontale (photo 11), longue de quelques centaines de mètres, qui se termine dans la Cathédrale (doc. II, hors texte et figure 10). Cette configuration de puits-cheminée

Figure 14 : Les deux exemples de puits de filiation a) de type *per descensum* ; b) de type *per ascensum*. Two examples of connecting shafts: a) *per descensum* type; b) *per ascensum* type.



prolongé par une galerie horizontale (médaillon, fig. 8) autorise à penser que la galerie Raoul est un exutoire supérieur du réseau II.

L'étage inférieur (50 m NGF), le réseau II (100 m NGF) et la galerie Raoul (140 m NGF) forment un ensemble de trois niveaux sub-horizontaux superposés et interconnectés. L'existence des puits-cheminées de jonction qui relient ces trois niveaux entre eux permet d'en déduire la dynamique *per ascensum* de cet étagement. Le puits-cheminée « P 40 » du réseau N6 et la galerie A relie l'étage inférieur au réseau II, ce qui indique que la formation du réseau II succède à la formation de l'étage inférieur après une remontée du niveau de base. Cependant, on ne retrouve pas sur la courbe d'évolution du niveau de base (fig. 3) de stade de stabilité à l'altitude de 100 m, mais seulement le stade à 130 m de la transition marin/continental vers 4,7 Ma [Mocochain *et al.*, 2006a]. En revanche, ce stade à 130 m peut correspondre à la position de la galerie Raoul.

Ces éléments permettent de situer la formation du réseau II et de la grotte des Copains d'Abord entre la fin de la crise de salinité et le haut niveau marin enregistré par la transition marin/continental à 130 m NGF. En effet, la filiation entre le réseau II et la galerie Raoul montre une adaptation *per ascensum* du drainage du réseau II à la remontée du niveau de base, puis à sa stabilisation vers 130 m NGF. La formation du réseau II (étage intermédiaire) se trouve donc encadrée entre la formation de l'étage inférieur, contemporain de la crise messinienne, et celle de la galerie Raoul, contemporaine du stade de la transition marin/continental vers 4,7 Ma.

Le réseau II et la grotte des Copains d'Abord sont l'expression d'une position stable du niveau de base vers 100 m NGF entre 5,32 et 4,7 Ma.

L'effet de la remontée du niveau de l'Ardèche de 100 à 130 m NGF peut également expliquer la défluviation qui a conduit à l'abandon de la galerie N9 au profit de toute la partie aval du réseau II. La galerie N9 formait un exutoire du réseau II à 100 m NGF (doc. II, hors texte) qui s'est probablement colmaté à la suite de la remontée du niveau de l'Ardèche. Le refoulement du drainage à l'exutoire a provoqué une défluviation souterraine de l'amont du réseau II vers l'ouest afin de se connecter au réseau I via le Labyrinthe (partie aval du réseau II; fig. 7).

Le réseau III

Les deux niveaux distincts du réseau III (partie aval à 100 m et galerie B à 130 m) ainsi que la présence de deux puits-chemi-

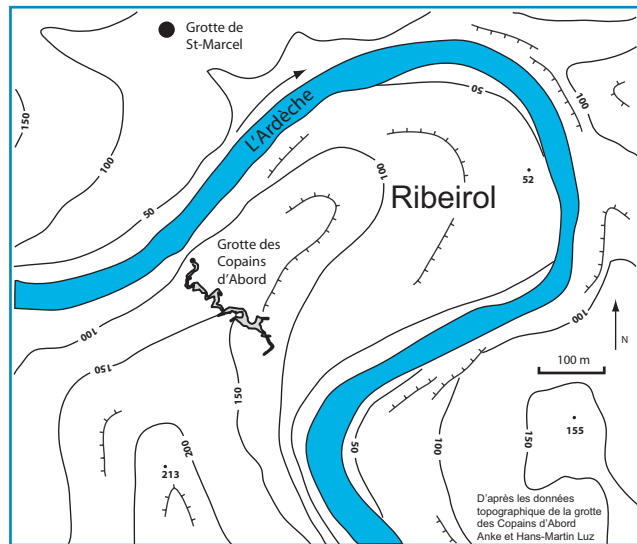


Figure 15 : Localisation et topographie de la grotte des Copains d'Abord. Exemple d'un recouplement souterrain de méandre dans les gorges de l'Ardèche. Location and map of Copain d'Abord Cave. It is an example of an underground shortcut of a fluvial meander.

nées (« P 70 » et « P 80 ») suggèrent une formation du réseau III en deux étapes. Le puits-cheminée « P70 » prolongé par la partie aval du réseau III semble former un exutoire de l'étage inférieur (fig. 8). Le caractère horizontal de la partie aval du réseau III prolongé par le réseau I jusqu'à l'entrée naturelle marque une position de stabilité durable du niveau de base à 100 m NGF après son exhaussement. Cette succession de séquences a par ailleurs déjà été identifiée pour le réseau II.

Le remplissage fluvial observé dans la galerie B montre un transit de l'Ardèche dans le réseau III qui débute dans l'aven de Noël (galerie Inférieure et galerie Blanche; doc. V, hors texte). Le transit de l'Ardèche en recouplement souterrain de méandre, nommé boucle Cristalline [Mocochain, 2002; doc. IV, hors texte], débute à 130 m d'altitude, parcourt la galerie B et poursuit son cours dans la partie aval du réseau III située 30 m

Photo 11 : La galerie Raoul vers 140 m NGF avant sa jonction avec la Cathédrale (réseau I, grotte de Saint-Marcel). Cliché L. Mocochain. The passage Raoul (140 m a.s.l.) before the junction with the "Cathédrale" (middle level of Saint Marcel Cave).



Photo 12 : Une haute cheminée de la galerie du Lac ornée de formes de corrosion caractéristiques de la zone noyée du karst (étage intermédiaire de la grotte de Saint-Marcel). Leur développement vertical dépasse souvent 30 m de haut ce qui est un bon indicateur de la hauteur ennoyée du conduit.

Cliché L. Mocochain.

A chimney in the "Galerie du Lac" (middle level of Saint Marcel Cave) presents corrosion features characteristic of the phreatic zone of the karst. Such chimneys are often higher than 30 m and give so the minimum height of the saturated zone.

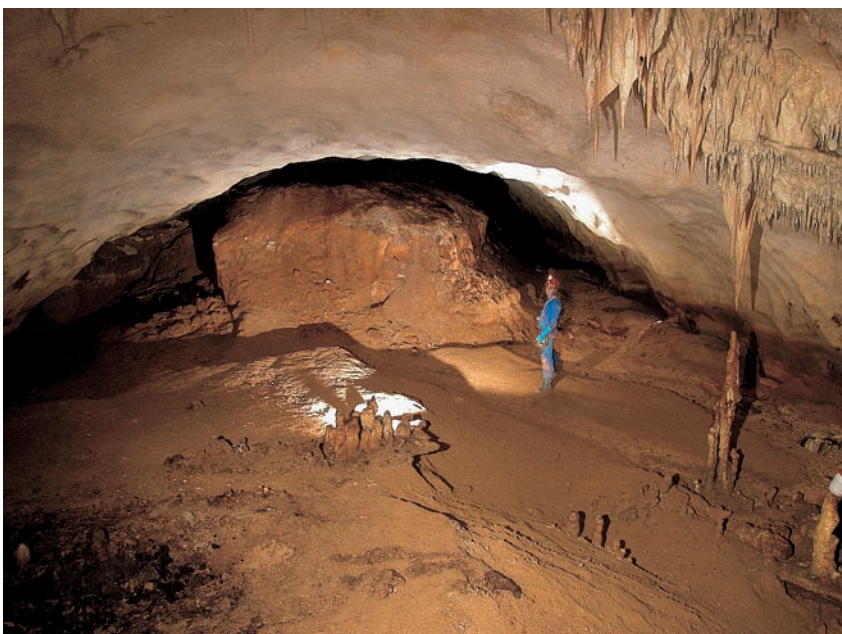


en contrebas. Ce recoupement souterrain d'un méandre subaérien de l'Ardèche marque un stade de stationnement de la rivière vers 130 m NGF. Cette phase fluviatile attestée par un fort alluvionnement souterrain (boucle Cristalline) semble contemporaine, d'un point de vue géométrique, de la phase de stabilité du niveau de base enregistrée par la transition marin/continental (130 m). Cette imputation chronologique est renforcée par l'argument hydrodynamique du puits-cheminée « P80 » reliant l'étage inférieur à la boucle Cristalline. Ainsi, la genèse en deux temps du réseau III (stades 100 et 130 m) fait écho à la dynamique qui a présidé à la formation du réseau II et de la galerie Raoul. On peut donc admettre la contemporanéité des réseaux II et III de la grotte de Saint-Marcel, ce qui confère à la

Photo 13 : Le remplissage d'argile beige colmatant la quasi-totalité du conduit de la galerie du Lac (étage intermédiaire de la grotte de Saint-Marcel). Au premier plan, noter le cône de grès obstruant la galerie.

Cliché L. Mocochain.

Clay filling plugs the passage "Galerie du Lac" (middle level of Saint Marcel Cave). In the foreground, a cone of sediments filling the passage.



boucle Cristalline (stade fluviatile à 130 m NGF) un âge approximatif de 4,7 Ma, calé sur celui de la transition marin/continental [Mocochain *et al.*, 2006a].

La galerie du Lac

Les observations menées dans la galerie du Lac permettent de proposer quatre phases distinctes de l'histoire de cette galerie qui a fonctionné en exutoire :

- Des banquettes de remplissages [Renault, 1967] sont observables entre la Cathédrale et la galerie du Lac (fig. 10). Ces morphologies s'observent depuis le bas de la Cathédrale et remontent ensuite vers la galerie du Lac. Les banquettes semblent ainsi décrire un abandon de l'écoulement par colmatage de l'entrée naturelle (aval du Réseau I), au profit de la galerie du Lac située en contre-haut. Cette défluviation souterraine est sans doute la conséquence d'un exhaussement de l'Ardèche par aggradation. L'altitude et le développement de grandes cheminées (photo 12) montrent que la galerie du Lac se trouvait dans la zone noyée du karst. Cette phase est sans doute contemporaine de la remontée du niveau de base de 100 à 130 m (position de la transition marin / continental) tandis que se formait la boucle Cristalline (doc. IV, hors texte).
- La seconde phase correspond au développement du concrétionnement, témoin d'une redescende du niveau de l'Ardèche sous l'altitude moyenne de la galerie. Cette chute pourrait intervenir au Pliocène entre le dépôt de la transition marin / continental à 4,8 Ma et le façonnement de la surface d'abandon pliocène à 2 Ma. Cette ré-incision de la vallée de l'Ardèche est sans doute un phénomène d'ampleur régionale à imputer, soit à un soulèvement géodynamique, soit à une baisse eustatique générale. La seconde hypothèse pourrait être rattachée à l'importante chute eustatique marquant le milieu du Pliocène vers 3,8 Ma [Haq *et al.*, 1987 ; Hardenbol *et al.*, 1998].
- La troisième phase est identifiée par la remise en eau de la galerie responsable de la corrosion des concrétions et du dépôt d'une seconde génération de remplissage colmatant la galerie jusqu'à la voûte (photo 13). Cette phase d'ennoiement durable aboutissant à un colmatage total de la galerie, se place vraisemblablement au cours du Pliocène supérieur lors de l'aggradation de l'Ardèche, prenant fin localement à 200 m NGF vers 2 Ma (fig. 3).
- Enfin, la quatrième phase de la galerie du Lac correspond à son abandon au cours du Pléistocène, une fois l'Ardèche repassée sous la position de la galerie.

Les réseaux I et IV

La galerie de la Grande coulée et la galerie Supérieure de l'aven de Noël (fig. 5), se prolongent par le réseau IV, puis par le réseau I, en aval de la Grande Barrière. La continuité des galeries, qui décrivent en plan une large boucle par rapport au canyon de l'Ardèche, évoque sans ambiguïté un vaste recouplement souterrain de méandre de l'Ardèche, nommée Grande boucle [Mocochain, 2002; doc. V, hors texte]. Cette hypothèse est renforcée par l'omniprésence d'un remplissage fin allochtone. Contrairement à la boucle Cristalline, les éléments détritiques transportés dans la Grande boucle sont nettement plus petits (photo 14). Cette différence s'explique sans doute par le profil en long en dents de scie (crans verticaux développés sur diaclases) de la Grande boucle dont les points bas forment des pièges à sédiments grossiers. Cependant, dans l'ensemble, le profil en long des réseaux I et IV présente une ligne horizontale bien marquée située autour de 155 m d'altitude. L'acquisition d'une telle horizontalité est sans doute le résultat d'une phase de stabilité durable de l'Ardèche autour de cette altitude.

Par ailleurs, si l'on applique à cette position restituée de l'Ardèche, une pente d'écoulement proche ou égale à l'actuelle, il est envisageable de corréliser cet épisode de stabilité observée à 155 m en aval des gorges au stade observé à 190 m NGF en amont des gorges [aven de la Plaine des Gras, grotte Chauvet, grotte du Déroc...; Mocochain *et al.*, 2006b]. Cette imputation géométrique permet de rattacher la genèse de la Grande boucle au Pliocène supérieur lors d'un stade de stabilité de l'Ardèche entre deux cycles d'aggradation [Mocochain *et al.*, 2006b]. Cette hypothèse s'appuie aussi sur la filiation des deux puits-cheminées qui relient la Grande boucle à l'étage inférieur (fig. 4).

La Grande boucle présente certaines similitudes de fonctionnement avec la boucle Cristalline. En effet, la Grande boucle décrit d'abord une demi-boucle depuis l'aven de Noël jusqu'à la Grande Barrière; là elle rejoint et se connecte au conduit initial du réseau I venant du nord et drainant le plateau (galerie Rouge; doc. II, hors texte). En aval, au niveau de la Cathédrale, la Grande boucle redescend de 160 à 100 m (fig. 10) pour rejoindre l'entrée naturelle. La galerie du Lac et l'entrée



Photo 14 : Reste d'un remplissage d'argile beige clair se trouvant dans la Grande Galerie de l'aven Noël. Ce dépôt est synchronone du fonctionnement en recouplement de méandre de la Grande boucle. Cliché J.-Y. Bigot. *Remains of clay filling in the "Grande Galerie" of Aven Noël Cave. This sediment is synchronous with the meander shortcut of the "Grande Boucle".*

naturelle ne peuvent correspondre à l'exutoire potentiel de ce grand recouplement de méandre car leur position est beaucoup trop basse. C'est probablement dans les réseaux supérieurs de la Cathédrale, aux alentours de 160 m NGF, qu'il faut voir le débouché aval de la Grande boucle dans la vallée de l'Ardèche.

3) Genèse de l'étage supérieur

La « galerie Intermédiaire » et le puits de l'aven de Noël

La galerie Principale de l'aven de Noël est un conduit horizontal à 130 m NGF qui se termine au pied du puits-cheminée de l'aven de Noël. A la voûte de la galerie Principale, on observe un chenal de voûte, d'abord horizontal, se prolongeant ensuite dans le puits-cheminée. Des coups de gouges ornent le chenal de voûte (photo 10) et indiquent un sens du courant remontant dans le puits-cheminée en direction de la « galerie Intermédiaire » (fig. 13). Ces observations montrent que le puits-cheminée de Noël et son prolongement sommital, la « galerie Intermédiaire », constituent un exutoire de la galerie Principale qui se situe 90 m en contre-haut. Nous savons que la galerie Principale tout comme la « galerie Intermédiaire » marque chacune une position stabilisée du niveau de base.

Ainsi, les morphologies spécifiques de la zone noyée, le sens d'écoulement remontant révélé par les coups de gouges visibles à la base du puits-cheminée et le profil des conduits (galerie-puits-galerie) en forme de « périscope » évoquent l'adaptation per *ascensum* du drainage karstique qui répond à une géodynamique remontante du niveau de base.

Il se trouve que l'altitude de 220 m de la « galerie Intermédiaire » est comparable à celle de la surface d'abandon pliocène dont le façonnement fait suite et termine le cycle d'aggradation de l'Ardèche débuté, en l'occurrence, à l'altitude de 130 m NGF (fig. 3). D'un point de vue géométrique et géodynamique, la réponse de l'endokarst par la formation du puits-cheminée de l'aven de Noël, prolongé par la galerie Intermédiaire, correspond assez bien à la dynamique remontante de l'Ardèche qui passe de l'altitude de 130 m à l'altitude de 210 m après une aggradation de 80 m. La formation de tels systèmes de conduits a permis de pallier le refoulement et le colmatage des exutoires dus au remblaiement de la ria de l'Ardèche par aggradation. Un tel agencement des conduits situés à proximité de l'Ardèche [Bigot, 2002] prouve la permanence des écoulements karstiques malgré l'aggradation de l'Ardèche [Mocochain *et al.*, 2006a].

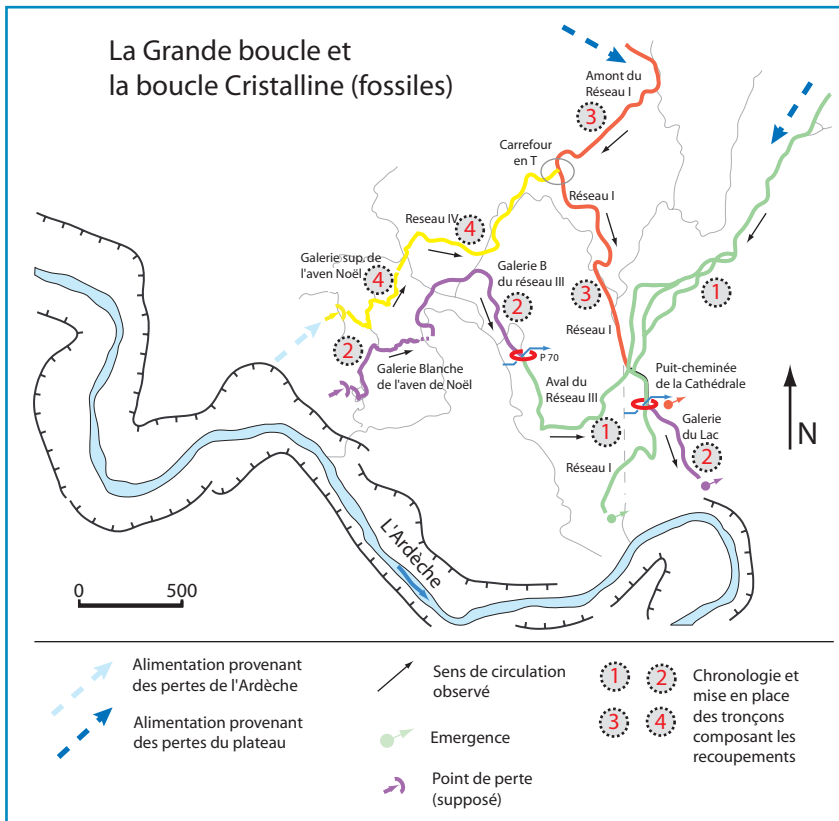


Figure 16 : Chronologie de mise en place des étages de la grotte de Saint-Marcel et des recouvrements souterrains de méandre corrélatifs. Ce processus se forme en deux temps :

- suite à une première remontée du niveau de base, le drainage provenant du plateau s'adapte par creusement d'un puits-cheminée et/ou d'un drain horizontal calé sur la surface piézométrique (étapes 1 et 3 de la figure);
- dans un second temps, le recouvrement de méandre se forme en se raccordant à ce drainage provenant du plateau.

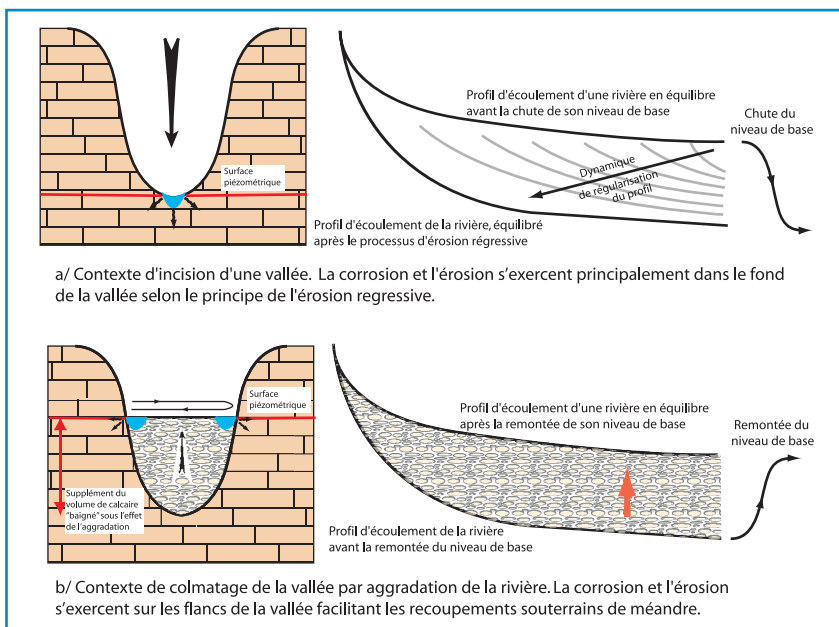
Chronology of the level formation and correlated fluvial meander shortcuts. This process happens in two steps:

- following a first rise of the base level, the drainage coming from the plateau adapts by forming an aven-pitch and/or a horizontal passage situated near the piezometric surface (steps 1 and 3 of the figure);
- in a second step, the shortcut of the fluvial meander forms by connecting itself to the drainage coming from the plateau.

B) Synthèse : un système de recouvrements de méandre étagés

Les trois recouvrements souterrains de méandre identifiés (boucle Active pour l'étage inférieur; boucle Cristalline et Grande boucle pour l'étage intermédiaire; docs. III, IV et V, hors texte) se superposent et forment une grande partie des réseaux de Saint-Marcel. Cet étagement de recouvrements souterrains de méandre, associé à la rivière souterraine de Saint-Remèze [Martini, 2005] atteste la récurrence de cette spéléogénèse malgré les oscillations répétées de la rivière.

Figure 17 : Evolution des conditions d'érosion et de corrosion d'une rivière en fonction de l'évolution de son niveau de base.
Evolution of corrosion and erosion of a river as a function of the evolution of its base-level.



L'amplitude décrite par les recouvrements souterrains de méandre amène à s'interroger sur la dynamique de creusement des conduits qui ne sont pas parallèles, mais presque symétriques au cours décrit par l'Ardèche aérienne. En effet, le cheminement souterrain est parfois plus long et plus sinueux que celui de la rivière aérienne. En outre, le gradient topographique de la rivière est très faible entre le point de perte et le point d'émergence qui n'excède pas les deux à cinq mètres.

On trouve les éléments de réponse en analysant les deux tronçons distincts que présentent ces recouvrements de méandre stipulant une formation en deux temps. Le tronçon amont est représentatif d'une position durablement stable de l'Ardèche qui en assure l'essentiel de son alimentation. Le tronçon aval est généralement situé en contrebas du précédent où s'effectuent la confluence et le mélange des eaux de la rivière Ardèche avec celles issues du plateau. Dans les deux cas (boucle Cristalline et Grande boucle), les tronçons aval semblent préexister aux recouvrements souterrains de méandre car leur profil d'écoulement est parfaitement continu depuis la zone d'alimentation provenant du plateau. Ainsi, ce sont les tronçons amont des boucles qui viennent se connecter sur les tronçons aval déjà en place et façonnés par les eaux du plateau (fig. 16). Dès lors, on peut penser que les tronçons aval des boucles (creusés à l'origine par les eaux du plateau) favorisent la capture souterraine des tronçons amont. Pour comprendre la logique de ces recouvrements souterrains, il ne faut alors prendre en compte que le creusement de la partie amont puisque les tronçons aval préexistent. Ainsi, la formation du cheminement souterrain de la rivière se trouve plus court de moitié (demi-boucles) qu'une boucle classique développée parallè-

lement au cours aérien. Cette spéléogénèse peut s'apparenter à une capture karstique. En effet, la formation en deux temps des recouvrements souterrains de méandre est assimilable à un détournement d'un écoulement sub-aérien allochtone par un écoulement souterrain autochtone.

Par ailleurs, le transit souterrain d'une partie des eaux de l'Ardèche se trouve favorisé par l'évolution aggradante de la rivière qui permet d'envoyer un plus grand volume de calcaire (fig. 17). Tout cet ensemble de facteurs facilite les processus de spéléogénèse le long de la fracturation locale préalable aux recouvrements souterrains de méandre.

C) Les épisodes pléistocènes dans le fonctionnement des grottes de Saint-Marcel

Si les grands traits de la grotte de Saint-Marcel ont été acquis durant le cycle messino-pliocène, il reste toutefois une part des morphologies et du creusement des réseaux attribuable au Pléistocène.

La ré-incision de l'Ardèche au Pléistocène provoque l'évacuation du remplissage fluvial pliocène ayant colmaté les gorges. On peut donc attribuer à l'Ardèche le décolmatage des réseaux tout en conservant leurs morphologies originelles. Toutefois, on peut rattacher aux phases du Pléistocène, la formation des puits-méandres qui trépanent certaines galeries de la grotte de Saint-Marcel. Les puits gravitaires (puits-méandres) creusés à l'emporte-pièce, ne semblent assurer aucun rôle hydrologique dans le fonctionnement des réseaux. A l'exception du puits d'accès au réseau Solvay (**doc. II, hors texte**), ces puits ne mettent pas non plus en relation deux étages de la grotte.

Enfin, on peut toutefois noter que certaines portions de l'étage intermédiaire, pourtant perché au-dessus du niveau de base, sont réennoyées de façon exceptionnelle lors de très fortes pluies [Audra *et al.*, sous presse]. Les réseaux noyés peuvent alors se mettre en charge et déverser l'eau en excès par des puits-cheminées (observations faites dans la galerie A) jusqu'à réemprunter l'étage intermédiaire. Les phénomènes de mises en charge exceptionnelles ont dû avoir cours tout au long du Pléistocène, ce qui a probablement permis le décolmatage de certains réseaux.

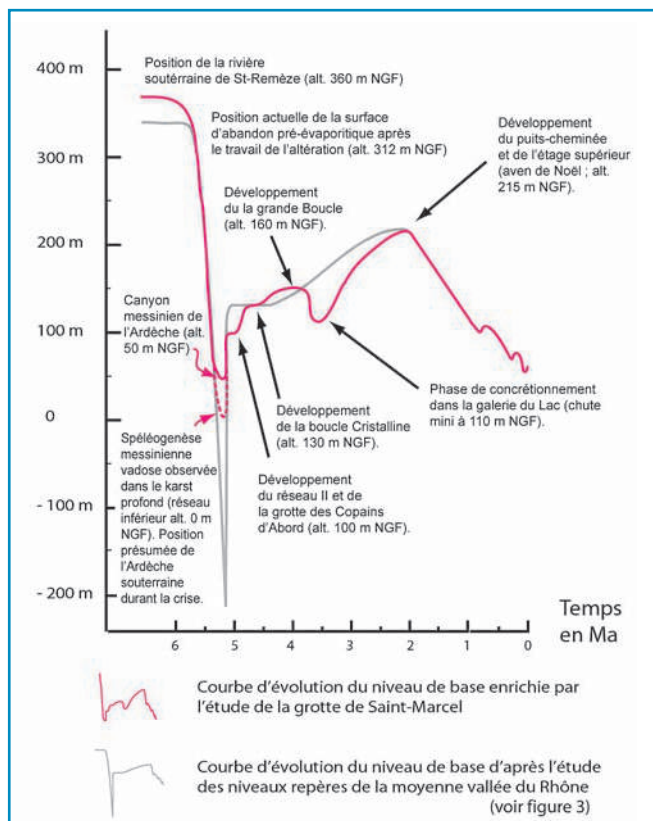


Figure 18 : Courbe d'évolution du niveau de base restituée d'après l'étude des niveaux repères en moyenne vallée de la Rhône et des niveaux de karstification de la grotte de Saint-Marcel. *Reconstitution of base-level evolution by Messinian Pliocene benchmark levels in the middle Rhône Valley and the karstification levels of Saint Marcel Cave.*

Conclusion

Les investigations menées à la fois dans la grotte de Saint-Marcel et sur les différents niveaux repères ont permis de révéler les deux principaux modes de spéléogénèse qui président à la formation de grottes dans les gorges de l'Ardèche. En premier lieu, il s'agit de la réponse *per ascensum* d'un système de drainage, hérité de la crise de salinité, par creusement de puits-cheminées sous contrôle des stades d'exhaussement du niveau de base au cours du Pliocène. En second lieu, il s'agit de la formation de recouvrements souterrains de méandres aériens, d'ampleur plurikilométrique, dont l'étagement est tributaire de la même dynamique remontante du niveau de base. Ces recouvrements souterrains de méandres correspondent à une succession de longues phases de stabilité de la rivière entre deux stades d'aggradation.

C'est la prise en compte de la géodynamique du cycle messino-pliocène, déduite de l'étude des niveaux repères, qui a permis de restituer les grandes tendances de l'évolution du niveau de base (fig. 3) responsables de phénomènes endokarstiques particulièrement bien développés en Basse Ardèche. En retour, l'étude morphosédimentaire plus fine des étages de l'endokarst a révélé plusieurs stades

d'évolution du niveau de base qui ne semblent pas avoir donné lieu à la formation de niveaux repères et échappent pour autant à l'histoire géodynamique régionale. On note ainsi un stade de stabilité du niveau de base vers 100 m au début du Pliocène, déduit de la formation du réseau II et de la partie aval du réseau III, ou encore le stade de spéléogénèse de la Grande boucle qui permet de confirmer une longue phase de stabilité de l'Ardèche vers 160 m NGF au Pliocène [190 m pour la partie amont des gorges; Mocochain *et al.*, 2006b]. Les phases de stabilité de l'Ardèche ne sont pas les seules à ponctuer une dynamique globalement aggradante de la rivière puisque l'étude du karst a permis de révéler une phase de ré-incision de l'Ardèche dans sa vallée vers 3,8 Ma, déduite de l'assèchement et du concrétionnement de certaines galeries.

L'« effet mémoire » de l'endokarst a permis la conservation d'événements indécélables en surface. Il autorise une meilleure compréhension des phénomènes karstiques et améliore singulièrement la courbe d'évolution du niveau de base établie initialement à partir des seuls niveaux repères (fig. 18).

La grotte de Saint-Marcel s'avère un site de référence illustrant l'importance des impacts directs et différés du mégacycle eustatique messino-pliocène

Bibliographie

dans la spéléogénèse du pourtour méditerranéen. A ce jour, il s'agit d'un des exemples endokarstiques les plus démonstratifs permettant d'illustrer la notion d'impacts différés, la remontée du niveau de base, de la crise de salinité.

Les investigations menées dans la grotte de Saint-Marcel devraient permettre d'étendre le modèle de spéléogénèse à l'ensemble des gorges de l'Ardèche et de compléter ainsi les travaux de J. Martini [2005] sur la karstogénèse précrise de salinité et ceux de Ph. Audra et collaborateurs [Audra et al., 2001] sur la karstogénèse fini-pliocène et pléistocène.

Remerciements :

Nous adressons un grand merci à tous les spéléologues qui ont participé de près ou de loin à l'enrichissement des connaissances de cette cavité « hors normes » qu'est la grotte de Saint-Marcel, en particulier ceux du Spéléo-Goupe du Forez (SGF), du Spéléo-Club de Saint-Marcel (SCSM) et d'AVENS. Merci à tous les topographes qui ont contribué à la synthèse topographique : Bernard Dupré et Michel Bozon du SCSM, Christian Drevet du SGF, pour les parties exondées et pour les parties noyées, aux plongeurs assistants, en particulier, Frédéric Bonacossa, Christophe Depin, Philippe Imbert, Frédéric Roux d'AVENS. Merci à la centaine de porteurs des bouteilles de plongée et aux photographes qui nous ont aimablement mis à disposition leurs clichés : Bernard Dupré, Peter Goossens, Victor Ferrer, ainsi qu'aux porteurs des flashes : Frédéric Têtu, Christian Boucher, Alain Couturaud, Jean-Pierre Rehspringer. On ne peut oublier ceux qui nous ont guidés sur le terrain ou fourni des renseignements sur des phénomènes karstiques intéressants : Hans Martin et Anke Luz, Olivier Peyronelle, Judicaël Arnaud, Philippe Monteils, Jean-Philippe Grandcolas. Nous tenons également à remercier l'ARSPAN qui coordonne les visites de l'aven de Noël et dont les membres s'impliquent dans la protection des cavités en favorisant la réflexion et l'essaimage des idées.

Nous remercions la Mairie de Saint-Marcel, propriétaire de la cavité, qui a autorisé l'accès à la grotte, et la Mairie de Bidon pour son soutien permanent. Merci également à Annie Flahaut dont la maison de Bidon s'est transformée annuellement depuis 94 en camp de base de plongée spéléologique. Nous n'oublions pas non plus de gratifier le travail des relecteurs : Philippe Audra et Hubert Camus qui ont amélioré le texte initial et rendu sa lecture plus facile. Nous remercions également l'Association Française de Karstologie et le CEREGE pour leur financement du document hors texte.

Enfin, nous tenons à remercier les membres du CEREGE et plus particulièrement O. Bellier, pour sa confiance et son soutien.

AUDRA Ph., 1994 - Karsts alpins. Genèse des grands réseaux souterrains. Exemples : le Tennengebirge (Autriche), l'île de Crémieu, la Chartreuse et le Vercors (France). *Karstologia Mémoires*, n° 5, 279 p.

AUDRA Ph., 1997 - Les réseaux noyés profonds français et leur origine. *Actes de la septième rencontre d'octobre*, Spéléo-Club de Paris, n° 7, pp. 27-31.

AUDRA Ph., CAMUS H. et ROCHETTE P., 2001 - Le karst des plateaux jurassiques de la moyenne vallée de l'Ardèche : datation par paléomagnétisme des phases d'évolution plio-quaternaires (aven de la combe Rajeau). *Bull. Soc. Géol. Fr.*, t. 172, n° 1, pp. 121-129.

AUDRA Ph., MOCOCHAIN L., CAMUS H., GILLI E., CLAUZON G. et BIGOT J.-Y., 2004 - The effect of the Messinian Deep Stage on karst development around the Mediterranean Sea. Examples from Southern France. *Geodinamica Acta*, n° 17/6, pp. 389-400.

AUDRA Ph., FAVERJON M. et MOCOCHAIN L., sous presse - La grotte de Saint-Marcel n'est pas fossile. Analyse des crues exceptionnelles de 2002 et 2003, implications dans la compréhension du fonctionnement hydrodynamique et de la structure du réseau karstique, à paraître *Spelunca*, 2007.

BALLESIO R., 1972 - Etude stratigraphique du Pliocène rhodanien. *Docum. Lab. Géol. Fac. Sc. Lyon*, 53, 333 p.

BARBER P.M., 1981 - Messinian subaerial erosion of the proto-Nile delta. *Mar. Geol.*, 44, p.253-272.

BAULIG H., 1928 - *Le Plateau Central de la France et sa bordure méditerranéenne*. Armand Colin, Paris, 592 p.

BELLEVILLE L., 1985 - *Hydrologie karstique : géométrie, fonctionnement et karstogénèse des systèmes karstiques des gorges de l'Ardèche*. Thèse Géologie, Univ. Grenoble I, 228 p.

BESSON D., CLAUZON G., COUEFFE R., DEXCOTE Y., FERRY S., GONZALO J., MOCOCHAIN L., PARIZE O., RUBINO J.-L., SUC J.-P. et TESSIER B., 2002 - Le Néogène du bassin d'avant-pays rhodano-provençal. *Livret guide de l'excursion Stati 2002*, 162 p.

BIGOT J.-Y., 2002 - Conduits ascendants dans les gorges de l'Ardèche : les avens Cordier, Rochas et de Noël. *Actes de la douzième rencontre d'octobre*, Spéléo-Club de Paris, n° 12, pp. 15-19.

BIGOT J.-Y., 2004a - Les puits et conduits subverticaux. *Spéléo*, n° 49, pp. 24-26.

BIGOT J.-Y., 2004b - Les puits et conduits subverticaux, l'exemple de l'aven de la Pépette, Simiane-la-Rotonde, Alpes-de-Haute-Provence, France. *Atti della Tavola Rotonda Internazionale "Grotte e carsismo nel gruppo delle Grigne e nelle valli del Lario"*, Valsassina, 2-5 settembre 2004. *Le Grotte d'Italia, Revista dell'Istituto Italiano di Speleologia e della Società Speleologica Italiana, Serie V, n. 5*, Frasassi, pp. 57-62.

BIGOT J.-Y., 2005 - Les recoupements de méandre, le cas de la grotte de Saint-Marcel. *Actes numériques des 4^e Rik-Rak*, Seyssins, 15 & 16 janvier 2005.

BLANC J.-J. et CHAMLEY H., 1975 - Remplissage de réseaux karstiques à la grotte de Saint-Marcel d'Ardèche. *Bulletin de l'Association française pour l'Etude du Quaternaire*, n°2, pp. 71-82.

BOINET D. et CAMUS H., 1998 - Observations sur la genèse et l'évolution des puits-cheminées : l'exemple singulier du réseau du Garrel - St-Jean-de-Buèges (Hérault). *Actes de la huitième rencontre d'octobre*, Spéléo-Club de Paris, n° 8, pp. 12-13.

BRUNET P., 2000 - L'Ardèche au Quaternaire. *Actes de la dixième rencontre d'octobre*, Spéléo-Club de Paris, 7 - 8 octobre 2000, n° 10, pp. 11-17.

CAMUS H., 1997 - Formation des réseaux karstiques et creusement des vallées. *Karstologia*, n° 29, pp. 23-42.

CAMUS H., 1999 - L'organisation des réseaux de drainage à différents stades de l'évolution du paysage karstique de la bordure carbonatée sud-cévenole (de l'Aigoual à la basse vallée de l'Hérault). *Des paysages du karst au géosystème karstique - Dynamiques, structures et enregistrements karstiques*. Université de Savoie, Vol. 1, pp. 55-74.

CAMUS H., 2003 - *Vallées et réseaux karstiques de la bordure carbonatée sud-cévenole. Relations avec la surrection, le volcanisme et les paléoclimats*. Thèse de géographie physique - Géomorphologie. Université Michel de Montaigne - Bordeaux III, 675 p.

CHEVALIER P., 1944 - Distinctions morphologiques entre deux types d'érosion souterraine. *Rev. Géogr. Alpine*, XXXIII/III, pp. 475-486.

CHUMAKOV I.S., 1973 - Geological history of the Mediterranean at the end of Miocene-the beginning of the Pliocene according to new data. *Init. Repts. DSDP*, Washington, XIII, 2, pp.1241-1242.

CITA M.B., 1975 - Planktonic foraminiferal biozonation of the Mediterranean Pliocene deep sea record. A revision. *Riv. Ita. Paleontol.*, 81, 4, pp. 527-544.

CLAUZON G., 1982 - Le canyon messinien du Rhône : une preuve décisive du "Desiccated deep-basin model" [Hsu, Cita, Ryan, 1973]. - *Bull. Soc. Géol. France*, 24, 3, pp. 597-610.

CLAUZON G., 1996 - Limites de séquences et évolution géodynamique. *Géomorphologie*, 1, pp. 3-22.

CLAUZON G., RUBINO J.-L. et SAVOYE B., 1995 - Marine Pliocene Gilbert-type fan deltas along the French Mediterranean coast. *Livret guide de l'excursion de l'ASF*, publication n° 23, pp. 145-222.

DARNE F., 1995 - Discussion sur l'origine hydrothermale de concrétions observées dans une cavité ardéchoise. *Actes de la cinquième rencontre d'octobre*, Spéléo-Club de Paris, n° 5, pp. 25-26.

DEBARD E., 1997 - Les remplissages karstiques du Bas-Vivarais : karstogénèse, sédimentogénèse et archéologie. *Quaternaire*, 8, 2/3, pp. 305-317.

DELANNAY J.-J., DEBARD E., FERRIER C., KERVAZO B. et PERRETTE Y., 2001 - Contribution de la cartographie morphologique souterraine dans l'étude spéléogénétique de la grotte Chauvet. Premiers éléments spéléogénétiques et implications paléogéographiques, préhistoriques et paléontologiques. *Quaternaire*, 12-4, 235-248.

DELANNAY J.-J., PERRETTE Y., DEBARD E., FERRIER C., KERVAZO B., PERROUX A.-S., JAILLET S. et QUINIF Y., 2004 - Intérêt de l'approche morphogénétique pour la compréhension globale d'une grotte à haute valeur patrimoniale : la grotte Chauvet (Ardèche, France). *Karstologia*, 44, pp. 25-42.

DEMARCO G., 1960 - Observations à propos de la série pliocène du sondage de Pierrelatte (Drôme). *C. R. Acad. Sci.*, Paris, 250, pp. 4013-4015.

FONTANNES F., 1882 - Note sur l'extension et la faune de la mer pliocène dans le Sud-Est de la France. *Bull. Soc. Géol. Fr.*, (3), 11, pp. 103-141.

FRACHON J.-C. 1963 - Etude du réseau souterrain de Cerdon-Menuille. *Spelunca*, n° 3, pp. 24-26.

GOMBERT Ph., 1988 - *Hydrogéologie et karstogénèse du Bas Vivarais calcaire*. Thèse de troisième cycle, Montpellier, 1988, 483 p.

GUÉRIN R., 1973 - *Un exemple du rôle de la tectonique et de la microtectonique dans la géométrie des écoulements karstiques fossiles et actuels : le Bas-Vivarais calcaire*. Thèse, Univ. Montpellier, 113 p.

GUILCHER A., 1954 - *Morphologie littorale et sous-marine*. P.U.F., 210 p.

HAQ B.U., HARDENBOL J. et VAIL P., 1987 - Chronology of fluctuating sea levels since the Triassic (250 million years ago to present). *Science*, n° 235, pp. 1156-1167.

HARDENBOL J., THIERRY J., FARLEY M.B., JACQUIN T., DE GRACIANSKY P.C. et VAIL P.R., 1998 - Mesozoic and Cenozoic sequence chronostratigraphic framework of European basins. In P.C. de Graciansky, J. Hardenbol, T. Jacquin & P.R. Vail (eds): *Mesozoic and Cenozoic sequence stratigraphy of European basins*, SEPM, Spec. Publ., n° 60, pp. 3-13.

HÄUSELMANN Ph., HOBLÉA F. et JAILLET S., 2005 - Intérêt paléogéographique et patrimonial des cavités du vallon de l'Echarassou (affluent du Baravon, affluent de l'Ibie, commune de Lagorce, Ardèche). *Actes numériques des 4^e Rik-Rak*, Seyssins, 15 & 16 janvier 2005.

LISMONDE B., 2000 - Corrosion des coupoles de plafond par les fluctuations de pression de l'air emprisonné. *Karstologia*, n° 30, pp. 39-46.

MANDIER P., 1988 - *Le relief de la moyenne vallée du Rhône au Tertiaire et au Quaternaire. Essai de synthèse paléogéographique*. Docum. BRGM, n° 151, 885 p.

MARTEL É.-A., 1894 - *Les abîmes*. Paris, Delagrave, 578 p.

MARTINI J., 2005 - Etude des paléokarsts des environs de Saint-Remèze (Ardèche, France) : mise en évidence d'une rivière souterraine fossilisée durant la crise de salinité messinienne. *Karstologia*, n° 45-46, pp. 1-18.

MOCOCHAIN L., 2001 - *Les implications des événements fini-miocènes et pliocènes dans la karstogénèse et l'hydrogéologie du Bas Vivarais calcaire (Ardèche, France)*. Mém. de maîtrise de géographie physique, Univ. de Provence, UFR de Géographie, 75 p.

MOCOCHAIN L., 2002 - *Utilisation des marqueurs chronostratigraphiques miocènes et pliocènes pour l'étude karstologique et hydrogéologique du Bas-Vivarais (Ardèche, France)*. Mém. de DEA, Univ. de Provence, UFR de Géographie, 43 p.

MOCOCHAIN L., 2004 - Les impacts directs et différés de la crise de salinité enregistrés dans le karst ardéchois. *Le Grotte d'Italia*, série V, n° 5, Frasassi 2004, pp. 91-104.

MOCOCHAIN L., CLAUZON G. et BIGOT J.-Y., 2006a - Réponses de l'endokarst ardéchois aux variations eustatiques générées par la crise messinienne. *Bull. Soc. Géol. Fr.*, n° 1, t. 177, pp. 27-36.

MOCOCHAIN L., CLAUZON G., BIGOT J.-Y. et BRUNET Ph., 2006b - Geodynamic evolution of the peri-Mediterranean karst during the Messinian and the Pliocene: evidence from the Ardèche and Rhône Valley systems canyons, Southern France. *Sedim. Geol.*, n° 189-189, pp. 219-233.

NICOD J., 1997 - Les recoupements karstiques de méandres encaissés. *Karstologia*, n° 30, pp. 41-48.

PASCAL M., LAFARGE D., CHEDHOMME J. et GLINTZBOECKEL C., 1989 - Notice explicative, carte géologique de la France (1/50.000), feuille Bourg-Saint-Andéol (889). B.R.G.M., Orléans, 67 p. Carte géologique par Pascal M., Elmi S., Busnardo R., Lafarge D., Truc G., Valleron M., Chedhomme J. et Combier J.

RODET J., 1992 - *La craie et ses karsts*. Centre Normand d'Etude du Karst - Groupe Seine édit., 560 p.

RENAULT Ph., 1967 - Contribution à l'étude des actions mécaniques et sédimentologiques dans la karstogénèse. *Annales de spéléologie*, v. 22 1 et 2, pp. 5-17 et 209-267.

RYAN W. B. F., HSÚ K. J. et al., 1973 - *Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project*, 13, 1-2, U.S. Government Printing Office, Washington D. C. (1973) 1247 p.