

Quel est l'âge du canyon de l'Ardèche (Ardèche, France) ?

What's age of Ardèche Canyon (France)?

Ludovic MOCOCHAIN(1, 2), **Philippe AUDRA**(3), **Jean-Yves BIGOT**(4), **Georges CLAUZON**(1), **Olivier BELLIER**(1) et **Philippe MONTEIL**(5)

(1) CEREGE ; Aix-Marseille Universités, Europôle de l'Arbois, BP 80, 13545 Aix-en-Provence, cedex 4, France ; ludomochain@gmail.com ; clauzon@cerege.fr ; bellier@cerege.fr

(2) Aix-Marseille Université, Centre de Sédimentologie - Paléontologie « Géologie des systèmes carbonatés », 13331 Marseille cedex 03, France

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

(4) Les 7 portes, 04400 Barcelonnette, France ; catherine.arnoux@club-internet.fr

(5) Buisson Barbier, 42520 Roisey, France ; monteil.philippe@free.fr

Résumé - Le plateau calcaire de Saint-Remèze se trouve à 150 km au nord du rivage de la Méditerranée et en relation directe avec le Rhône, l'exemple emblématique des impacts morphologiques provoqués par la crise de salinité messinienne. Aux abords de ce plateau calcaire, la vallée du Rhône recèle les quatre niveaux repères issus de la crise de salinité messinienne : 1/ la surface d'abandon pré-évaporitique, 2/ la surface d'érosion messinienne, 3/ la transition marin/continental et 4/ la surface d'abandon pliocène. L'étude de ces niveaux repères permet de restituer une courbe de l'évolution du niveau de base sur 6 Ma. Cette courbe fournit un cadre géodynamique de référence pour l'étude de la morphogenèse de la Basse Ardèche calcaire. Sur la bordure orientale du plateau de Saint-Remèze, la région de Vallon-Pont-d'Arc, située à l'entrée du canyon de l'Ardèche, présente plusieurs vallées abandonnées par l'Ardèche. L'étude morphologique et l'étude des remplissages sédimentaires de ces vallées abandonnées ont montré un important diachronisme dans leur genèse attesté par un remblaiement alluvial des vallées au cours du Pliocène. La dynamique de remblaiement de la vallée de l'Ardèche est responsable d'une première défluviation par épigénie d'aggradation. La reconnaissance de cette première défluviation permet d'attribuer le creusement du canyon de l'Ardèche, non pas au Pléistocène, mais intégralement à la crise de salinité. L'aggradation se termine par une longue phase de stabilité des rivières en haut niveau à la fin du Pliocène. Cette position rehaussée du niveau de base a favorisé la genèse de grands aplanissements dans le paysage ayant les caractéristiques morphologiques de pédiments. Nos observations permettent d'une part, de préciser la courbe d'évolution du niveau de base régional et d'autre part, de formuler une nouvelle interprétation de l'évolution géomorphologique du plateau de Saint-Remèze et de son endokarst sur plus de 6 Ma.

Mots clés : crise messinienne de salinité, Pliocène, évolution du niveau de base, canyons messiniens, aggradation alluviale, Rhône, Ardèche.

Abstract- The karstic canyon of Lower Ardèche is located in the Middle Rhône valley, which is directly tributary to the Mediterranean Sea. The Rhône River is emblematic of the Messinian Salinity Crisis' (MSC) impact on landscape morphology. Along the edge of the Saint-Remèze Plateau, the Rhône valley displays four benchmark levels generated by the MSC: the Pre-evaporitic abandonment surface (1), the Messinian erosional surface (2), the Marine/non-marine surface of the Pliocene ria (3) and the Pliocene abandonment surface (4). The study of these benchmark levels allows us to reconstruct the evolution of the regional base level over the last 6 Ma. We obtain a curve for base-level evolution that provides a geodynamic reference, which is used to investigate the morphogenesis of the Saint-Remèze karstic plateau. The Ardèche River downcuts the Saint-Remèze Plateau in a deep canyon, from Vallon-Pont-d'Arc to the West, to its confluence with the Rhône to the East. Several abandoned valleys are present along the western edge of the Saint-Remèze Plateau at the inlet of the Ardèche canyon. In these abandoned valleys, the fluvial deposits are related to several periods, from the Pliocene onwards. They provide important insights into the fluvial dynamics: a 160m-thick aggradation sequence infilled the Ardèche canyon during the Pliocene. This aggrading river caused the first lateral shifting, as an aggradation epigenesis. This first infilling shows that the Ardèche canyon already existed before the Pliocene. Secondly, it has been demonstrated that the Ardèche Canyon is downcut into the Pre-evaporitic surface of the Saint-Remèze Plateau, dated to 5.45 Ma. Consequently, the canyon downcutting is entirely due to the MSC, and occurred during a time span of only 100 000 years. Based on these observations, it is possible to elucidate the curve of the regional base-level evolution. Hence, we are able to propose a new interpretation of the geomorphological evolution of the Saint-Remèze karstic plateau for the last 6 Ma. The aggradation period ends at the end of the Pliocene with long high-level riverbed stability. It favours the development of large low gradient surfaces as pediments. The complete Messinian-Pliocene eustatic cycle is responsible for the downcutting of the Ardèche canyon and its infilling during the Pliocene. For the study of the peri-Mediterranean karst areas, we propose to apply the Lower Ardèche valley evolution model, based on the base-level oscillations during and after the MSC.

Keywords: Messinian Salinity Crisis, karst, Pliocene, base-level evolution, Messinian canyons, valley aggradation, Rhône and Ardèche Rivers.

Introduction

L'observation de sédiments marins du Pliocène (marnes bleues) en recouvrement sur un paléo-talweg de l'Ardèche au débouché de son canyon actuel a permis à plusieurs auteurs [Fontannes, 1882 ; Baulig, 1928 ; Denizot, 1952 ; Balesio, 1972 ; Blanc, 1976 ; Belleville, 1985] d'attribuer le creusement du canyon de l'Ardèche au Miocène voire au Messinien. Cependant, cet âge reste discutée car il ne peut concerner que l'extrême aval du canyon de l'Ardèche. La discussion

porte notamment sur les conséquences de cette datation pour l'interprétation chronologique des grandes phases de spéléogénèse du plateau de Saint-Remèze traversé par l'Ardèche.

De nombreux travaux ont révélé l'existence d'un endokarst étagé en bordure du canyon de l'Ardèche. Cet étagement a été mis en rapport avec les positions successives occupées par la rivière au cours de son évolution [Labrousse, 1977 ; Pascal, Lafarge *et al.*, 1989 ; Debard, 1997]. La question porte à présent sur la chronologie des phases de spéléogénèse. Pour

certains auteurs [Debard, 1997 ; Delannoy, Debard *et al.* in Clottes, 2001 ; Delannoy, Debard *et al.*, 2001 ; Delannoy, Perette *et al.*, 2004], l'étagement des niveaux de l'endokarst serait l'expression d'un creusement de la vallée de l'Ardèche par paliers, ces derniers étant attribués à la crise de salinité messinienne d'une part et aux cycles glaciaires pléistocènes d'autre part.

L. Mocochain, G. Clauzon *et al.* [2006b ; 2009] attribuent à la crise messinienne l'intégralité du creusement du canyon de l'Ardèche. Cette hypothèse repose

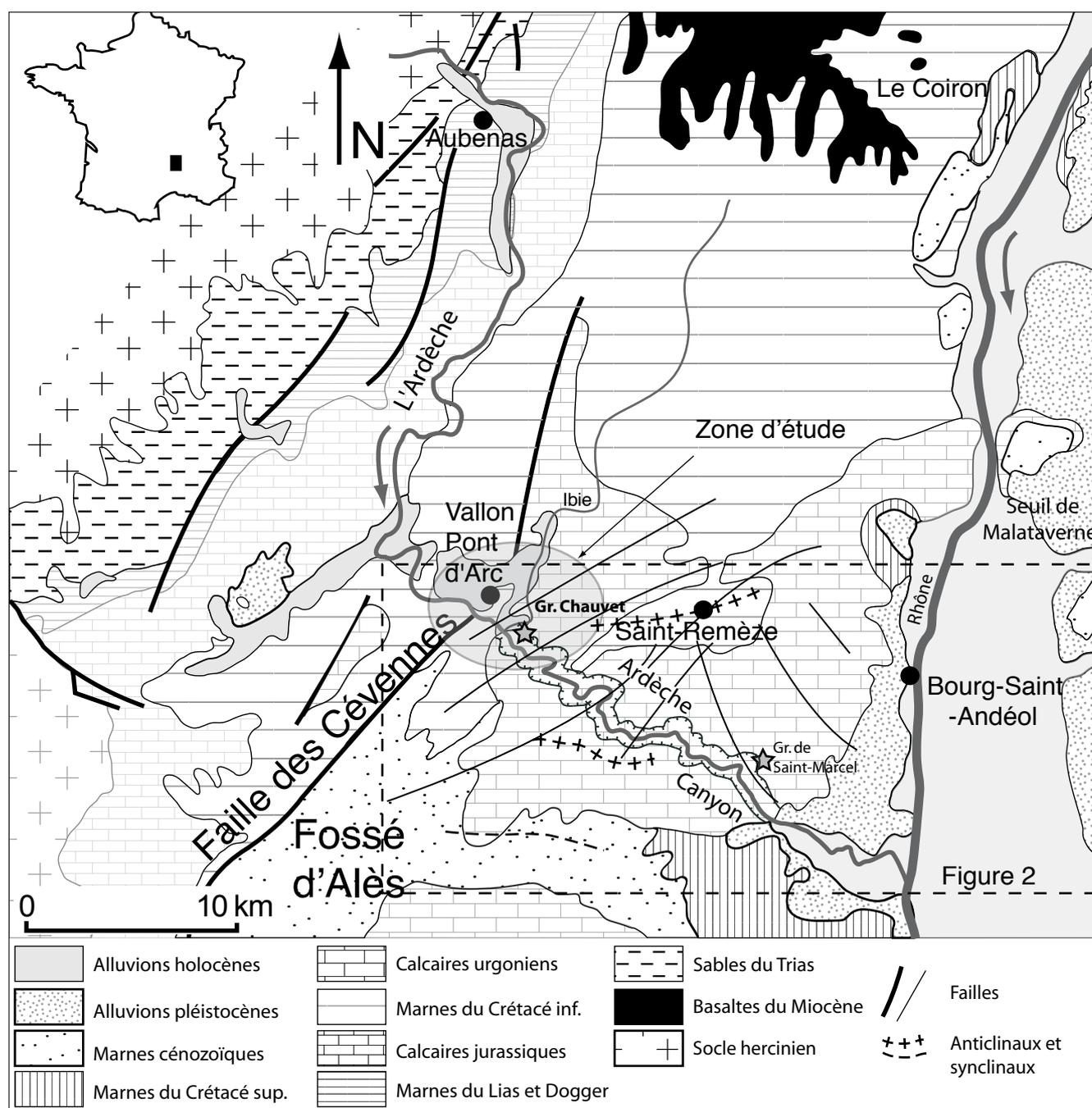


Figure 1 - Carte géologique simplifiée des alentours de la vallée de l'Ardèche.

Geological map of the Middle and Lower Ardèche.

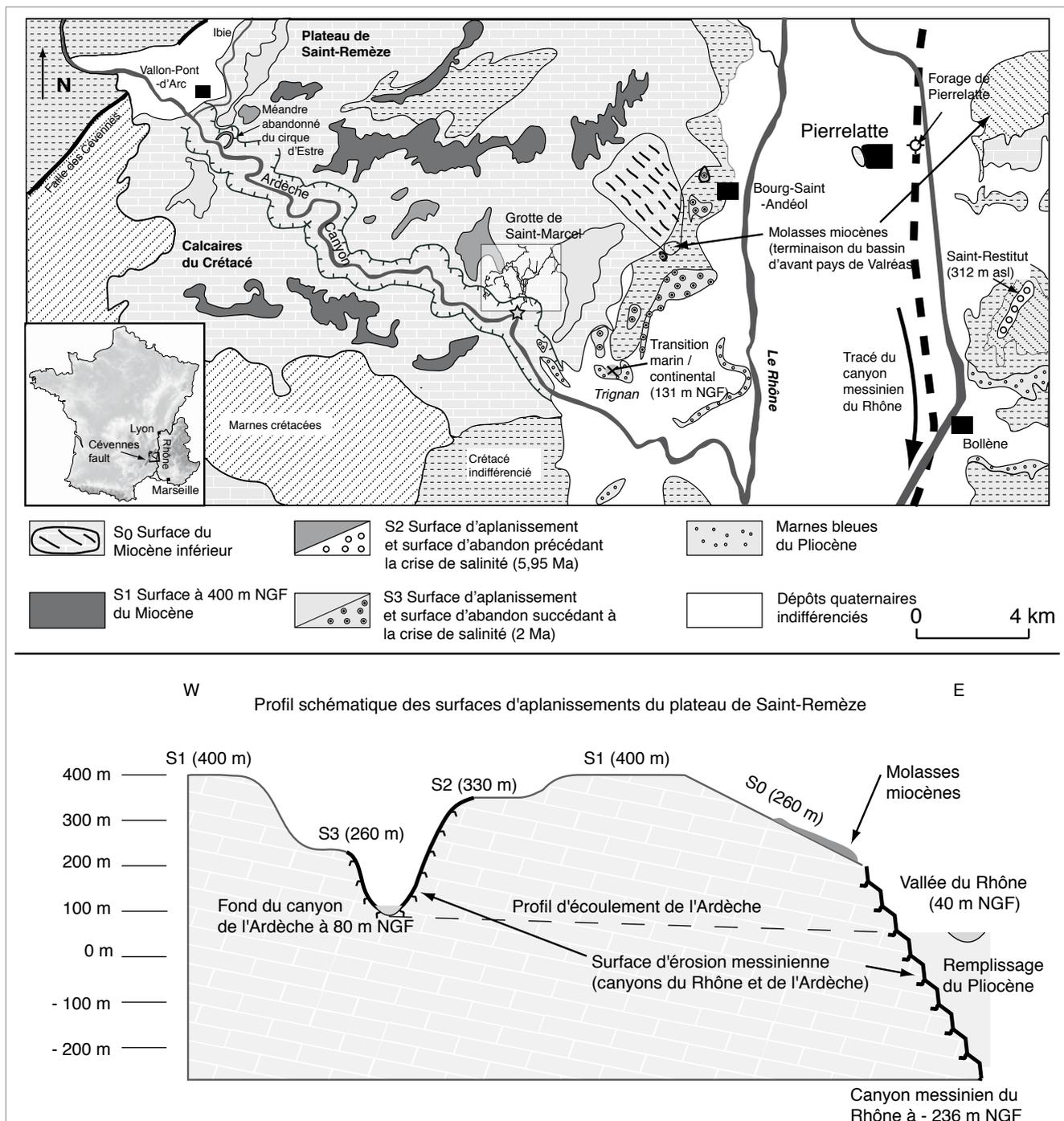
sur l'étagement *per ascensum* de l'endokarst sur 200 m de dénivellation, depuis le fond du canyon de l'Ardèche jusqu'au toit du remplissage pliocène des vallées. Cette spéléogénèse *per ascensum* est liée à l'évolution remontante du niveau de base au cours du Pliocène (phase 1 : remise en eau de la Méditerranée ; phase 2 : aggradation des rivières).

L'objectif de ce travail est d'abord la question de la datation du creusement du canyon de l'Ardèche par l'étude des

défluviations de la rivière qui ont été identifiées à l'amont du canyon, autour de Vallon-Pont-d'Arc (figures 1 et 2).

La défluviatio n par capture ou auto-capture est un phénomène connu et parfaitement illustré par le site du Pont d'Arc qui recoupe le méandre du cirque d'Estre (Vallon-Pont-d'Arc, figure 2). Ce phénomène d'auto-capture est responsable de l'abandon du cirque d'Estre au Pléistocène supérieur, attesté par l'âge des dépôts corrélatifs [Fza1 noté sur la carte géologique ; Pascal,

Lafarge *et al.*, 1989]. Un kilomètre en amont, dans la région de Vallon-Pont-d'Arc, nos relevés de terrain couplés à une analyse morphologique de la topographie (carte, modèle numérique de terrain) ont mis en évidence plusieurs autres défluviations de l'Ardèche. La chronologie relative des défluviations permet de proposer une nouvelle interprétation de l'âge du creusement du canyon de l'Ardèche ainsi que les modalités de son évolution postérieure.



Notre étude propose ainsi une relecture géomorphologique des paysages de la basse vallée de l'Ardèche, fondée sur la réinterprétation des impacts directs et différés de la crise messinienne de salinité.

Cette interprétation permet, en outre, d'aborder sous un nouvel angle l'étude des processus de karstogenèse externes et internes de la basse vallée de l'Ardèche et fixe un cadre méthodologique d'études pour les karsts européens soumis à l'influence des oscillations du niveau de la Méditerranée [Mocochain, 2007].

I- Contexte géologique et cadre géodynamique

La région étudiée se situe en moyenne vallée de l'Ardèche, au niveau de sa confluence avec son affluent l'Îbie.

I. A- Contexte géologique de la région de Vallon-Pont-d'Arc

Cette région est au cœur de la couverture sédimentaire du Mésozoïque et du Cénozoïque qui recouvre le socle cévenol situé à l'ouest (figure 1). Cette couverture sédimentaire plonge vers le sud-est en direction de la vallée du Rhône. L'Ardèche coule vers l'est depuis les Cévennes, traverse du nord au sud la couverture sédimentaire selon un tracé en baïonnette, puis reprend un tracé vers l'est en direction de la vallée du Rhône (figure 1). Depuis les coulées volcaniques du Coiron, l'Ardèche ne collecte que deux affluents en rive gauche : l'Auzon qui prend naissance

au pied des coulées volcaniques et l'Îbie dont l'intégralité du cours est creusé dans les terrains sédimentaires du Mésozoïque (figure 1). A Vallon-Pont-d'Arc, l'Ardèche coule dans une large vallée creusée dans les marnes du Crétacé inférieur (Valanginien) et franchit perpendiculairement la faille des Cévennes (N035°) et la terminaison septentrionale du fossé d'Alès. L'Ardèche traverse ensuite, par un canyon de 300 m de profondeur et de 29 km de long, le plateau de Saint-Remèze constitué de calcaires du Crétacé (Barrémien et Aptien) à faciès urgonien.

C'est au cours du Miocène que ce paysage de plateau a acquis ses grands traits morphologiques horizontaux [Baulig, 1928 ; Cornet, 1988 ; Mocochain, Clauzon *et al.*, 2006b]. Le déclenchement de la crise messinienne va profondément bouleverser cette physiographie à dominante horizontale par le creusement de reliefs négatifs : les canyons messiniens.

I. B- Déroulement du cycle eustatique messino-pliocène en Méditerranée

La crise messinienne provient d'une amplification du cycle eustatique de 3^{ème} ordre TB 3.4 [Haq, Hardenbol *et al.*, 1987] par effet de seuil au niveau de l'actuel détroit de Gibraltar. La coupure entre mer Méditerranée et océan Atlantique fut responsable d'une chute du plan d'eau méditerranéen sans précédent. L'effondrement du plan d'eau, par dessiccation, a donné lieu à un double enregistrement :

- Le dépôt d'une puissante couche d'évaporites dans les plaines abyssales, restées sous faible tranche d'eau [Hsü, Cita *et al.*, 1973] ;
- Le façonnement d'une surface d'érosion sur les marges émergées du bassin [Lofi, Gorini *et al.*, 2005]. Cette surface d'érosion est prolongée, le long des cours d'eau, par des canyons. Sur la bordure nord-méditerranéenne, le canyon du Rhône, reconnu jusqu'au Jura [Clauzon, 1999], constitue le plus significatif témoignage morphologique de l'événement messinien [Clauzon, 1982]. A la latitude de Pierrelatte (figure 2), proche de sa confluence avec l'Ardèche, son talweg se trouve à -236 NGF [Demarcq, 1960 ; Clauzon, 1982]. Dix kilomètres en amont, sous la vallée morte de Malataverne, ce même talweg reste enfoui, sous les sédiments pliocènes, à -220 NGF [Camus, 2003].

La crise prend fin par la remise en eau du bassin méditerranéen qui a lieu lors du haut niveau stabilisé du cycle TB 3.4 [5,3/3,8 Ma ; Haq, Hardenbol *et al.*, 1987]. Lors de ce haut niveau marin (*high stand sea level*) se manifeste l'impact différé de la crise avec la structuration en « Gilbert type fan delta » du remblaiement du canyon du Rhône métamorphosé en ria par submersion [Clauzon, Rubino *et al.*, 1995, 1996].

I. C- Les niveaux repères, témoins de l'évolution du niveau de base (figure 3)

Les grandes oscillations du cycle messino-pliocène ont généré dans le paysage quatre niveaux repères. Leur reconnaissance spatiale et leur définition chronologique (isochrone ou diachrone) rend possible une restitution de l'évolution du niveau de base régional (tantôt marin, tantôt continental) entre 6 et 2 Ma.

I.C. 1- La surface d'abandon pré-évaporitique

Il s'agit des plaines alluviales du Rhône [Clauzon, 1982 ; 1996] et de l'Ardèche [Martini, 2005 ; Mocochain, Clauzon *et al.*, 2006 b] à la veille de la crise messinienne il y a 6 Ma.

La chute du plan d'eau méditerranéen au cours de la crise déclenche une vague d'érosion régressive le long du réseau hydrographique provoquant l'incision quasi-instantanée des plaines alluviales par les canyons messiniens. De fait, cette surface est un niveau repère isochrone [Clauzon, 1996]. Dans le paysage, cette surface

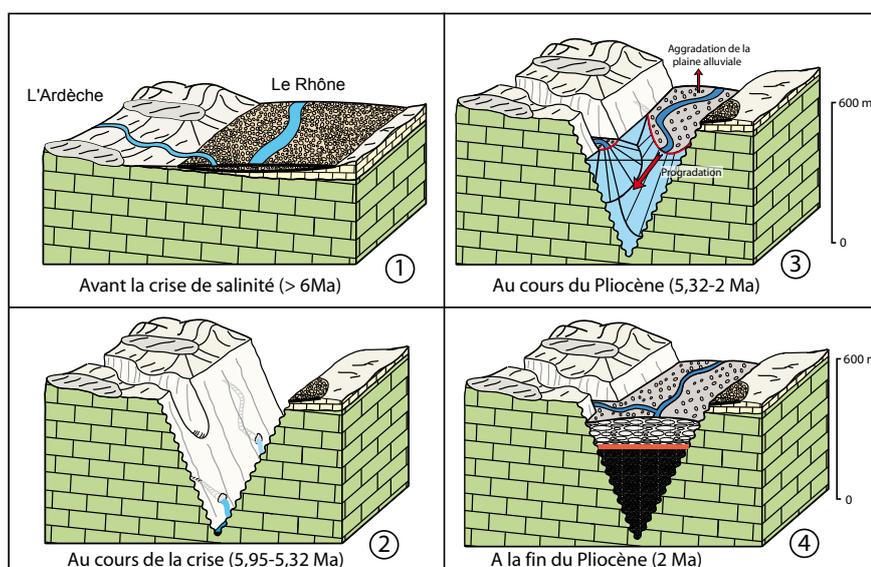


Figure 3 - Reconstitution de l'évolution du Rhône en quatre stades au cours du cycle messino-pliocène [d'après Mocochain, Clauzon *et al.*, 2006b].

Reconstruction of the Rhône river four state evolution since 6 Ma during the Messinian-Pliocene eustatic cycle [after Mocochain, Clauzon *et al.*, 2006b]

d'abandon pré-évaporitique ne se présente que sous forme de lambeaux. Elle est visible en rive gauche du Rhône, au droit de Bollène, sur le belvédère de Saint-Restitut à l'altitude de 312 m NGF et se présente sous la forme d'un cailloutis résiduel composé de galets siliceux rubéfiés [figure 2, Denizot, 1934 et 1952 ; Bonnet, 1963 ; Demarcq, 1960 ; Clauzon, 1982]. Pour l'Ardèche, la surface d'abandon pré-évaporitique se présente sous la forme d'un cailloutis de même nature qui recouvre de façon très éparse une surface fluvio-karstique vers 330 m NGF en rive gauche du canyon de l'Ardèche [Mocochain, Clauzon *et al.*, 2006a ; 2006b ; figure 2]. De récents travaux dans le karst ont permis de préciser la position à 360 m NGF de l'Ardèche à 5.45 Ma [Martini, 2005] qui précède le creusement de son canyon.

I.C. 2- Les canyons messiniens du Rhône et de l'Ardèche à 5.32 Ma

Le fond des canyons messiniens marque la position déprimée des rivières à la fin de la crise, juste avant leur submersion par la transgression pliocène à 5.32 Ma [Clauzon, 1996]. Dans la vallée du Rhône, en bordure du plateau de Saint-Remèze (Pierrelatte, Ardèche), un forage a rencontré les cailloutis du Rhône recouvrant le fond de son canyon messinien à la profondeur de -236 m NGF [Demarcq, 1960 ; Clauzon, 1982]. Ce niveau repère, couplé au précédent, restitue la profondeur d'incision du Rhône à 600 m [de 312 m à -236 m NGF ; Clauzon, 1982]. La position de l'Ardèche, qui coule actuellement sur l'encaissant à 50 m NGF à la sortie de son canyon, restitue une hauteur maximale possible de 300 m pour le creusement de son canyon messinien. Il existe donc une différence de creusement au cours de la crise messinienne entre l'Ardèche et le Rhône de près de 300 m.

La remise en eau ultra rapide de la Méditerranée [Blanc, 2002] arrête l'incision des canyons par submersion. Cette surface d'érosion fut transformée instantanément en surface fossile conférant à ce niveau repère un caractère isochrone [Clauzon, 1996].

I.C. 3- La transition marin / continental pliocène

Elle correspond à une variation des faciès sédimentaires entre les dépôts sous-aquatiques marins (*fore-set et bottom-set beds*) et les dépôts subaériens (*top-set beds*) du comblement des rias en *Gilbert-delta* au Pliocène [Clauzon, Rubino *et al.*, 1995]. La transgression pliocène provoque le refoulement des rivières et le blocage de leur charge sédimentaire tout à fait en amont des rias. Les

rivières opèrent alors un processus de comblement de leur ria par une rapide progradation de leur cône deltaïque. La transition marin / continental marque, sous forme d'une discontinuité dans un même corps sédimentaire, le passage du domaine sédimentaire marin au domaine sédimentaire continental (figure 3). Sous l'effet de la progradation, le profil en long des rivières s'allonge et provoque une aggradation du lit des rivières. Le dépôt de ce niveau repère progradant occupe toute la durée du comblement des rias, ce qui lui confère un âge diachrone [Clauzon, Rubino *et al.*, 1995 ; Clauzon, 1996]. La transition marin / continental est visible sur le site de Trignan, en bordure du plateau de Saint-Remèze à l'altitude de 130 m NGF (figure 2). Ce niveau repère a subi un exhaussement par surrection de 70 m après son dépôt [Clauzon, Mandier *et al.*, 1990 ; Mocochain, 2002 ; Besson, Clauzon *et al.*, 2002 ; Clauzon, Fleury *et al.*, 2004]. L'âge de la transition marin / continental sur le site de Trignan a été estimé à 4,7 Ma [Mocochain, Clauzon *et al.*, 2006a] par le témoignage chronologique des faunes piégées en amont (faune du Péage-du-Roussillon ; Aguilar, Clauzon *et al.*, 1989) et en aval [Saze, Mas Soulet ; Clauzon, Rubino *et al.*, 1995] de ce secteur.

I.C. 4- La surface d'abandon pliocène

Le dernier niveau repère (figure 3) marque la position de l'Ardèche et du Rhône une fois le remblaiement des rias achevé à la fin du Pliocène, à 2 Ma [Clauzon, 1996]. La surface d'abandon pliocène se situe vers 200 m d'altitude à la confluence de l'Ardèche et du Rhône [Mocochain, 2002 ; Mocochain, Clauzon *et al.*, 2006a ; 2006b]. Elle correspond à de grandes étendues de galets de quartz et quartzites. La surface d'abandon pliocène restitue la position des plaines alluviales des rivières avant leur abandon par creusement des vallées au Pléistocène sous l'impulsion du glacio-eustatisme [Clauzon, 1996]. Au cours du Pléistocène, cette dynamique d'incision génère l'étagement des terrasses alluviales depuis la surface d'abandon pliocène jusqu'à la position actuelle du Rhône vers 50 m NGF. En résumé, l'identification des niveaux repères permet de reconstituer l'évolution du niveau de base sur une durée de six millions d'années (figure 4) :

- vers 6 Ma, l'Ardèche et le Rhône coulent vers 340 / 360 m, légèrement en contre-haut de la surface d'abandon pré-évaporitique actuellement dégradée par l'érosion et l'altération ;

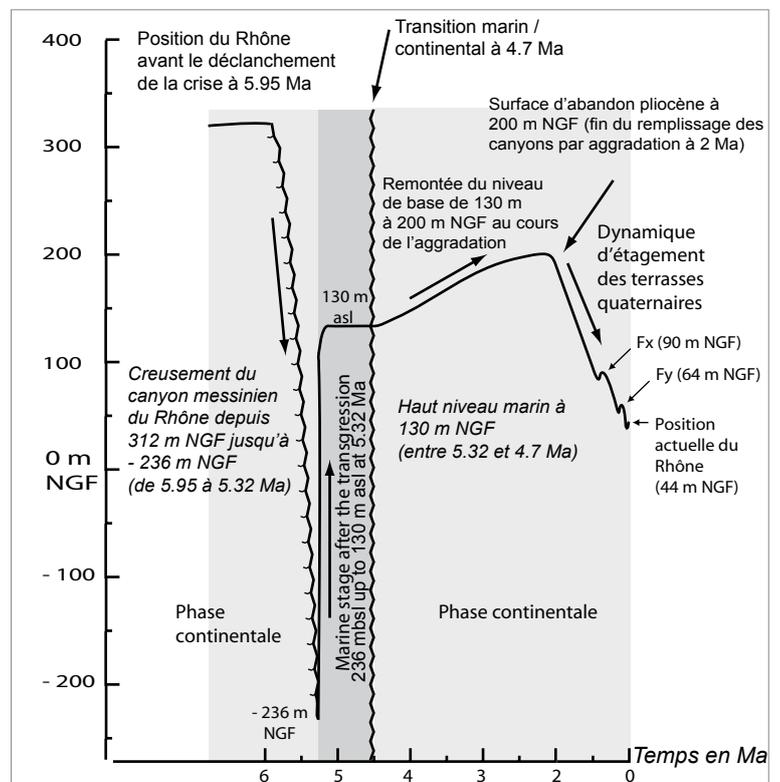


Figure 4 - Courbe d'évolution du niveau de base en moyenne vallée du Rhône depuis 6 Ma [d'après Mocochain, Clauzon *et al.*, 2006b].

Reconstruction of the Rhône base-level evolution since 6 Ma based on the Messinian-Pliocene benchmark levels [after Mocochain, Clauzon *et al.*, 2006b].

- le déclenchement de la crise de salinité à 5,95 Ma provoque l'incision des canyons du Rhône et de l'Ardèche qui prend fin à 5,32 Ma aux altitudes de leur talwegs respectifs de -236 m NGF pour le Rhône et 50 m NGF au maximum pour l'Ardèche ;
- la remise en eau de la Méditerranée fait remonter brutalement le niveau de base jusqu'à 70 m NGF. Ce niveau demeure stable jusqu'à l'arrivée du *Gilbert-delta* du Rhône marquant le début de l'aggradation des rivières vers 4,7 Ma ; la transition marin / continental est actuellement située à la cote 130 m NGF portée en altitude par une surrection post-sédimentaire de 70 m ;
- durant le Pliocène, l'aggradation des rivières exhausse progressivement le niveau de base régional jusqu'à 200 m d'altitude entre 4,7 Ma et 2 Ma ;
- enfin au Pléistocène, les rivières ré-incident leurs vallées par paliers en exhument le remblaiement pliocène tout en déposant les terrasses étagées entre 200 m et 50 m d'altitude.

II- Géomorphologie de la bordure occidentale du plateau de Saint-Remèze

II. A- Les surfaces d'aplanissement formant le plateau de Saint-Remèze

Le bâti structural urgonien est plissé en un large brachyantoclinal. Il présente une morphologie typique de plateau calcaire qui résulte intégralement du travail de l'érosion. Quatre générations de surfaces d'aplanissement maintiennent les grands traits horizontaux du paysage [Mocochain, Clauzon *et al.*, 2006b].

La surface S0 est la plus ancienne, elle est basculée vers l'est et forme la retombée du plateau de Saint-Remèze sur la vallée du Rhône et sur la terminaison du bassin d'avant pays d'âge Miocène (figure 2). Sa position en talus favorise son démantèlement par le ruissellement. Malgré son exposition à l'érosion, on retrouve, sur son extrémité orientale des lambeaux de molasses du Miocène inférieur. Ces molasses (dépôts marins) fossilisent une ancienne surface de transgression périphérique au bassin d'avant-pays et gauchie sous l'effet de la subsidence.

La surface S1 forme la plus grande partie du plateau de Saint-Remèze à une altitude moyenne de 400 m (figure 2). Contrairement à la précédente (S0), la surface S1 n'a livré aucun dépôt en relation avec

sa formation. L'omniprésence de la surface S1 en périphérie immédiate des bassins d'avant-pays provençaux [Besson, 2005] évoque une *wave cut platform* (surface d'abrasion marine) tant son développement est important et sa planéité remarquable. Cette surface (S1) forme avec la précédente (S0) un système de surfaces à facettes [Baulig, 1956] dont la genèse est contrôlée par la géodynamique du bassin d'avant-pays [Mocochain, Clauzon *et al.*, 2006b ; figure 2].

La surface S2 est plus réduite, elle s'emboîte dans la précédente et borde la partie médiane du canyon de l'Ardèche, principalement sur sa rive gauche (figure 2). Cette surface est chronologiquement calée par de récents travaux sur le karst et l'endokarst environnant, il s'agit de la surface d'abandon pré-évaporitique [Martini, 2005 ; Mocochain, Clauzon *et al.*, 2006b]. Cette surface d'abandon est actuellement dégradée et se situe entre 300 et 330 m d'altitude. La genèse de cette surface d'aplanissement résulte du travail de l'Ardèche. En effet, son développement est restreint aux abords immédiats du canyon de l'Ardèche. L'examen de la surface S2 a révélé la présence de formations fluviatiles très éparses exclusivement composées de galets de quartz et quartzites. Ces formations fluviatiles dégradées représentent le stade ultime des processus d'altération ayant affecté le spectre pétrographique des alluvions de l'Ardèche.

La surface S3 est d'extension réduite et se développe seulement dans les parties amont et aval du canyon de l'Ardèche (figure 2). Cette surface S3 prolonge latéralement les *top-set beds* du remblaiement pliocène des rias du Rhône et de l'Ardèche. En amont, vers Vallon-Pont-d'Arc, la surface S3 s'observe de part et d'autre du canyon de l'Ardèche, elle recoupe l'assise urgonienne par un aplanissement bien identifié à 260 m d'altitude. En aval du canyon de l'Ardèche, la surface S3 se développe autour de 220 m d'altitude. La différence d'altitude entre la surface amont et la surface aval du canyon de l'Ardèche est due au dénivelé parcouru par la rivière, par ailleurs égal au dénivelé actuel entre Vallon-Pont-d'Arc et l'embouchure du canyon. La surface S3 prolonge et raccorde la surface d'abandon pliocène au reste du plateau, ce qui lui donne valeur de niveau repère.

II. B- Les vallées de l'Ardèche autour de Vallon-Pont-d'Arc

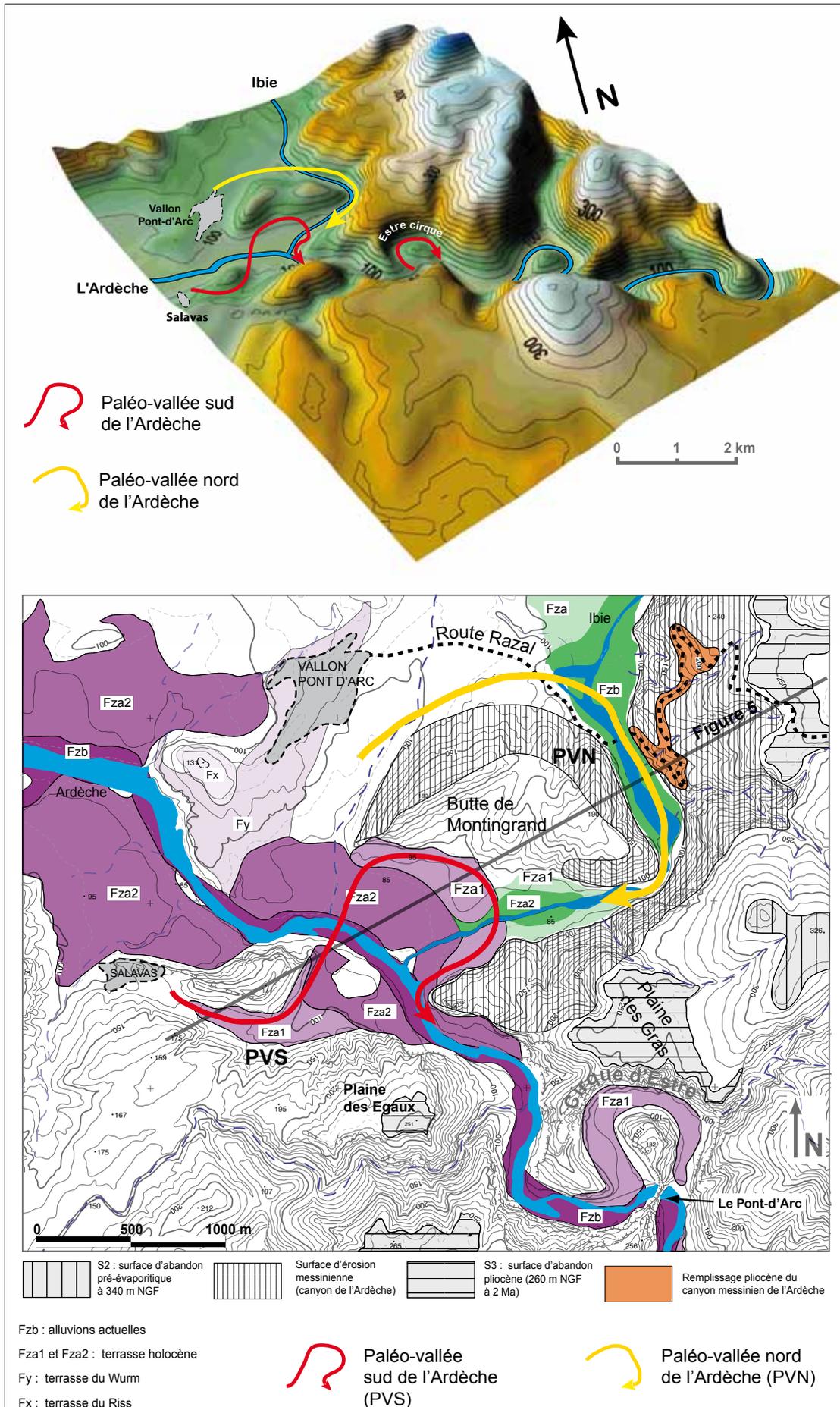
Autour de Vallon-Pont-d'Arc, l'étude des formes des versants et la cartographie des formations fluviatiles permettent d'identifier trois vallées différentes de l'Ardèche. Il s'agit : de la vallée actuelle de l'Ardèche, d'une vallée morte incisée en défilé au sud et d'un paléo-canyon au nord, actuellement occupé par son affluent, l'Ibie (figure 5).

La vallée actuelle de l'Ardèche présente un tracé rectiligne d'orientation NO-SE qui recoupe perpendiculairement les structures géologiques selon un tracé inadapté.

La seconde vallée, que nous nommerons paléo-vallée sud, correspond à une succession de deux méandres abandonnés par la rivière, de part et d'autre de sa vallée actuelle (figure 5). Le premier méandre est une vallée morte ayant une morphologie de défilé. Cette vallée est profonde d'une soixantaine de mètres et se situe immédiatement au sud de l'actuelle vallée de l'Ardèche. Le village de Salavas marque l'entrée de ce premier méandre incisé entre les grès du Crétacé et les calcaires à faciès urgonien (figures 5 et 6). Cette paléo-vallée sud se prolonge vers le nord et décrit un ample méandre qui a façonné le flanc sud de la colline de Montingrand. La morphologie de cette dernière est clairement identifiable sur la carte topographique et sur les photos aériennes ; elle est aussi caractérisée par ses alluvions qui ont été cartographiées sous le nom de terrasse *Fza1* [Pascal, Lafarge *et al.*, 1989 ; figures 5 et 6].

La troisième vallée de l'Ardèche, que nous nommerons paléo-vallée nord (PVN), se situe plus au nord-est. Elle forme un court canyon entre la colline de Montingrand en rive droite et la retombée du plateau de Saint-Remèze en rive gauche. Ce canyon incisé dans le bâti urgonien est occupé par l'Ibie, juste en amont de sa confluence avec l'Ardèche (figure 5). Un remplissage alluvial d'origine cévenole est piégé dans un paléokarst qui est visible en bordure de la route du Razal, c'est-à-dire sur le flanc gauche de cette dernière. La nature allochtone du remplissage alluvial permet d'attribuer son creusement à l'Ardèche et non à l'Ibie qui occupe actuellement cette vallée.

Le paléokarst de la route du Razal (figure 6) se développe sur des failles du réseau cévenol apparues durant la phase tardi-hercynienne et réactivées lors des phases tectoniques du Mésozoïque et du Cénozoïque [Bellier, Vergelay *et al.*, 1987]. Ces



failles ont localement été élargies par les processus de spéléogénèse dits hypogènes (i.e., attribués à des remontées d'eaux thermominérales) sur des largeurs décimétriques à métriques. Les parois du paléokarst sont tapissées de rhomboédres de calcite recouverts d'un plancher stalagmitique qui, par endroit, colmate totalement le conduit karstique. Selon son exposition à l'érosion de surface, le paléokarst et son concrétionnement peuvent avoir été bien préservés ou détruits par la cryptocorrosion. Il est possible d'observer les paléokarsts et les remplissages fluviaux de la paléo-Ardèche le long de la route du Razal (de Vallon-Pont-d'Arc à Saint-Remèze ; figures 5 et 6), depuis le fond de la paléo-vallée nord (vers 100 m) jusqu'à 215 m d'altitude. Hormis le remplissage chimique contemporain de sa genèse hypogène, ce paléokarst est colmaté par des remplissages allochtones provenant de la surface. Il présente trois faciès : le premier est à dominante d'argile rouge appelé *terra rossa*. Ces argiles proviennent de l'altération d'anciennes couvertures alluviales et de sols rubéfiés généralement attribués aux périodes interglaciaires du Pléistocène [Blanc, 1964]. Un second faciès est composé de galets de toutes tailles, dont les plus gros dépassent les 30 cm de grand axe. Le spectre pétrographique du remplissage se compose principalement de galets de quartz, de basalte, de granites, de

gneiss, de micaschistes et de quartzites micacés. Ces alluvions grossières ont la même composition pétrographique que les terrasses de l'Ardèche. Les travaux d'élargissement de la route ont dégagé par endroit ce remplissage sur plusieurs mètres de hauteur (figure 6). Au sommet de la coupe, sous la surface, le matériel est très altéré, il ne reste que les galets siliceux (essentiellement les quartz) qui sont pris dans la *terra rossa*. Cet horizon fait progressivement place à une formation de moins en moins altérée jusqu'à restituer en pied de coupe une grande partie du spectre pétrographique de l'Ardèche, les carbonates sont néanmoins absents et les granites sont à l'état de reliques (photo 1). Ce faciès cristallin du remplissage s'observe depuis le fond du canyon (100 m) jusqu'à 165 m d'altitude, soit sur un dénivelé de 65 m. Au-delà, de 165 m et jusqu'à 215 m, le matériel alluvial se présente alors sous la forme de petites dragées de quartz (entre 0,5 et 2 cm) faiblement émoussées et prises dans une matrice argilo-limoneuse de couleur beige dont l'origine pourrait correspondre à l'altération du reste du matériel alluvial (basalte, granite, micaschiste...). On observe dans ce remplissage remanié quelques galets de quartz de petite taille (max. 10 cm) qui sont restés intacts. Ce remplissage est probablement une évolution très dégradée du précédent faciès.

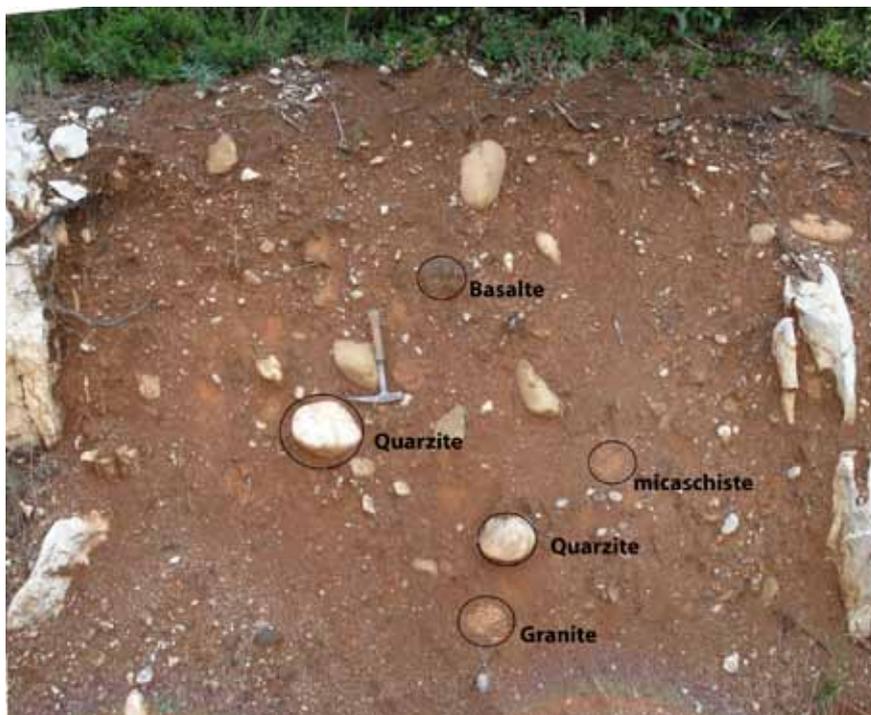


Photo 1 - Détail des alluvions de l'Ardèche en partie altérées et piégées dans des paléo-karsts bordant le flanc de la paléo-vallée nord (route du Razal ; cliché L. Mocochain).

The weathered infilling of the paleokarst along Razal road, showing allochthonous fluvial material from the Pliocene Ardèche, mixed with karstic terra-rossa (photo L. Mocochain).

Nous avons constaté que des récents travaux d'élargissement de la route ont par endroits fait totalement disparaître le paléokarst et son remplissage. Ce remplissage karstique d'origine fluviale doit être de faible épaisseur et doit correspondre à un dépôt de subsurface. Ces observations permettent de déduire que le versant actuel de la paléo-vallée nord correspond en grande partie au versant originel de la vallée (figure 5). La nature pétrographique des alluvions piégées sur le flanc de cette dernière permet d'attribuer son creusement, non pas à l'Ibie qui l'occupe actuellement, mais à l'Ardèche.

III- Chronologie et dynamique de mise en place des vallées de l'Ardèche autour de Vallon-Pont-d'Arc

III. A- La paléo-vallée sud et la vallée actuelle de l'Ardèche

L'existence de trois vallées de l'Ardèche aux environs de Vallon-Pont-d'Arc pose la question du mécanisme de défluviation responsable du déplacement de l'Ardèche d'une vallée à l'autre. Le processus d'auto-capture par recoupement de méandre permet d'expliquer l'abandon du premier méandre de la paléo-vallée sud au profit de son tracé actuel (figure 5). Ce recoupement achevé, la rivière a ensuite migré vers le sud par avulsion, mécanisme responsable de l'abandon du second méandre (figure 5). Cette interprétation s'appuie notamment sur la cartographie des terrasses notées *Fza1* et *Fza2* de la carte géologique et est reportée sur la figure 5 ; le dépôt *Fza1* correspond à la position de l'Ardèche dans la paléo-vallée sud tandis que le dépôt *Fza2* correspond à la position de l'Ardèche après son auto-capture. Ces deux terrasses successives marquent l'évolution en deux temps de cette auto-capture, ce qui est par ailleurs conforme à la dynamique d'étagement des terrasses pléistocènes. Cette évolution implique que le creusement de la paléo-vallée nord est antérieur au creusement de la paléo-vallée sud (figure 7).

III. B- La paléo-vallée nord

Le fond de la paléo-vallée nord (à 100 m NGF), pourtant plus ancien, est en contre-bas du fond de la paléo-vallée sud (à 130 m NGF). Cette observation spatiale signifie que le processus de défluviation responsable du passage d'une vallée à l'autre fait obligatoirement suite à une phase de remblaiement de la paléo-vallée nord.

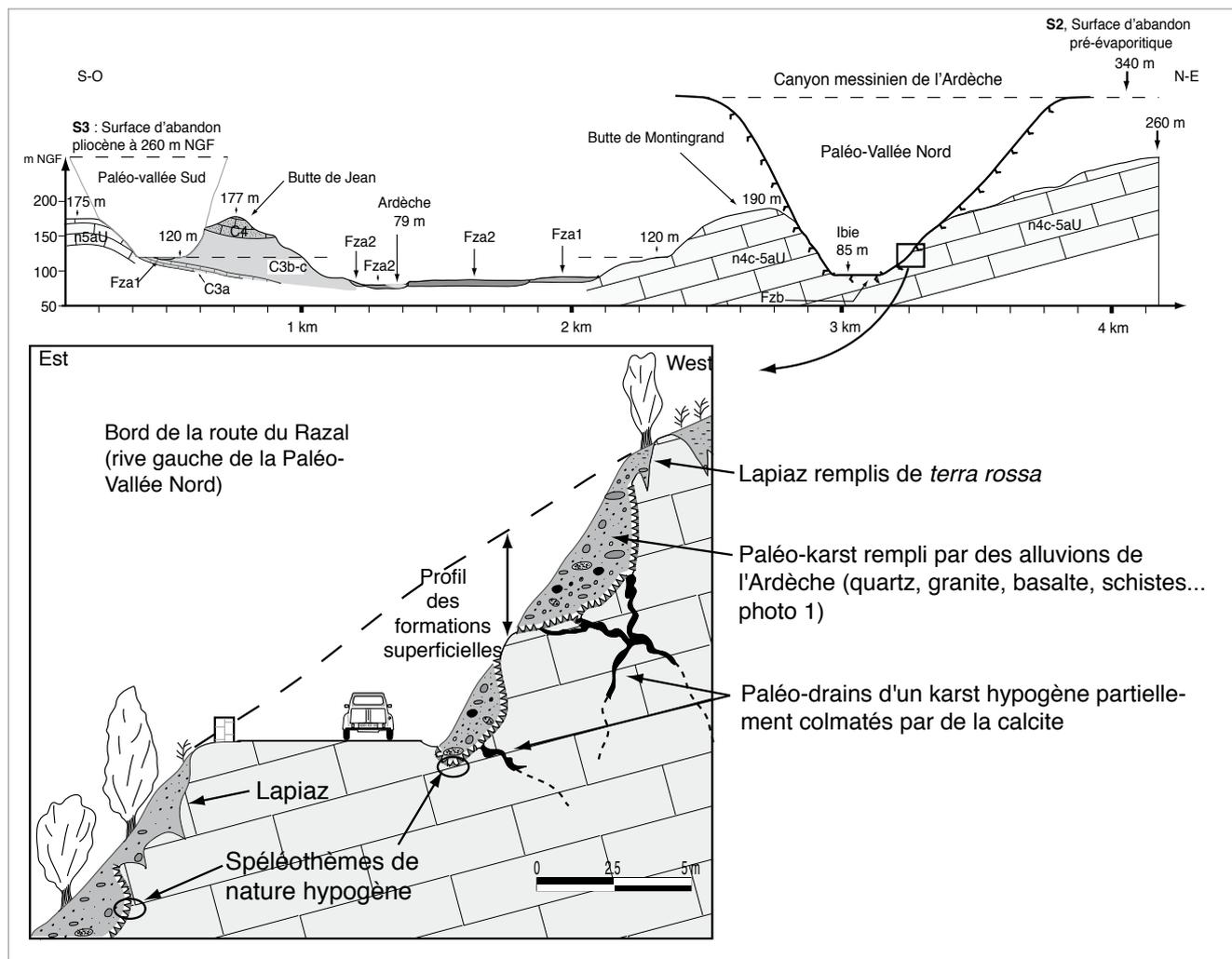


Figure 6a - Coupe géologique (repérée sur la figure 5) à travers la paléo-vallée nord (PVN), la paléo-vallée sud (PVS) et la vallée actuelle de l'Ardèche. 6 b : détail du flanc rive gauche de la PVN et de son remplissage.

6a : Geological cross-section (located in figure 5) across the North Paleovalley (NPV), the South Paleovalley (SPV) and the present Ardèche valley. 6b: Detail of the left flank of the NPV and its paleokarst filled with fluvial material.

L'observation en continu sur 115 m de dénivellation des formations fluviales piégées dans les paléokarsts de la route du Razal ne peut pas être interprétée comme le dépôt d'une terrasse fluviale pleistocène qui ne dépasse jamais les 20 mètres d'épaisseur dans la région [Labrousse, 1977]. Ces alluvions ne sont donc pas corrélatives à l'incision de la paléo-vallée nord, mais pourraient plutôt correspondre à son comblement par aggradation de l'Ardèche.

Cette interprétation suppose que le creusement successif des deux vallées par l'Ardèche est séparé par une importante phase de remblaiement. Cette phase de remblaiement aurait provoqué l'épigénie d'aggradation responsable de la migration de l'Ardèche de la paléo-vallée nord vers la paléo-vallée sud (figure 7).

Le mécanisme d'épigénie d'aggradation correspond à un alluvionnement général des rivières qui permet aux

cours d'eau de s'exhausser au-dessus du fond de leur vallée et même au-dessus des interfluvies, pouvant ainsi aboutir à une modification de leur tracé. Ce mécanisme de défluviation, sous-entendu par H. Baulig [1928] fut explicité et largement détaillé par G. Clauzon qui l'associa au remblaiement des canyons messiniens au cours du Pliocène [Clauzon, 1996 ; Clauzon et Beaudoin, 1994 ; Clauzon, Rubino *et al.*, 1995 ; Clauzon et Rubino, 2001 ; Clauzon, Fleury *et al.*, 2004]. Ce mécanisme permet d'expliquer l'identification quasi-systématique de canyons messiniens fossiles qui ont été totalement colmatés par le remblaiement fluvial pliocène. L'épigénie d'aggradation a provoqué l'abandon de ces canyons fossiles qui, par incision des vallées au Pléistocène, se trouvent en inversion de relief et en position d'interfluve par rapport aux vallées actuelles.

L'épigénie d'aggradation a permis à l'Ardèche d'abandonner sa vallée messinienne (paléo-vallée nord) par remblaiement puis par déplacement latéral vers le sud. Au cours d'une seconde phase d'incision, l'Ardèche a pu creuser sa vallée sud en s'encaissant sur place (figure 8). L'affluent de l'Ardèche, l'Ibie, devait alors se trouver à la verticale de la paléo-vallée nord à la fin de cette phase de remblaiement, avant de l'occuper par exhumation au cours du Pléistocène (figure 7).

Les deux défluviations observées autour de Vallon-Pont-d'Arc permettent de proposer l'interprétation suivante : le déclenchement de la crise de salinité provoque l'incision de la paléo-vallée nord de l'Ardèche depuis la position de la surface d'abandon pré-évaporitique [360 m NGF ; Martini, 2005] jusqu'à la profondeur de 100 m NGF. Au cours du Pliocène, l'Ardèche, sous contrôle de l'aggradation du Rhône, entame

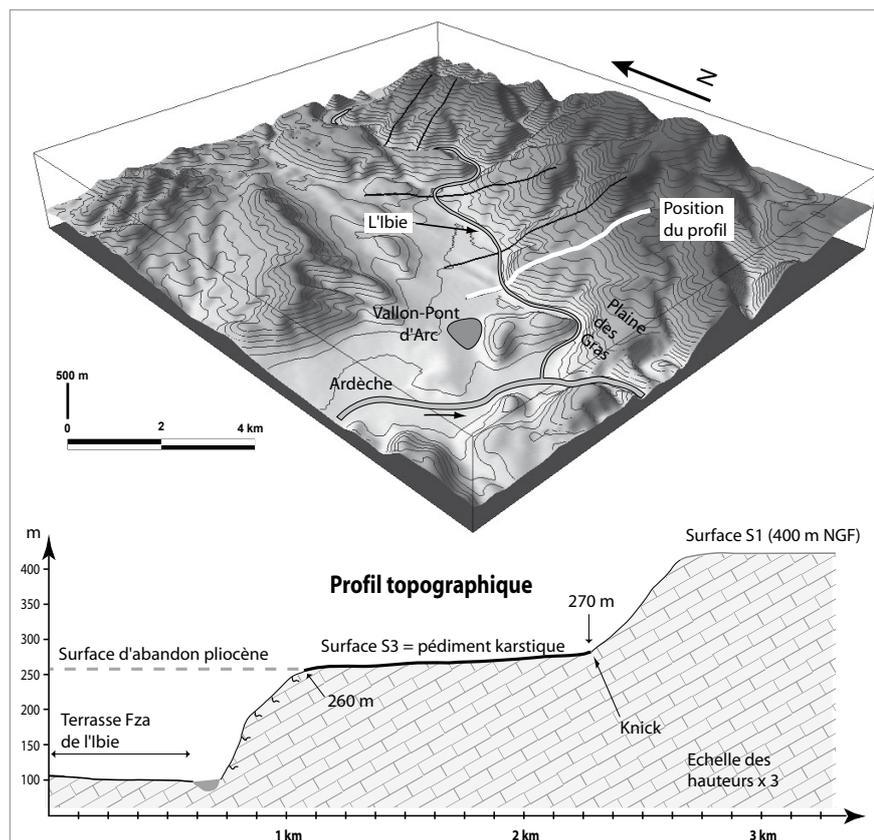


Figure 8 - Coupe topographique de la surface d'aplanissement S3 formant le pédiment karstique le long de la vallée de l'Ibie.

Topographical section of the low gradient surface S3 along the Ibie valley.

le même processus de remblaiement de son canyon comme l'atteste la présence des ses alluvions piégées dans les paléokarsts de la route du Razal (figure 6). L'aggradation a atteint 260 m NGF, position de la surface d'abandon Pliocène dans le secteur Vallon-Pont-d'Arc [Mocochain, Clauzon *et al.*, 2006b]. Une fois sortie de son canyon messinien (paléo-vallée nord), l'Ardèche qui coule sur la surface d'abandon Pliocène a ensuite migré latéralement vers le sud par avulsion. Cette migration latérale a permis à l'Ardèche de creuser une seconde vallée au cours du Pléistocène (la paléo-vallée sud), en permettant à l'Ibie d'occuper la paléo-vallée nord (figure 7).

III. C- Le pédiment karstique de Vallon-Pont-d'Arc

Autour de Vallon-Pont-d'Arc, la surface d'abandon pliocène se prolonge dans le paysage par la surface d'aplanissement S3 (figure 2). Cette surface se situe à l'entrée du canyon de l'Ardèche en rive droite au lieu-dit « Les Egaux » et en rive gauche sur la plaine des Gras (figure 5). L'aplanissement de la plaine des Gras est peu étendu (1.5 km²), il se termine par un *knick* qui marque la transition avec le talus des hautes surfaces (S1

et S2). Le profil transversal de cette surface d'aplanissement prolongée par le talus des hautes surfaces évoque une morphologie de pédiment bien visible dans le paysage (figure 8). Ce pédiment couvre une grande superficie le long de la rive gauche de la vallée de l'Ibie, de telle sorte que c'est toute la bordure occidentale du plateau qui est affectée (figure 2). Cette morphologie présente toujours le même profil transversal (figure 8). Le versant abrupt ou à forte pente de la vallée de l'Ibie se prolonge, par rupture de pente très nette marquant la transition avec la surface S3 qui présente une légère pente. Cette surface s'interrompt ensuite par un *knick* marquant la base d'un versant dont la pente est remarquablement régulière (figure 8).

Dans le paysage, ce pédiment se raccorde et prolonge la surface d'abandon pliocène. Le niveau repère de la surface d'abandon formait donc le niveau de base d'une morphogénèse très active qui a redessiné les versants orientaux et occidentaux du plateau de Saint-Remèze. La formation de ce pédiment résulte des mécanismes d'érosion de surface, principalement celui de la corrosion [Corbel, 1963; Nicod, 1985]. Dans les conditions actuelles, une telle morphogénèse serait impossible, car l'infiltration des eaux de

surface arrêterait toute morphogénèse externe selon le principe d'immunité karstique. Le développement du pédiment en bordure de la vallée de l'Ibie (S3) n'a été possible que par dysfonctionnement, voire un blocage, de l'endokarst à la fin du Pliocène suite à l'aggradation de l'Ardèche et de l'Ibie. En effet, cet exhaussement du niveau des rivières s'est traduit dans le karst par une structuration *per ascensum* de leurs exutoires, sous forme de puits-cheminées [Mocochain, Clauzon *et al.*, 2006b]. Cette adaptation particulière reste possible tant qu'il existe un gradient topographique important entre la zone d'infiltration des eaux et le point d'émergence du drainage karstique. Au cours du Pliocène, l'exhaussement de l'Ardèche par aggradation a diminué ce gradient au point de le rendre insuffisant, provoquant un ralentissement puis un arrêt de la spéléogénèse et une paralysie de l'endokarst au profit de la réactivation de la morphogénèse de surface. Par ailleurs, la formation du pédiment et son caractère très développé dans le paysage n'ont pu se réaliser que sous l'effet d'une stabilité prolongée de l'Ardèche. Cette relative stabilité de la rivière en haut niveau est sans doute la conséquence de l'allongement du profil en long des rivières aboutissant à leur équilibre et arrêtant progressivement l'aggradation.

Dans la vallée de l'Ardèche, on constate enfin qu'il existe un zonage entre les pédiments et l'étage le plus haut de l'endokarst. Dans la partie médiane du canyon de l'Ardèche, il n'existe pas de pédiment, mais on observe le développement d'un endokarst en rapport avec la surface d'abandon pliocène. En revanche, l'examen des zones où se développe le pédiment n'a pas révélé de réseaux spéléologiques proches de la surface d'abandon pliocène. Il semblerait donc que le développement de l'un empêche le développement de l'autre.

Conclusion

En moyenne vallée du Rhône, cinq conditions sont réunies pour faire du plateau de Saint-Remèze un site méditerranéen de référence : 1/ d'un substratum calcaire 2/ proche de la Méditerranée, 3/ entaillé par le canyon messinien du Rhône, 4/ intensément karstifié en surface et en profondeur et 5/ bordé, sur une même verticale, des quatre niveaux repères de la crise messinienne.

Les vallées abandonnées de l'Ardèche autour de Vallon-Pont-d'Arc révèlent, par leur morphologie et la nature de

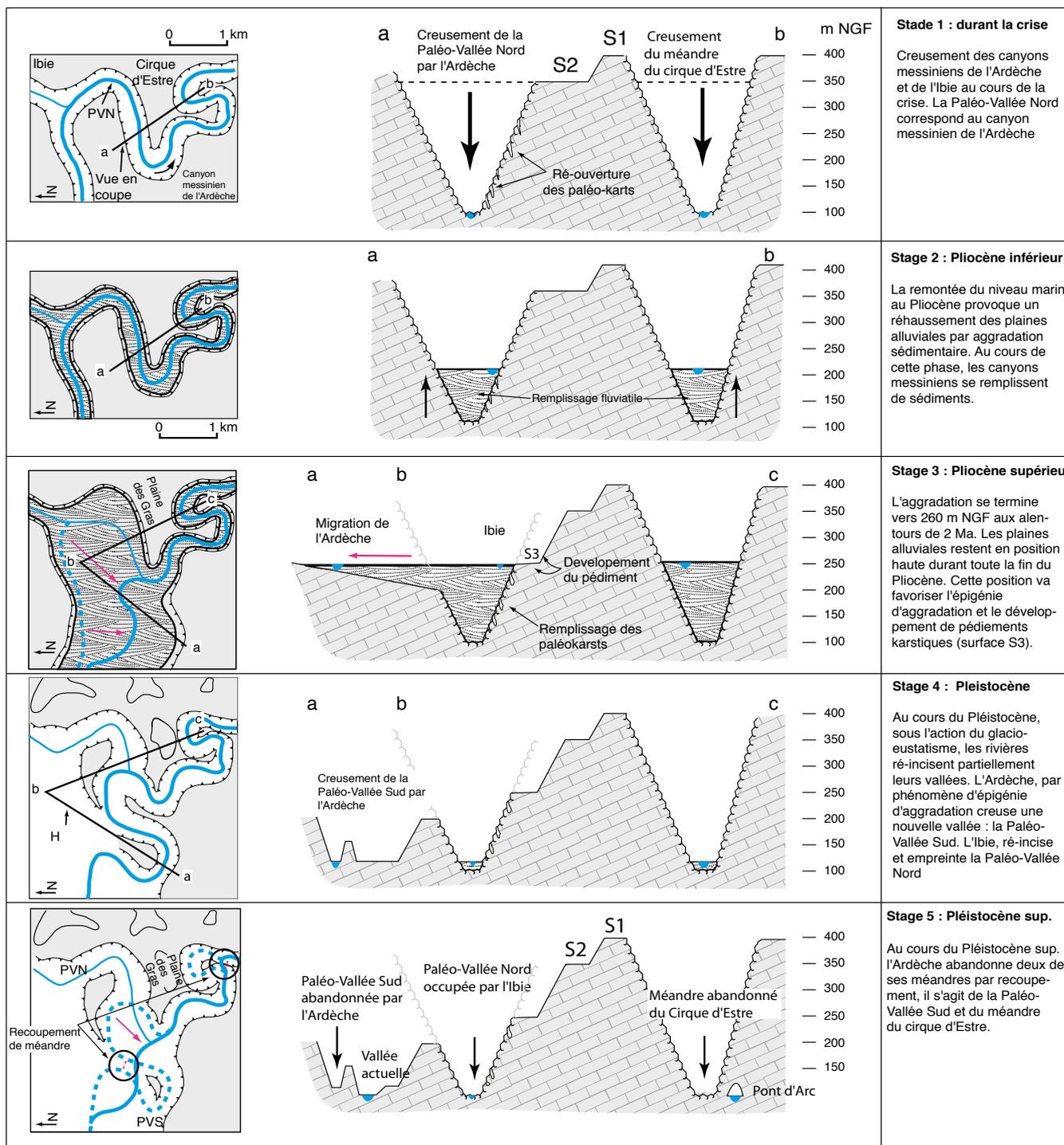


Figure 7 - Reconstitution de l'évolution paléogéographique de la zone de confluence Ardèche-Ibie depuis 6 Ma.

Reconstruction of the paleogeographic evolution of the Ardèche-Ibie confluence for the last 6 Ma. The main part of the Ardèche evolution occurs at the left side of the cross-section, in a wide alluvial plain. Horizontal distances are not to scale.

leurs alluvions, un diachronisme dans leur creusement lié à l'important remblaiement pliocène. Le canyon messinien de l'Ardèche a pu être reconnu, révélant la profondeur d'incision de la rivière durant la crise messinienne.

La dynamique et l'amplitude de l'aggradation de la rivière au Pliocène furent responsables de la paralysie du

drainage karstique, ce qui a favorisé une reprise de la morphogenèse de surface par le développement de pédiments karstiques remodelant les bordures du plateau de Saint-Remèze.

Remerciements

Ce travail est réalisé dans le cadre d'une thèse préparée au CEREGE (Aix-

en-Provence, France). Nous tenons à remercier M. Hamelin, ancien directeur du CEREGE, pour le soutien logistique et les aides à la publication apportées par notre laboratoire. Merci à nos amis spéléologues et collègues qui nous ont accompagnés sur le terrain, notamment MM. Olivier Peyronel et Frédéric Têtu.

Bibliographie

- AGUILAR J.-P., CLAUZON G. et MICHAUX J. - 1989 - La limite Mio-Pliocène dans le Sud de la France d'après les faunes de rongeurs : état de la question et remarques sur les datations à l'aide de rongeurs. *Bill. Soc. Paleontol. Ital., Bologna, vol. 28, n°2-3*, p. 137-145.
- BALLESIO R. - 1972 - Etude stratigraphique du Pliocène rhodanien. *Documents du Laboratoire Géologique de la Faculté des Sciences (Lyon), n° 53*, 333 p.
- BAULIG H. - 1928 - Le plateau central de la France et sa bordure méditerranéenne. *Armand Colin, Paris*, 591 p.
- BAULIG H. - 1956 - Vocabulaire franco-anglo-allemand de géomorphologie. *Edition Ophrys, Paris*, 229 p.
- BELLIER O. et VERGELEY P. - 1987 - Etats de contraintes et tectogenèse cénozoïque du plateau calcaire de basse Ardèche (France). *Comptes rendus de l'Académie des Sciences de Paris, vol. 305*, p. 1379-1382.
- BELLEVILLE L. - 1985 - Hydrologie karstique : géométrie, fonctionnement et karstogenèse des systèmes karstiques des gorges de l'Ardèche. *Thèse de l'Université des Sciences et de Médecine de Grenoble*, 228 p.
- BESSON D. - 2005 - Architecture du bassin rhodano-provençal miocène (Alpes, S-E France). Relations entre déformation, physiographie et sédimentation dans un bassin molassique d'avant-pays. *Thèse de l'Ecole des Mines de Paris*, 358 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 de bassin d'avant pays rhodano-provençal. *Livret guide de l'excursion Strati 2002*, 162 p.
- BLANC J.-J. - 1964 - Recherches sur les sédiments argileux des grottes dans le Sud-Est de la France. *Bulletin du Muséum d'Anthropologie et de Préhistoire de Monaco, n° 11*, p. 5-36.
- BLANC J.-J. - 1976 - Recherches géologiques à la grotte de Saint-Marcel d'Ardèche (Ardèche, France). *Géologie Méditerranéenne, vol. III, n° 4*, p. 227-236.
- BLANC P.L. - 2002 - The opening of the Plio-Quaternary Gibraltar Strait: assessing the size of a cataclysm. *Geodinamica Acta, vol. 15*, p. 303-317.
- BONNET A. - 1963 - Nouvel essai de corrélation des terrasses rhodaniennes. *Bulletin de la Société Géologique de France, t. 7, vol. V*, p. 543-554.
- CAMUS H. - 2003 - Vallées et réseaux karstiques de la bordure carbonatée sud-cénévole : relations avec la surrection, le volcanisme et les paléoclimats. *Thèse de l'Université de Bordeaux III, France*, 675 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, t. 24, vol. 3*, p. 597-610.
- CLAUZON G. - 1996 - Limites de séquences et évolution géodynamique. *Géomorphologie n° 1*, p. 3-22.
- CLAUZON, G. - 1999 - L'impact des variations eustatiques du bassin de la Méditerranée occidentale sur l'orogène alpin depuis 20 Ma. *Actes du colloque : la montagne méditerranéenne. Etude de géographie physique, Travaux 1999, XXVIII*, p. 33-40.
- CLAUZON G., MANDIER P., AGUILAR J.-P., DELANNOY, J.-J., GUENDON, J.-L., KLEIN C., MICHAUX J., RUBINO J.-L. et VAUDOURE J. - 1990 - Genèse et évolution du piémont néogène subalpin du Bas-Dauphiné. *Livret guide excursion préforum du 3° Forum National de Géomorphologie, Aix en Provence, Travaux URA 903 du CNRS, vol. XIX*, 71 p.
- CLAUZON G. et BEAUDOIN B. - 1994 - La mémoire du fleuve. Chronique du Var depuis 6 Ma. *Film VHS ANDRA production*, 26'.
- 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'Association des Sédimentologistes Français n° 23*, p. 145-222.
- CLAUZON G., RUBINO J.-L. et SUC J.-P. - 1996 - Les rias pliocènes du Var et de Ligurie : comblement sédimentaire et évolution géodynamique. *Livret-guide de l'excursion commune du Groupe Français d'Etude du Néogène et du Groupe Français de Géomorphologie, 6 - 8 septembre 1996*, 111 p.
- CLAUZON G. et RUBINO J.-L. - 2001 - La crise de salinité messinienne et les Gilbert-deltas pliocènes, marqueurs de l'évolution géodynamique du Roussillon et du Conflent. *Livret guide de l'excursion GDR-Marges Atelier messinien*, 24 p.
- CLAUZON G., FLEURY J. et SCHLUPP A. - 2004 - Evolution géodynamique du Bas-Rhône (section Orange/Beaucaire) depuis 6 Ma. Apport de la méthode des niveaux repères messiniens ainsi que des terrasses quaternaires intégrés à l'outil SIG. *Rapport CEA/CEREGE*, 90 p.
- CLOTTE J. coord. - 2001 - La grotte Chauvet l'art des origines. *Seuil édit., Paris*, 226 p.
- CORBEL J. - 1963 - Pédiments d'Arizona. *Mémoires et Documents du CNRS, vol. IX*, p. 33-95.
- CORNET C. - 1988 - Evolution géomorphologique et néo-tectonique du Vivarais calcaire au Pontien à l'infra-Quaternaire. *Géologie de la France n° 4*, p. 55-66.
- DEBARD E. - 1997 - Les remplissages karstiques du Bas-Vivarais : karstogenèse, sédimentogenèse et archéologie. *Quaternaire n° 8*, p. 305-317.
- DELANNOY 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 n° 12*, p. 235-248.
- DELANNOY J.-J., PERRETTE Y., DEBARD E., FERRIER C., KERVAZO B., PERROUX A.-S., JAILLET S. et QUINIF Y. - 2004 - Intérêt de l'approche morphogénique pour la compréhension globale d'une grotte à haute valeur patrimoniale : la grotte Chauvet (Ardèche, France). *Karstologia n° 44*, p. 25-42.
- DEMARQ G. - 1960 - Observations à propos de la série pliocène du sondage de Pierrelatte (Drôme). *Comptes rendus de l'Académie des Sciences de Paris n° 250*, p. 4013-4015.
- DENIZOT G. - 1934 - Note sur l'extension des cailloutis pliocènes dans le Sud-Est de la France. *Bulletin de la Société Géologique de France, t. 5, vol. IV*, p. 613-647.
- DENIZOT G. - 1952 - Le Pliocène dans la vallée du Rhône. *Revue de Géographie de Lyon, t. 27, n° 4*, p. 327-357.
- FONTANNES F. - 1882 - Note sur l'extension de la faune de la mer pliocène dans le Sud-Est de la France. *Bulletin de la Société Géologique de France, t. 11, n° 3*, p. 103-141.

- HAQ B.U., HARDENBOL J. and VAIL P. - 1987 - Chronology of fluctuating sea levels since the Triassic (250 million years ago to present). *Science*, vol. 235, p. 1156-1167.
- HSÜ K.J., CITA M.B. and RYAN W.B.F. - 1973 - The origin of the Mediterranean evaporites. Initial reports of the deep sea drilling project. D.C., U.S. Government Printing Office, Washington, t. XIII, part. 2, p. 1203-1231.
- LABROUSSE B. - 1977 - Altération des terrasses anciennes de l'Ardèche. *Thèse de l'Université de Marseille Saint-Charles, France*, 125 p.
- LOFI J., GORINI C., BERNE S., CLAUZON G., DOS REISE T., RYAN W.B.F. and STECKLER M.S. - 2005 - Erosional processes and paleo-environmental changes in the Western Gulf of Lions (SW France) during the Messinian Salinity Crisis. *Marine Geology* n° 217, p. 1-30.
- 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, p. 1-18.
- MOCOCHAIN L. - 2002 - Utilisation des marqueurs chronostratigraphiques miocènes et pliocènes pour l'étude karstologique et hydrogéologique du Bas-Vivarais (Ardèche, France). *Mémoire de DEA, Université de Provence, Aix-en-Provence*, 43 p.
- MOCOCHAIN L., CLAUZON G. et BIGOT J.-Y. - 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 peri-Mediterranean karst during the Messinian and the Pliocene: evidence from the Ardèche and Rhône Valley systems canyons, Southern France. *Sedimentary Geology* n° 189-189, p. 219-233.
- MOCOCHAIN L., AUDRA P., CLAUZON G., BELLIER O., BIGOT J.-Y., PARIZE O. and MONTEIL P. - 2009 - The effect of river dynamics induced by the Messinian Salinity Crisis on karst landscape and caves: example of the Lower Ardèche river (mid Rhône valley). *Geomorphology* n° 106, p. 46-61.
- 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.
- NICOD J. - 1985 - Les cônes rocheux en Provence et dans quelques régions de comparaison. Rapports avec les surfaces de corrosion des plojés. *Mémoires et Documents de Géographie, CNRS, Paris*, p. 107-117.
- PASCAL M., LAFARGE D., CHEDHOMME J. et GLINTZBAECKEL C. - 1989 - Carte géologique de la France (1/50 000^e), feuille n° 889, Bourg-Saint-Andéol. *BRGM, Orléans*, 67 p., 1 carte h.-t.