



HAL
open science

Evolution karstique de l'anticlinal de Saint Remèze durant le Paléogène (Ardèche - France)

Joël Jolivet, Steve Peuble, Frédéric Paron, Frédéric Gallice, Erik van den Broeck,
Didier Graillet

► To cite this version:

Joël Jolivet, Steve Peuble, Frédéric Paron, Frédéric Gallice, Erik van den Broeck, et al.. Evolution karstique de l'anticlinal de Saint Remèze durant le Paléogène (Ardèche - France). 2023. <emse-04021957>

HAL Id: emse-04021957

<https://hal-emse.ccsd.cnrs.fr/emse-04021957v1>

Preprint submitted on 9 Mar 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization

Evolution karstique de l'anticlinal de Saint Remèze durant le Paléogène (Ardèche - France)

JOLIVET Joël ⁽¹⁾, PEUBLE Steve ⁽²⁾, PARAN Frédéric ⁽²⁾, GALLICE Frédéric ⁽²⁾, VAN DEN BROECK Erik ⁽¹⁾, GRAILLOT Didier ⁽²⁾

⁽¹⁾ Association Nature-Témoin - 30760 Issirac France

⁽²⁾ Mines Saint-Etienne, Univ. LYON, CNRS, Univ. Jean Monet, Univ. Lumière Lyon 2, Univ. Lyon 3 Jean Moulin, ENS Lyon, ENTPE, ENSA Lyon, UMR 5600 EVS, Centre Spin, F - 42023 Saint-Etienne France

A la mémoire de Bernard Magos (†), secrétaire de l'Association Nature-Témoin, spéléologue-cinéaste qui consacra sa vie au monde souterrain et en particulier à celui de l'Ardèche.

Résumé

Cet article fait suite à la publication " La paléogéographie du canyon de l'Ardèche du Crétacé inférieur à l'Oligocène" (Jolivet et al, 2022).

La question était de comprendre par l'approche de la tectonique, de la géomorphologie et de la géochimie, la répartition des circulations fluviales durant le Paléogène ainsi qu'à l'interface géologique représentée par l'Oligocène-Miocène inférieur, début de l'incision du canyon de l'Ardèche au Néogène.

L'espace géographique de ce vaste ensemble sédimentaire s'étend des bordures triasiques des Cévennes à l'Est en passant successivement aux terrains du Jurassique pour se terminer à l'Ouest par la vaste entité carbonatée du Crétacé inférieur des régions du Bas Vivarais et des Garrigues incluses dans les départements de l'Ardèche et du Gard.

Les paléo-couvertures du Crétacé supérieur et du Paléogène ont oblitéré la plateforme barremo-aptienne et favorisé les circulations fluviales formant des deltas, des chenaux anastomosés ou des vallées de dimensions variées.

L'orientation des écoulements, dès la fin du Mésozoïque et jusqu'à la fin du Paléogène, est cependant difficilement interprétable. Influencé par les variations des mers de la Thétys Alpine, seuls les niveaux de base régionaux (représentés par les sillons d'Alès et du Rhône) semblent avoir été des collecteurs préférentiels pendant ces périodes.

Au regard de sa position géographique et de sa nature géologique, le sillon d'Alès a donné à la rivière Ardèche une orientation d'écoulement fluviale N-S au Crétacé supérieur puis NO à SE durant le Paléogène.

Les conjonctures tectoniques liées aux évolutions eustatiques et climatiques du Paléogène ont amplifié les captures successives des écoulements aériens avant d'inciser de façon rythmée le canyon de l'Ardèche au début du Miocène.

Pour mieux aborder la formation endokarstique des zones sommitales arasées du plateau de St Remèze situées respectivement en rives droite et gauche de l'Ardèche actuelle, une nouvelle approche géologique et géochimique a été menée pour mieux appréhender les processus physiographiques de cette évolution entre l'Eocène inférieur et l'Oligocène.

A partir de la zone centrale des plateaux de St Remèze et du bois de Ronze, des observations de terrain récentes proposent un autre concept sur l'origine de l'évolution de ce paléo-karst.

Un protocole de caractérisation par analyse géochimique ICP-AES complété par diffraction X d'échantillons du Paléogène référencés sur la carte géologique de Bourg Saint Andéol-889 et Pont St Esprit-913 permet de comparer les signatures géochimiques d'échantillons inédits, gréseux et argileux, en surface et dans les cavités des plateaux karstiques ardéchois (Jolivet et al., 2020).

Mots clés : Barremien, Aptien, Paléogène, tectonique, paléo-karst, aquifère, grés et argiles néoformés.

In memory of Bernard Magos (†), association secretary of Nature-Témoin, speleologist and filmmaker who devoted his life to underground exploration and to the caves of the Ardèche river in particular.

Abstract

This paper is subsequent to the publication "Paleogeography of the Ardèche canyon from the Lower Cretaceous to the Oligocene" (Jolivet et al, 2022).

The objective, by the approach of tectonics, geomorphology and geochemistry, is to understand the distribution of fluvial circulations during the Paleogene as well as at the geological interface represented by the Lower Oligocene-Miocene, at the beginning of the incision of the Ardèche canyon in the Neogene.

The geographical setting of this wide sedimentary unit extends from the Triassic borders of the Cévennes to the east, passing successively to the Jurassic terrains, to end in the West with the vast Lower Cretaceous carbonate entity of the Bas Vivarais and Garrigues regions included in the departments of Ardèche and Gard. The Upper Cretaceous and Paleogene paleo-covers have obliterated the Barremo-Aptian platform and favoured fluvial circulations forming deltas, braided channels or valleys of various sizes.

The orientation of the flows, from the end of the Mesozoic and until the end of the Paleogene, is however difficult to interpret. Influenced by variations of the Thetys Alpine seas, only the regional base levels (represented by the Alès and Rhône grooves) seem to have been preferential collectors during these periods. In view of its geographical position and its geological nature, the Alès trench has given the Ardèche river a N-S fluvial flow orientation in the Upper Cretaceous then NW to SE during the Paleogene.

Tectonic conjunctures linked to eustatic and climatic evolutions during the Paleogene have amplified the successive captures of aerial flows, before rhythmically incising the Ardèche canyon at the beginning of the Miocene.

To better discuss the endokarstic formation of the levelled summit area of the Saint-Remèze plateau located respectively on the right and left banks of the current Ardèche, a new geological and geochemical approach was conducted to better understand the physiographic processes of this evolution between the lower Eocene and the Oligocene.

Recent field observations from the central area of the Saint-Remèze and the bois de Ronze plateaus offer a different concept on the origin of the evolution of this paleo-karst.

A characterisation protocol through geochemical ICP-AES completed by X-ray diffraction of Paleogene samples, referenced on the geological maps of Bourg Saint Andéol-889 and Pont Saint Esprit-913, makes it possible to compare the geochemical signatures of unpublished sandstone and clay samples at the surface and in the caves of the Ardèche karstic plateaus (Jolivet et al., 2020).

Keywords: Barremian, Aptien, Paleogene, tectonics, paleo-karst, aquifer, newly formed sandstone and clays.

1- Introduction

Cette recherche porte sur la zone centrale du plateau de St Remèze-Bidon, dénommée ici zone 2 (fig. 1), située en rive gauche de l'Ardèche et encadrée à l'Est par les massifs du Serre de Barre -Dent de Rez et la surface d'aplanissement du Grand Patis à l'Ouest.

Au Sud, cet espace est délimité par le Cros de l'Aiguizier et le Bois Bouchas à l'Ouest et le Malbosc à l'Est.

En rive droite, au niveau de l'interfluve Cèze-Ardèche, l'aire d'étude est comprise entre les parties occidentales du Bois de Ronze et orientales du Bois de Laval.

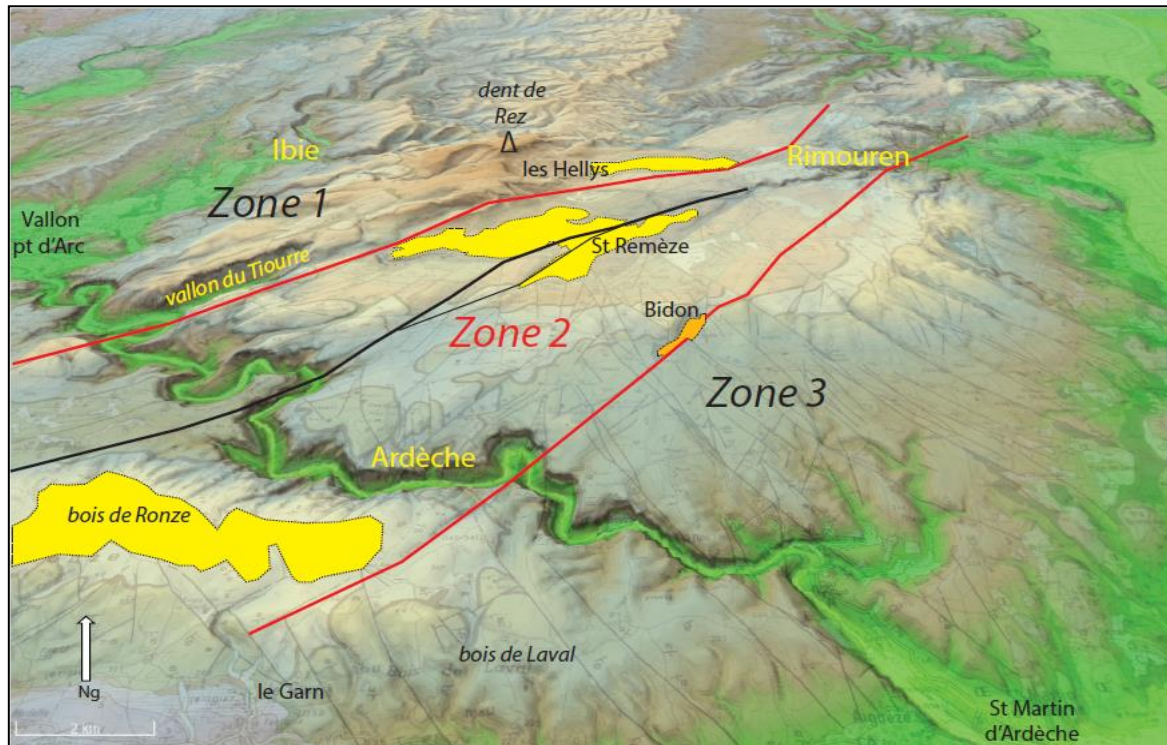


Fig.1 - Situation de la zone 2 délimitée par les traits rouges.

Les plages jaunes positionnent les anticlinaux arasés des régions de St Remèze, les Hellys et du bois de Ronze.
La plage orange marque le graben du village de Bidon.

Fortement contraint par la tectonique, les variations eustatiques, les dépôts détritiques et les paléoclimats tropicaux à subtropicaux depuis la mise en place de la plateforme urgonienne jusqu'à la fin du Paléogène, ce secteur conserve les stigmates de ces événements. (Jolivet et al, 2022).

Ces épisodes géologiques vont perdurer pendant le Paléogène. Ces surfaces seront remodelées par la suite à la faveur des compressions alpines et des fluctuations marines liées à la mise en place du Bassin Rhodano-Provençal (BMRP) au Miocène (Besson, 2005).

Les hypogées inscrites dans la masse carbonatée gardent le témoignage des diverses phases de leur développement.

2- Le cadre stratigraphique de la zone 2

En rive gauche de l'Ardèche, l'Hauterivien supérieur marno-calcaire (n3) n'est présent que sur les périphéries des anticlinaux arasés de St Remèze et des Hellys.

Les calcaires marneux du Barrémien inférieur (n4a M) puis du Barrémien supérieur à faciès urgonien (n4b U) se déclinent progressivement en couronne vers le Sud.

Ce dernier étage, séparé par une vire marneuse (v3), est surmonté par les calcaires du Bédoulien basal (n4c-5a U) chapeauté par le Bédoulien inférieur (n5a U) lui-même délimité par une autre vire marneuse (v4).

La rivière Ardèche recoupe toute la puissance urgonienne jusqu'au Barrémien supérieur.

En rive gauche, les calcaires du Bédoulien basal sont majoritairement représentatifs du bombement de l'anticlinal du bois de Ronze délimité à l'Est par la faille Barjac-Marsanne et séparant le synclinal de Labastide de Virac à ossature calcaire du Bédoulien inférieur.

L'ensemble des déformations plissées et cassantes a défini la mosaïque structurale des terrains carbonatés de la zone 2 (fig.2).

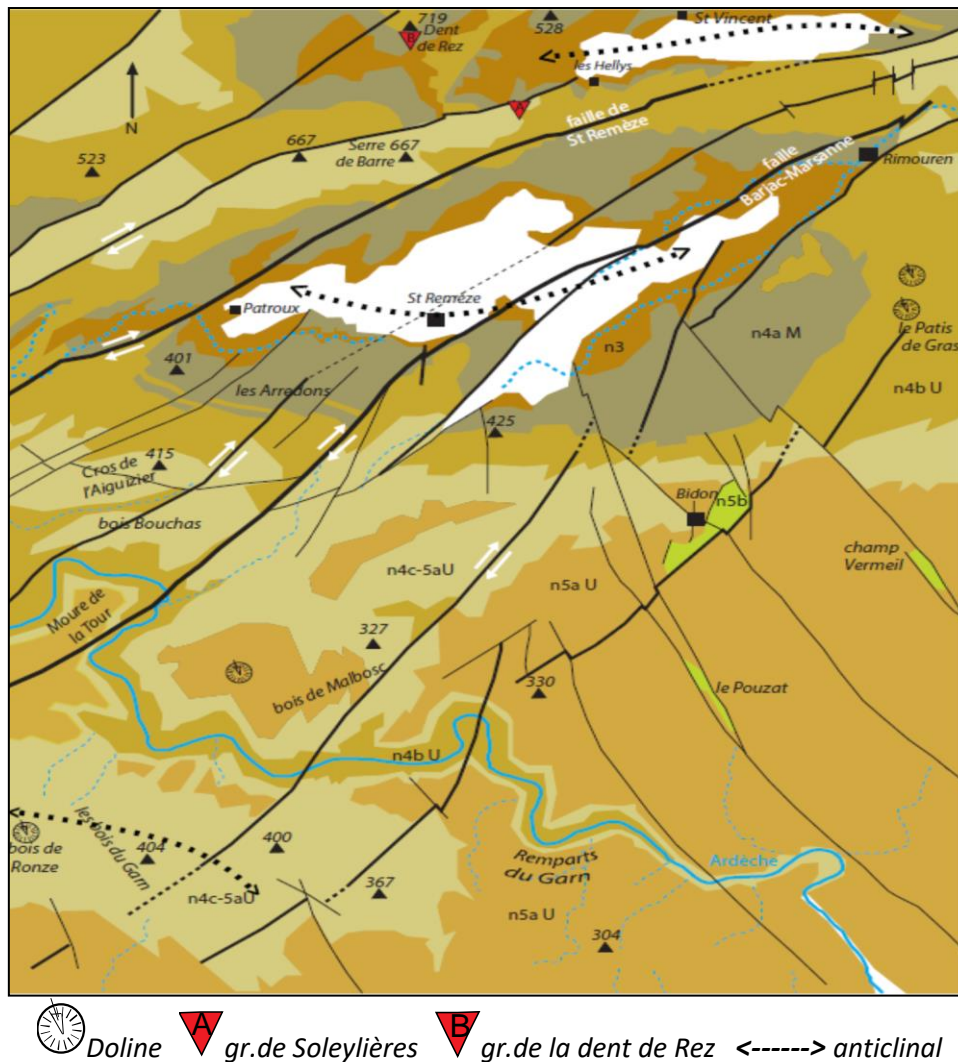


Fig.2 - Carte géologique simplifiée de la zone 2 (d'après la carte géologique de Bourg St Andéol - 1/50 000)

3- Résumé de la tectonique de la zone 2 depuis la fin du Crétacé supérieur jusqu'à la fin du Priabonien

La structuration de la zone 2 tout comme celles périphériques 1 et 3 (fig.1), commence à la fin du Crétacé inférieur et s'amplifie fortement pendant les phases tectoniques successives (compression pyrénéenne et extension fini-Paléogène).

Ces contraintes ont provoqué la finalité du bombement des l'anticlinaux N 110 de St Remèze et les Hellys-St Vincent, formant alors une seule entité, ainsi que celui du bois de Ronze, à la fin de l'Eocène supérieur.

Ces vastes déformations sont recoupées à l'Ouest par les failles de décrochement sénestre de St Remèze, de Barjac-Marsanne en son centre et celle de Bidon-St Montan à l'Est, toutes de direction N20-N60.

Sur le flanc sud du l'anticlinal de St Remèze et au nord de celui du bois de Ronze, les failles N135-N175 inverses et à décrochement dextres sont fréquentes et complètent le canevas structural.

L'ensemble de ces structures entre bien dans la phase de raccourcissement pyrénéen N-S.

Cet agencement résulte en grande partie de la réactivation des failles héritées de la tectonique de la fin du Crétacé inférieur et du Crétacé supérieur puis de leur remobilisation en raison de la subsidence induite par les couvertures gréseuses et sableuses du Crétacé supérieur et de l'Eocène inférieur et moyen qui recouvrait alors l'ensemble des plateaux urgoniens. Ces effets subsidents sur les fracturations NO-SE détermineront l'axe moyen N120 du futur tracé du canyon de l'Ardèche. (Jolivet et al, 2022).

Le Priabonien est caractérisé par le comblement du synclinal d'Issirac et au Rupélien, par la baisse importante du niveau océanique suivi d'une période extensive liée, entre autre, à l'ouverture du Golf du Lion (Jolivet et al., 2000).

A l'Oligocène, la phase de distension ESE-ONO provoque une reprise des failles N-S à NNE-SSO. La conséquence la plus visible est l'ouverture du fossé d'Alès qui fait basculer les séries urgoniennes de la zone

1. Le faisceau de failles transformantes de St Remèze opère une translation qui individualise le synclinal éponyme de celui des Hellys-St Vincent, suivi par une érosion des reliefs pyrénéo-provençaux.

Cette extension va aussi avoir des répercussions sur les failles ENE-OSO provoquant notamment un basculement du plateau de la zone 3 vers le SE en direction du sillon rhodanien.

Le corollaire aboutira à l'affaissement partiel du plateau de St Remèze dans sa partie centrale et du graben de Bidon.

Le découpage en plusieurs blocs et lanières se finalise sous l'impulsion de la première phase de compression alpine ESE-ONO au Miocène inférieur (Besson, 2005) et par le soulèvement et le volcanisme du Massif central ainsi qu'à la continuité de l'ouverture du golfe du Lion et la rotation du bloc corso-sarde.

Ces événements fixeront définitivement l'axe de creusement du canyon de l'Ardèche.

4 - Morphologie et hydrographie de la zone 2

La physiographie du bassin amont de l'Ardèche contrôle la localisation et la profondeur de la vallée depuis le Crétacé supérieur.

A partir d'un bassin amont de type rift, les déformations tectoniques influent sur les circulations fluviales favorables au développement de chenaux anastomosés ou de vallées de dimensions variées et dont le sens des écoulements N-S à NE-SO s'oriente vers le sillon d'Alès en cours d'évolution (Jolivet *et al.*, 2022).

L'architecture de l'axe anticlinal de St Remèze correspond à une surface d'érosion qui s'étend entre les lieux dits «Patroux» et «le Patis de Gras» à une altitude comprise entre 390 et 370 mètres au niveau des calcaires de l'Hauterivien et du Barremien (inférieur et supérieur).

La morphologie anticlinale arasée du bois de Ronze décline les mêmes caractéristiques que celles de St Remèze mais se développe sur les calcaires de l'Aptien basal.

Les transgressions successives de dépôts détritiques, constitués par des sols limoneux en rive droite et argilo-sableux en rive gauche de l'Ardèche sont issus des grès et sables du Sénonien fortement altérés et remaniés à l'Eocène inférieur. Ils sédimentent dans la zone d'accommodation établie entre le sud de la région de St Remèze et l'interfluve Cèze-Ardèche bordé au sud par les séries carbonatées du Priabonien qui comblent les espaces disponibles dégagés par le synclinal d'Issirac et le sillon d'Alès, ces deux bassins étant alors connectés.

Ces aggradations sédimentaires de l'Eocène supérieur alors peu déformées indiquent qu'un "calme" tectonique a pu faciliter l'établissement de ces deux hautes surfaces d'aplanissement et par la suite, la formation de dolines formées par crypto-corrosion sous couverture des sables de l'Eocène inférieur. S'en suit un processus d'érosion aréolaire et fluviale qui décape les altérites.

Sous un climat tropical à subtropical, cette nouvelle organisation est propice à l'instauration d'une vallée incisée simple dans laquelle la rivière Ardèche va se positionner.

La construction et l'organisation d'un réseau de drainage fluviale dépend de la nature du substrat, du contrôle structural, du niveau de base ainsi que de l'influence des apports sédimentaires (Schumm *et al.*, 1994).

Ce collecteur passe progressivement d'un axe NE-SO à NO-SE, sur un substrat sablo-gréseux du Crétacé supérieur à Eocène moyen, d'épaisseur conséquente ayant générée une subsidence au droit des failles sous jacentes ou bordières d'orientation N110 à N140 présentes dès l'Aptien/Albien et réactivées pendant la phase pyrénéenne; le tout associé aux variations du niveau de base général correspondant à la Téthys Alpine. Une autre direction d'écoulement est identifiable à partir du synclinal aplani de St Remèze. A l'altitude de 390 mètres, elle se distingue par une série de vallons tronqués avec une morphologie très estompée et de direction parallèle aux failles NE-SO segmentant le plateau (fig.3).

En surface, se retrouvent des argiles lessivées de l'Eocène inférieur et des grès, roulés ou non, provenant de la paléo couverture du Crétacé supérieur ou bien néoformés à matrice sableuse plus ou moins indurée.

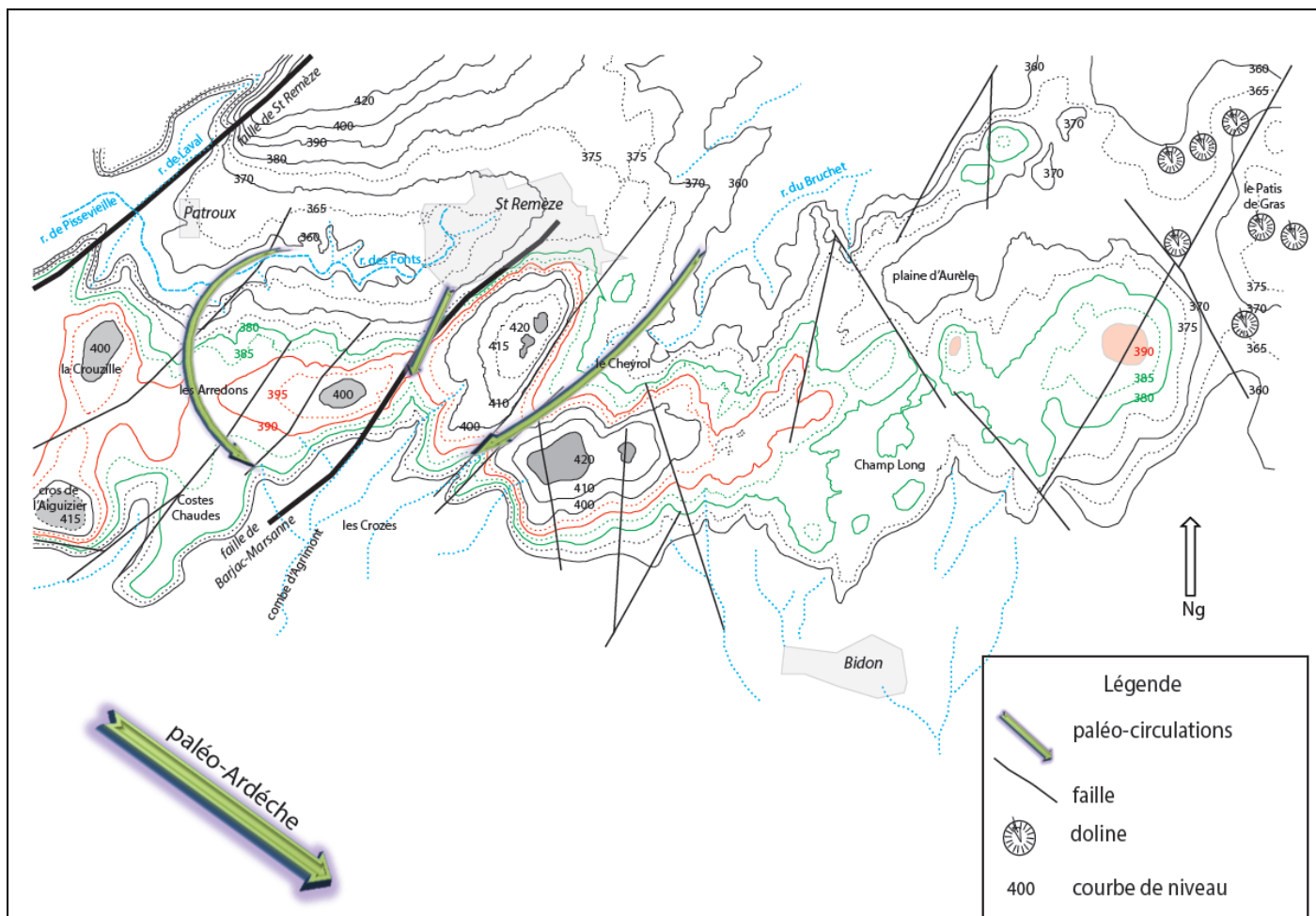


Fig.3 -Paléo-circulations probables dans la région de Saint Remèze à la fin du Paléogène (d'après MNT 5 mètres - 1/25 000)

5- Le contexte exokarstique de la zone 2 de St Remèze

La pénéplaine de St Remèze s'ouvre dans un large espace à faible dénivellation, qui résulte d'un arasement et de la coalescence des bassins hydrographiques. Il s'agit d'un ensemble de talwegs et d'interfluvés peu marqués, avec des reliefs résiduels qui soulignent des lignes de partage des eaux (fig.3). Cette surface topographique constitue un stade évolué d'érosion due aux réseaux hydrographiques (Belleville, 1985).

Cette configuration géographique découle du contexte géologique mis en place depuis le début de l'Eocène moyen et évoluant jusqu'à la première incision aquitano-burdigalienne de l'Ardèche.

Du point de vue morphologique, le plateau de St Remèze présente une boutonnière dans la partie haute de l'anticlinal découvrant son cœur marneux (Lafarge, 1978).

L'établissement de cette cuvette a été favorisé et contraint par des variations atones tant directionnelles que de creusement lié au niveau de base correspondant alors à la paléo-Ardèche.

Des vestiges d'argile indurée et de plaques de grès néoformés se retrouvent disséminés entre le lieu-dit «les Arrédon» et «la chapelle de Saint Abdon» ou bien à proximité des cavités décapitées comme celles du Cros de l'Aiguizier, de Costes Chaudes ou le Devès.

Ces accumulations sédimentaires argileuses et gréseuses riches en éléments alcalins nécessitent pour leur évolution, des bassins confinés riches en solutions siliceuses et carbonatées sous un climat hydrolysant humide et chaud de type tropical (Siltter et al., 1964) soumis à des événements hyperthermiques comme ceux de la transition Paléocène-Eocène: PETM (*Paleocene-Eocene Thermal Maximum*) et de l'Eocène: EECO (*Early Eocene Climatic Optimum*) et MECO (*Middle Eocene Climatic Optimum*) (Agnini et al., 2009).

Quelques rares galets quartziques provenant du socle paléozoïque se retrouvent depuis le haut du plateau jusqu'en bordures des falaises de l'Ardèche.

6 - Le contexte endokarstique de la zone 2 de St Remèze

La concentration élevée en cavités au sein de la zone 2 permet ici une approche intéressante concernant leur spéléogénèse et les prémices du creusement de l'Ardèche.

Les hypogées se développent entre les altitudes 390 et 350 mètres et s'établissent indifféremment dans les calcaires du Barrémien supérieur et de l'Aptien inférieur.

A partir du bassin versant sud de St Remèze, deux types de morphologie souterraine sont représentées :

- Au SO du village de St Remèze, un ensemble de grottes avec des galeries en partie colmatées par des argiles indurées et dont les toits sont proches de la surface: aven Double, les grottes des Arredons 1, 2 et 3, du Cade et de Bartade. Plus au Sud, l'aven de l'Anniversaire débute par un drain horizontal. A l'Ouest, s'ouvre la doline du lieu-dit «Beauregard».

- Localisés au SO du village éponyme, des segments de galeries décapitées présentent des morphologies de parois estompées, des vestiges de concrétion, des placages argilo-sableux indurés et des grés néoformés: Aiguizier 2, 3 et 4, Costes Chaudes, Devès 1,2 et 3 et Rounal. Au SE, à la périphérie de l'aven Marzal, les tronçons de Marzal 1 et 5 convergent vers celui de la Barthe. (fig. 4). Cette nomenclature est reprise d'après les travaux de Martini J. (Martini, 2005). Au Sud-Ouest du lieu-dit «les Hellys» les grottes de Soleylières (Z 460m) et de la Dent de Rez (Z 680m). (fig.1) se développent, recoupées par un recul de versant.

Ces deux premières entités paléo-karstiques se situent aux limites de la charnière de l'anticlinal de St Remèze et aux altitudes respectives de 390 et 380 mètres pour la première et 380 à 325 mètres pour la seconde. Elles se sont formées sous couverture sédimentaire de l'Eocène inférieur.

A l'exception de l'aven Double et du tronçon tronqué de Marzal 5 d'orientation N40 et N60, leur spéléogénèse se calque majoritairement sur des failles NNO-SSE à NO-SE, toutes héritées de la phase tectonique pyrénéenne (fig.4).

La détroncation du toit des galeries est due à l'érosion. Elles se sont développées sur des failles dont certaines d'entre elles ont subi des décrochements et glissements, favorisant l'ablation de leurs toits. Elles ont une direction perpendiculaire aux vallons secs dont les thalwegs suivent des lignes structurales induites par la tectonique éocène et oligocène.

Malgré les remplissages, les conduits des cavités montrent des morphologies à sections peu larges et à déclivité minime, qui dénotent des gradients hydrauliques faibles caractérisés par un régime laminaire avec peu de déplacements sédimentaires. Les hypogées se développent soit à l'interface des calcaires du Barrémien inférieur marneux-Barrémien supérieur ou bien dans les calcaires de l'Aptien basal.

L'orientation générale de ces paléo-aquifères indique qu'une résultante d'écoulement issue d'un système phréatique karstique s'orientait vers un niveau de base local ou régional alors déprimé situé au sud-est et pouvant se rattacher au contexte hydrographique de la zone 2 décrit ci-dessus.

La disposition spatiale de ces cavités contredit la définition d'un linéaire unique qui pouvait former une "rivière souterraine" comme évoqué dans des travaux antérieurs (Martini, 2005 & 2019).

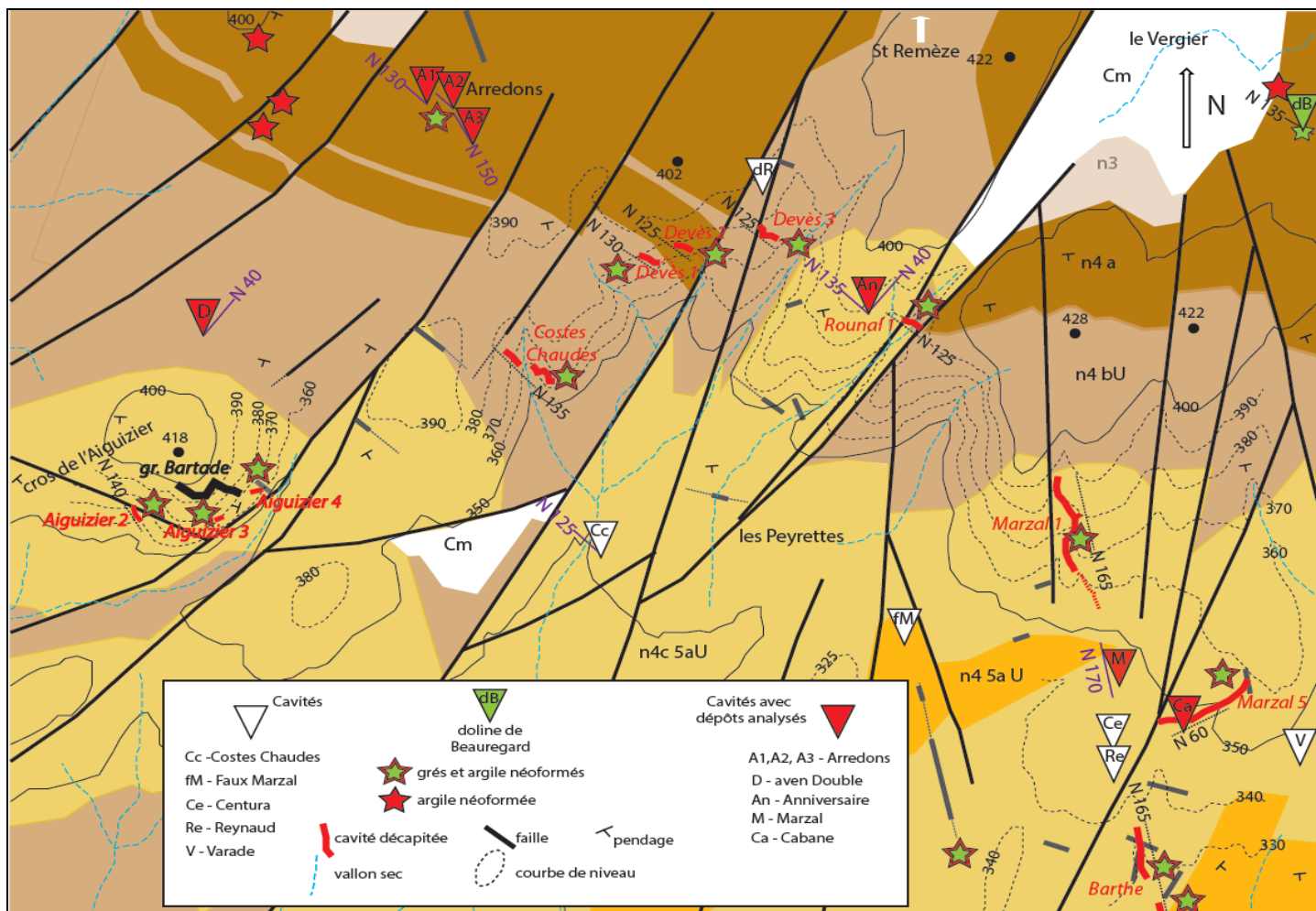


Fig. 4 - Situation des cavités décapitées ou non à la charnière de l'anticlinal de St Remèze (d'après la carte géologique de Bourg St Andéol - 1/50 000)

7 - Les remplissages

Dans l'endokarst, à l'exception de reliquats de remplissage chimique tel que des concrétions de divers types, les dépôts observés avaient été classés en alluvions immatures présentés sous forme de limons et de sables, et matures dénommant des argiles plus ou moins limoneuses (Martini, 2005 & 2019).



Photo 1 - grés néoformé de la section décapitée du Devès 3 (cliché Jolivet J.)

7-1 - Les grés néoformés

Ces grés résultent de l'altération sous climat tropical, des minéraux issus des couvertures gréseuses du Crétacé supérieur et de l'Eocène inférieur-moyen (Jolivet et al, 2020) (tab.1)

Site	Sable	% SiO2	% Al2O3	% CaO	% Fe2O3	% K2O	% MgO	% MnO	% Na2O	% P2O5	% TiO2	% Altération	% Lixiviation	ppm Transition	rapport Si/Al	ppm Ba
Mourre de la Tour	éocène inf.	67,1	13,6	0,6	4,61	3,05	0,77	0,05	1,31	0,08	0,83	73	0,20	314	5	504
Mourre de la Tour	éocène inf.	67,6	13,0	0,8	3,96	3,19	0,74	0,06	1,43	0,11	0,86	71	0,23	326	5	530
doline1 bois de Ronze	éocène inf.	63,2	16,0	0,8	6,27	2,40	0,95	0,12	0,89	0,12	1,04	80	0,17	404	4	470
doline2 bois de Ronze	éocène inf.	66,4	13,9	0,6	4,90	2,50	0,76	0,06	1,00	0,13	0,91	77	0,18	347	5	452

PDF 00-046-1045 Si O2 Quartz, syn
 PDF 00-009-0466 Na Al Si3 O8 Albite, ordered
 PDF 00-019-0932 K Al Si3 O8 Microcline, intermediate
 PDF 04-015-0731 K Fe0.12 Al2.88 Si3 O10 (O H)2 Muscovite-2M1

Tab 1 - Analyses géochimiques sur les sables de l'Eocène inférieur échantillonnés sur divers sites de l'interfluve Cèze-Ardèche. Diffraction X des sables de la Doline 1 : composition : quartz, feldspaths alcalins et potassiques, micas blancs.

L'altération en présence d'eau entraîne une dissolution plus ou moins rapide du CaCO₃ ou d'éléments peu solubles et de façon plus lente du SiO₂ en condition alcaline.

Ainsi les grés à ciment calcaire et siliceux subissent une décarbonatation et une désilicification entraînant une individualisation en un faciès sableux.

A partir des sables ainsi libérés, la silice et le carbonate de calcium, en différentes proportions, précipitent à nouveau autour des grains de sable libres, mais avec des modifications dans leur composition chimique et leur cimentation qui varient par rapport aux grés et sables originels.

Les analyses géochimiques montrent: (i) que le degré d'oxydation des éléments de transition proportionnel avec les teneurs en baryum diminue ainsi que leur pourcentage d'altération dû à la baisse des éléments majeurs sauf pour la silice et le calcium qui constituent la cimentation des grés néoformés. (ii) un rapport Si/Al plus élevé que celui mesuré dans les grés originels. (iii) un pourcentage de lixiviation en augmentation en fonction des interactions eaux-roches à travers le processus d'induration (tab.2).

Un processus de diagénèse dite précoce affecte alors les sédiments déposés et abouti à un facteur d'induration moindre (Photo 1).

La présence de magnétite dans certains échantillons peut s'expliquer par les eaux hydrothermales de la région de St Remèze ou par des basaltes altérés, retrouvés sur un placage de conduit à Costes Chaudes (Martini ,2005), charriés depuis le Massif Central et aujourd'hui disparus.

Site	Grés néoformés	% SiO2	% Al2O3	% CaO	% Fe2O3	% K2O	% MgO	% MnO	% Na2O	% P2O5	% TiO2	% Altération	% Lixiviation	ppm Transition	rapport Si/Al	ppm Ba
Devès 2	cavité décapitée	70,8	2,2	25,1	1,30	0,11	0,23	0,05	0,02	0,14	0,15	8	11,8	133	33	20
Devès 3 - a	cavité décapitée	77,2	1,3	17,4	3,54	0,05	0,08	0,03	0,01	0,28	0,14	7	14,2	196	62	11
Devès 3 - b	cavité décapitée	74,0	7,7	12,8	2,75	1,23	0,25	0,30	0,09	0,45	0,44	35	1,7	253	10	171
Aiguisier 4	cavité décapitée	74,6	6,2	14,7	2,56	0,82	0,17	0,02	0,10	0,47	0,43	28	2,5	260	12	99
Aiguisier 4	cavité décapitée	74,4	6,0	15,0	2,07	1,32	0,26	0,02	0,13	0,44	0,36	27	2,6	165	12	146
Aiguisier 4	cavité décapitée	73,5	5,1	16,1	3,25	0,84	0,24	0,08	0,09	0,42	0,37	23	3,3	465	14	102
Costes-Chaudes	cavité décapitée	76,1	2,1	19,3	1,28	0,60	0,17	0,02	0,06	0,20	0,22	10	9,3	108	36	70
Doline - Beauregard	doline	65,8	0,7	13,7	7,60	0,03	0,06	0,03	0,01	0,27	0,18	5	21,1	173	99	11
Doline - Beauregard	doline	42,2	1,1	29,8	1,40	0,10	0,11	0,01	0,12	0,09	0,10	4	26,4	105	37	7
Doline - Beauregard	doline	37,5	0,8	32,7	1,49	0,08	0,08	0,19	0,12	0,09	0,08	2	42,9	140	49	35

Tab.2 - Résultats géochimiques sur des échantillons de grés néoformés prélevés dans la région de St Remèze.

D'après leur granulométrie, les sables siliceux appartiennent à la classe des arénites et des lutites dans la plupart des échantillons prélevés. Les grains de quartz sont en général anguleux à sub-anguleux dénotant une origine fluviale et en bien moindre proportion, des éléments émoussés, luisants ou mâts, de nature éolienne.

Les sondages réalisés sur divers gisements suggèrent un grano-classement au droit des faciès des grés (Martini, 2005) d'où la variabilité des éléments majeurs et traces analysés comme dans les échantillons du Devès 3 a et b et ceux de la doline de Beauregard (tab.2) se rapprochant ainsi des valeurs chimiques adamiques obtenues sur les grés du Turonien inférieur-moyen (c3 a-b) des régions de Salavas et Lagorce (Jolivet et al, 2022)

La datation par isotopes cosmogéniques ($^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$) des sables de la grotte de Bartade (Tassy et al., 2013) donne un âge fini messinien de 5.11 ± 1.36 Ma. Elle ne correspond nullement aux données du mobilier paléontologique étudié sur des dents de rongeurs inclus dans les grés néoformés indiquant un âge tortonien ou pliocène inférieur selon les auteurs. (Martini, 2005, 2019) ; Aguilar et Michaux, 2008).

En l'absence de toute stratification, il n'a pas été observé de connexion anatomique; seuls des vestiges osseux épars sont disséminés dans certains termes sableux soumis à un contexte de diagenèse en cours de finalisation sous l'influence de remaniements sporadiques qui vont durer jusqu'à la fin du Néogène.

Les sables infiltrés dans la zone vadose ont été réorganisés par une dynamique hydraulique de faible énergie au sein de la grotte.

Sans remettre en cause les datations, aucun de ces arguments ne permet de dater la karstification de la zone 2.

7-2 - Les argiles authigènes

Du Sénonien à l'Eocène moyen, sous climat tropical, d'intenses altérations entraînent une dissolution progressive des phyllosilicates conduisant à une destruction des minéraux primaires par hydrolyse.

La libération de leurs constituants provoque une élimination des cations principalement de la silice ainsi qu'une insolubilité du Al_2O_3 et Fe_2O_3 , le tout sous l'influence du pH et du drainage local.

Les termes argileux extérieurs exposés aux aléas climatiques subissent des lessivages (tab.2) avec des pertes conjointes d'aluminium, de silice et de baryum ainsi que le reste des éléments majeurs sauf pour l'oxyde de fer et l'oxyde de calcium, ce dernier se transformant en carbonate de calcium d'où l'apparition dans certains échantillons, d'irradiations ou des petites géodes de calcite pendant ou après l'induration des argiles (Photo 2).

Le pourcentage d'altération et la somme des éléments de transition correspondent à une composition chimique intermédiaire et parfois proche des grés néoformés. La muscovite est absente sur quelques échantillons extérieurs.

Site	Argile	% SiO2	% Al2O3	% CaO	% Fe2O3	% K2O	% MgO	% MnO	% Na2O	% P2O5	% TiO2	% Altération	% Lixiviation	ppm Transition	rapport Si/Al	ppm Ba
gr. Bartade	couloir entrée	30,6	6,8	30,1	3,55	0,39	0,24	0,07	0,03	0,06	0,49	18	4,5	244	4	55
gr. Bartade	couloir entrée	30,9	6,9	30,2	2,23	1,10	0,31	0,02	0,19	0,14	0,36	18	4,5	179	4	174
gr. Bartade	surface	18,8	6,3	38,5	3,32	0,31	0,25	0,10	0,04	0,09	0,44	14	6,2	260	3	52
gr. Bartade	surface	23,8	4,7	36,7	2,41	0,17	0,19	0,02	0,09	0,07	0,42	11	7,9	200	5	31
Aiguisier 2	cavité décapitée	44,0	6,8	22,5	1,80	1,00	0,20	0,04	0,20	0,12	0,26	22	3,4	183	6	165
Aiguisier 4	cavité décapitée	70,5	3,1	24,2	1,52	0,20	0,13	0,02	0,02	0,15	0,21	11	7,9	202	23	22
St Abdon	surface	69,2	6,6	18,9	3,73	0,25	0,28	0,10	0,06	0,26	0,59	26	2,9	333	10	47
Devès 2	cavité décapitée	69,3	5,3	21,1	2,71	0,35	0,37	0,02	0,04	0,31	0,50	20	4,1	295	13	42
Devès 1	cavité décapitée	67,6	3,6	26,5	1,62	0,17	0,11	0,03	0,03	0,16	0,21	12	7,4	205	19	22

PDF 00-046-1045	SiO2 Quartz, syn
PDF 00-047-1743	CaCO3 Calcite
PDF 04-005-4630	Fe2O3 Hematite, syn
PDF 00-003-0195 MgFeSiO4 Olivine	
PDF 04-013-2815	Al2Si2O5(OH)4 Kaolinite-1A
PDF 00-021-1272	TiO2 Anatase, syn

Tab 2. - Analyses géochimiques sur les argiles extérieures échantillonnées dans les cavités décapitées. Diffraction X réalisée sur l'argile du couloir d'entrée de la grotte Bartade. Disparition de la muscovite en raison de l'action du lessivage.

Ce processus de transfert concentre les résidus, en particulier ceux du fer, de la silice et de l'aluminium pendant leur migration dans l'épikarst puis dans la zone saturée où ils participent à la néoformation d'argile en relation avec la dynamique de la nappe phréatique. (Lucas et al., 1990).

Le dépôt de ces matériaux se produit avant la karstification mais participe à son élaboration.

Ce mécanisme d'agradation est bien visible à la grotte de la Bartade et dans une poche karstique au lieu-dit «Beauregard» et dénote un lent processus d'argilisation sous un régime d'écoulement adynamique d'où un faible pourcentage de lixiviation (tab.3).

Site	Argile	% SiO2	% Al2O3	% CaO	% Fe2O3	% K2O	% MgO	% MnO	% Na2O	% P2O5	% TiO2	% Altération	% Lixiviation	ppm Transition	rapport Si/Al	ppm Ba
gr. Bartade	galerie	60,4	17,2	1,3	9,1	0,84	0,82	0,24	0,06	0,18	1,42	88	0,14	616	4	152
gr. Bartade	galerie	36,7	24,7	8,6	11,5	1,00	0,73	0,29	0,10	0,19	1,53	72	0,39	859	1	180
Beauregard	poche karstique	53,7	14,0	7,1	7,6	0,81	0,70	0,16	0,09	0,25	0,90	64	0,58	507	4	145

PDF 00-046-1045	SiO2 Quartz, syn
PDF 00-047-1743	CaCO3 Calcite
PDF 00-021-1276	TiO2 Rutile, syn
PDF 00-058-2035	KAl2(Si,Al)4O10(OH)2 Muscovite-2M1
PDF 04-005-4630	Fe2O3 Hematite, syn
PDF 00-003-0195 MgFeSiO4 Olivine	
PDF 04-013-2815	Al2Si2O5(OH)4 Kaolinite-1A
PDF 00-021-1272	TiO2 Anatase, syn

Tab. 3 - Analyse géochimiques sur les argiles échantillonnées dans la grotte Bartade. Diffraction X: composition: rutile: quartz, feldspath ou biotite - olivine: basalte kaolinite: feldspath alcalin - anatase: roches métamorphiques

Dans la plupart part des cas, les dépôts souterrains sont meubles et argileux comparables à des limons contenant des quartzs et dont la granulométrie appartient à la classe des lutites, la fraction quartzeuse provenant des grés néoformés.

Il est à souligner l'interférence des sables de l'Eocène inférieur dans cette évolution chimique. Elle a pu ainsi être comparée avec les observations suivantes: (i) les éléments de transition produisent des ions avec une augmentation des degrés d'oxydation montrant une agradation. (ii) la présence d'aluminosilicate, (remplacement des ions Si par Al), due à une hydrolyse partielle au contact des eaux interstitielles alcalines (Frankart et al, 1970). (iii) les pourcentages d'Al2O3, de CaO, de Fe2O3 et de la somme des éléments de transition augmentent ainsi que ceux du chrome et du vanadium inversement à celui du baryum (tab.3).

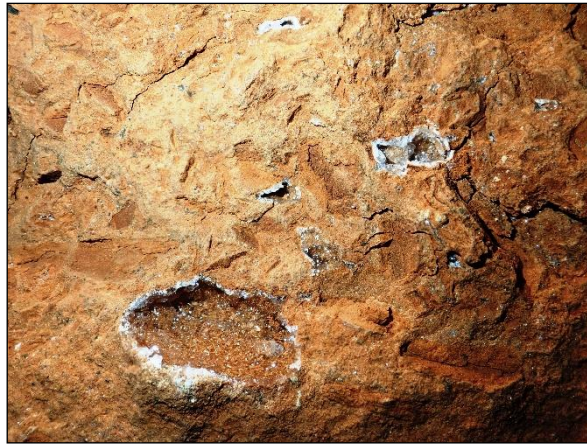


Photo 2 - Inclusion de géodes de calcite dans de l'argile - grotte de la Bartade (cliché Jolivet J.)

7-3 - Autres éléments de remplissages

De nombreux échantillons prélevés en surface (Chapelle Abdon) (tab.4) ou en cavité (Bartade, Aiguizier 4, Devès 1, Marzal), contiennent de la magnétite ou la titanomagnétite (Fe-Ti) et de l'olivine, indicateur de retombées volcaniques.

7 Abdon		
PDF 00-046-1045	SiO ₂ Quartz, syn	
PDF 00-047-1743	CaCO ₃ Calcite	
PDF 00-021-1276	TiO ₂ Rutile, syn	
PDF 00-058-2035	KAl ₂ (Si,Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₂ Muscovite-2M1	
PDF 04-005-4630	Fe ₂ O ₃ Hematite, syn	
PDF 00-003-0195	MgFeSiO ₄ Olivine	
PDF 04-013-2815	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄ Kaolinite-1A	
PDF 00-021-1272	TiO ₂ Anatase, syn	

Tab.4 - Diffraction X sur les sédiments argileux de surface de la Chapelle Abdon.

Dans certaines cavités comme celle de l'aven du Devès de Reynaud, la présence de téphras dans les sédimentations argilo-limoneuses montre une provenance volcanique du Bas Vivarais ou du Mont-Dore (Debard et *al.*, 2008).

Leurs âges sont compris entre 190 et 24 ka. (Sasco et *al.*, 2017) ou entre 170 et 45 ka. (Guérin et *al.*, 2007). Ces éléments volcaniques pléistocènes d'origine éolienne ont été lessivés par des écoulements de surface avant de transiter au sein de l'épikarst et de rejoindre ensuite les zones vadoses où ils ont été remaniés aux argiles sableuses durant le Quaternaire.

Dans la grotte de Soleylières (fig.2; tab.5 & 6), la présence de pyrochroïte dans la kaolinite explique un pourcentage élevé de Mn issue de gisement de sulfure provenant de massifs volcaniques ou de la zone thermale.

La grotte de la Dent de Rez a été recoupée par un recul de versant. Des prélèvements ont montré la présence d'argile rouge contenant des sables d'âge Lutétien/Bartonien basal et qui a été retrouvée dans la grotte de la Forestière (tab.6) sise à l'Ouest de la surface d'aplanissement du bois de Ronze (Jolivet et *al.*, 2020).

Par endroits, des fragments de cristaux blancs en forme de scalénoèdre de calcite mélangés aux sédiments sont comparables à ceux de la grotte de l'Echarassou (Z 290 m) (hors carte) située à l'Ouest du massif de la Dent de Rez. L'analyse isotopique ($\delta^{13}\text{C}$ - $\delta^{18}\text{O}$) réalisée sur ces concrétions confirme une origine phréatique (Genty D. *in* Darne F., 1995). D'autres analyses par microthermométrie des inclusions minérales corroborent une origine hydrothermale, la température de l'eau avoisinant les 70°C et réchauffant les eaux météoriques en profondeur (Häuselmann P. *in* Darne F., 1995).

Sur les scalénoèdres, le rapport Ca/Si est supérieur à 0.8 soulignant une dissolution de la silice sous contrainte thermale.

Dans cette dernière cavité, les sables analysés indiquent une provenance des terrains d'âge Bartonien contenant de la chlorite-serpentine, minéral secondaire issu de l'altération de silicates magnésiens et d'origine magmatique.

A proximité, dans la grotte Murée (Z 250 m) (hors carte), les prélèvements effectués sur des limons argileux signent des remplissages d'âge Eocène inférieur et Bartonien, ce dernier âge ayant un taux de gypse très élevé provenant des terrains sous-jacents du Trias ou des marnes noires pyriteuses du Callovien, ce qui renforce l'hypothèse d'hydrothermalisme (tab.5).

Site		%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	ppm	rapport	ppm	
		SiO2	Al2O3	CaO	Fe2O3	K2O	MgO	MnO	Na2O	P2O5	TiO2	Altération	Lixiviation	Transition	Si/Al	Ba
Lutétien																
Labastide de Virac	échantillon référencé	1,9	0,6	54,7	0,18	0,04	0,15	0,02	0,01	0,01	0,03	92	1,1	18	3	10
gr.dent de Rez 1	argile	2,2	1,0	53,6	0,51	0,08	0,30	0,01	0,03	0,04	0,05	55	1,8	45	2	6
gr.dent de Rez 2	argile	3,6	0,7	52,3	0,36	0,07	0,31	0,01	0,03	0,03	0,03	77	1,3	35	5	7
gr.Forestière	argile	3,8	0,8	52,3	0,77	0,07	0,17	0,00	0,01	0,02	0,04	66	1,5	48	5	7
Bartonien																
SO-Laval St Roman	échantillon référencé	80,8	5,0	3,6	2,89	1,09	0,73	0,01	0,03	0,02	0,28	51	0,9	133	16	67
gr. d'Echarassou	sable	84,6	4,4	6,1	1,73	0,56	0,61	0,03	0,08	1,45	0,46	40	1,9	357	19	74
gr. Murée	argile	76,1	6,7	11,8	3,61	0,48	0,37	0,12	0,06	0,14	0,72	35	1,9	2797	11	80
gr.Soleylières	cavité	67,3	2,8	25,9	2,19	0,23	0,23	0,50	0,09	0,45	0,25	10	9,4	311	24	205

Tab.5 - Comparatif des échantillons référencés avec les dépôts dans les cavités de la dent de Rez, de la Forestière, de l'Echarassou et Murée.

8SOLEY		
PDF 00-047-1743	CaCO3 Calcite	
PDF 00-046-1045	SiO2 Quartz, syn	
PDF 04-005-4630	Fe2O3 Hematite, syn	
PDF 00-021-1276	TiO2 Rutile, syn	
PDF 00-058-2035	KAl2(Si,Al)4O10(OH)2 Muscovite-2M1	
PDF 04-013-2815	Al2Si2O5(OH)4 Kaolinite-1A	
PDF 00-021-1272	TiO2 Anatase, syn	
PDF 01-073-8392	Mn(OH)2 Pyrochroite, syn	

Tab.6 - Diffraction X sur les sédiments argileux de la grotte de Soleylières

7-4 - Protocoles analytiques

Les analyses géochimiques ont été conduites à Mines de St Etienne sur un spectromètre ICP-MS Agilent 7800X. Les analyses de roche ont été effectuées après minéralisation et attaque acide des échantillons à l'eau régale. L'exactitude et la reproductibilité des mesures ont été évaluées à l'aide de standards internationaux.

Les analyses de Diffractions au Rayons (DRX) ont été menées à Mines de St Etienne sur un diffractomètre Bruker D8 A 25 équipé de la radiation Cu (1.5406 Å).

8 - L'hydrothermalisme de la région de Saint Remèze

Une série de forages a permis de révéler la présence d'un phréatique karstique hydrothermal compris dans le faisceau de failles NE-SO recoupant l'anticlinal arasé de St Remèze.

Ces sondages se situent dans les calcaires de l'Hauterivien supérieur à des profondeurs comprises entre 70 et 135 mètres. Le plus profond (F2) se positionne au droit de la faille Barjac-Marsanne.

Les analyses hydrochimiques montrent des pH alcalin supérieur à 8.0 en période de basses eaux et compris entre 6.8 et 7.8 après des précipitations. La forte concentration en sels dissous de la nappe souligne une signature chimique d'un rapport de type SO4 - Na à Ca qui témoigne de circulations plus profondes provenant des terrains carbonatés issus des formations évaporitiques du Trias (sondage de Vallon D.Va 1). En effet, le sodium représente plus de 90% la somme des cations pour le forage 2 (tab.7).

A partir de cet impluvium, les eaux météoriques s'infiltrent grâce au réseau de failles qui leur permet d'acquérir un équilibre chimique et thermique avec le substratum. Les structures sub-verticales recoupent

l'étage de l'Hauterivien inférieur marneux favorisant l'établissement d'un système phréatique suspendu et fractionné.

La remontée de l'eau profonde vers la surface est assurée par les grandes failles transformantes NE-SO qui permettent une remontée des fluides se mélangeant avec les eaux plus froides et moins minéralisées du réservoir karstique suspendu (Blavoux, 2009).

Les variations altitudinales des diverses surfaces piézométriques ainsi que leurs signatures chimiques indiquent des compartimentages liés à la tectonique régionale pouvant établir des relations entre ces aquifères.

Forages	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	à 25°C		
	Si	Al	Ca	Fe	K	Mg	Mn	Na	P	Ti	S	t°C	µS/cm	pH
F1	2,0	0,0	15,1	0,0	2,0	6,7	0,0	58,3	0,0	0,0	15,5	16,0	775	8,45
F2	0,6	0,0	0,9	0,0	0,7	0,7	0,0	92,3	0,0	0,0	4,6	15,7	1716	8,25
F3	4,4	0,0	52,0	0,0	1,0	5,8	0,0	15,9	0,0	0,0	20,2	14,3	693	8,05
	2022		Cumul pluie entre les 2 périodes: 250 mm											
F1	1,6	0,0	22,0	0,0	3,0	9,5	0,0	57,8	0,0	0,0	5,8	16,7	783	7,31
F2	0,6	0,0	1,7	0,0	1,5	1,5	0,0	92,3	0,0	0,0	2,2	15,0	1729	7,75
F3	2,4	0,0	71,2	0,0	1,2	7,9	0,0	8,6	0,0	0,0	7,9	15,5	740	6,83

Tab.7 - Résultats hydrochimiques des échantillons prélevés dans les forages.

9 -Conclusion concernant la zone 2 au Paléogène

Sous climat tropical, l'instauration d'un canevas structural a été déterminant pour les agencements morphologiques des terrains de la zone 2.

A partir de la haute surface arasée, un réseau de drainage fluvial d'axe NO-SE s'organise pour fixer la paléo-Ardèche entre l'interfluve Cèze-Ardèche et le plateau de St Remèze. Ce collecteur avait pour support des sols gréseux à sableux allant du fini Crétacé supérieur à l'Eocène moyen et engendrant une subsidence au droit des failles NO-SE à NNO -SSE sous-jacentes et périphériques.

Un autre écoulement NE-SO a pu être mis en évidence à partir de la charnière arasée du synclinal de St Remèze confluant avec la paléo-Ardèche.

Dans ce cadre physiogéographique, ces écoulements avaient probablement un hydrodynamisme peu incisif et leurs lits devaient s'étaler dans de larges vallées, les circulations souterraines convergeant vers des paléo-niveaux de base déprimés.

La présence de sédiments lutétiens et bartoniens dans les différentes grottes situées en bordure ouest de la zone 2 (Dent de Rez, de l'Echarassou, Murée, la Forestière) avant le basculement du massif carbonaté de la zone 1 vers la terminaison du fossé d'Alès à l'Oligocène, suppose qu'un régime lacustre a pu s'établir à une altitude actuelle moyenne de 390 m. allant du bois de Ronze à la région de St Remèze.

La tectonique compressive de l'Eocène reprise par la phase de distension amorcée au début de l'Oligocène engendre des remontées hydrothermales qui favorisent la mise en place de phréatiques spécifiques perchés. Cependant, les analyses géochimiques et hydrochimiques ne permettent pas de montrer une influence du système hydrothermal sur les sédiments néoformés du plateau de St Remèze ainsi qu'une relation avec les eaux des réservoirs karstiques barrémo-aptiens localisés de part et autre de l'Ardèche actuelle.

Seules les grottes périphériques du massif de la dent de Rez peuvent être considérées comme hypogènes.

Seuls les contextes tectoniques, eustatiques et paléo-climatiques en comparaison de l'évolution des sols par l'analyse géochimique complétée par diffraction aux rayons X mettent en perspective et de manière rationnelle une spéléogénèse sous couverture éocène, des paléo-écoulements et de nouveaux réseaux de drainages dans un environnement karstique avec parfois une influence hydrothermale.

Cette situation a pour cadre des vecteurs de creusement à faible gradient hydraulique que commandent des niveaux de base déprimés et qui perdureront jusqu'à l'Oligo-Aquitainien avant les premières phases de creusement du canyon de l'Ardèche.

Remerciements:

A Olivier Valfort (Mines St Etienne) pour les analyses de DRX.

A Christian DUMAS, Raphaël BENINI et Olivier PEYRONEL pour leur aide et leur connaissance du terrain.

Bibliographie:

Agnini C., Macri P., Backman J., Brinkhuis H., Fornaciari E., Guisberti L., Luciani V., Rio D., Sluijs A., et Speranza F., (2009) - An early Eocene carbon cycle perturbation at 52.5 Ma. in the Southern Alps : Chronology and biotic response. *Paleoceanography*, 24.

Aguilar J.P., Michaux J.(2008) - *La faune des rongeurs de Rounal 1: révision et implications pour l'interprétation du système karstique de Saint Remèze (Ardèche, France)*. *Karstologia* n°51, p.51-55

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

Besson D. (2005) - *Architecture du bassin rhodano-provençal miocène (Alpes, SE France). Relations entre déformation, physiographie et sédimentation dans un bassin molassique d'avant-pays*. Thèse de doctorat de l'École des Mines de Paris, 364 p.

Blavoux B. (2009) - *Les structures à l'origine du patrimoine thermal français et leur fonctionnement. Indications pour la protection de la ressource. L'hydrothermalisme en domaine continental. Fonctionnement, ressource et patrimoine*. Collection EDYTEM n°9, p.11-20

Darne F. (1995) - *Discussion sur l'origine hydrothermale de concrétions observées dans une cavité ardéchoise*. Actes Cinquième Rencontre d'Octobre du Spéléo-Club de Paris à Orgnac (Ardèche) 1995.

Debard E., Pastre J.F. (2008) - *Nouvelles données sur les téphras pléistocènes piégés dans les remplissages karstiques ardéchois (SE France)*. *Quaternaire*, vol.19 n°2, p. 107-116

Frankart R. et Herbillon A.J., 1970 - *Présence d'analcime dans les sols sodiques de la Basse Ruzizi (Burundi)*. Bulletin du Groupe français des Argiles, Tome 27.

Guerin G., Gilot P.Y. (2007) - *Nouveaux éléments de chronologie du volcanisme Pleistocène du bas Vivarais (Ardèche, France) par thermoluminescence*. *Comptes Rendus Géoscience*, Elsevier, 2007, 339 (1), p. 40-49

Jolivet J., Van den Broeck E., Graillot D. (2020) - *Evolution des altérites du Crétacé supérieur à l'Eocène depuis la surface continentale vers l'endokarst - Garrigues septentrionale du Gard et du sud Ardèche*. *Karstologia* n°75, 2020, p. 7-16

Jolivet J., Peuble S., Paran F., Gallice F., Van den Broeck E., Graillot D. (2022) - *Paléogéographie du canyon de l'Ardèche du Crétacé inférieur à l'Oligocène: approches par la tectonique, la géomorphologie et la géochimie*. HAL Id: emse-03710478, <https://hal.emse.ccsd.cnrs.fr/emse-03710478>

Bulletin Nature-Témoin (2022) : L'image témoin des grottes et des paysages, p.36 à 47

Jolivet L., Facenna C. (2000) - *Mediterranean extension and the Africa-Eurasia collision* - *Tectonics*, 19, 1095-1106

Lafarge D. (1978) - *Etude géologique du plateau de Saint Remèze, Ardèche*. Thèse 3e cycle, Université Claude Bernard, Lyon, 119 p., 52 fig., 3 pl.

Lucas, Y., Boulet, R. et Chauvel A., (1990) - *Mise en évidence de transferts d'aluminium dans les sols de la zone tropicale humide (cas d'une couverture ferrallitique de l'Amazonie brésilienne)* C.R Acad. Sci. Pans, 311, série II, p. 247-252

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 année 2005

Martini J. (2019) - *Données nouvelles sur la "rivière souterraine fossile de Saint Remèze" et ses affluents: modèles spéléo-géniques et évolution morphologique régionale du Sud-Ardèche au Néogène supérieur*. *Karstologia* n° 74, année 2019, p. 15 - 30

Sasco R., Guillou H., Nomade S., Scao V., Maury R. C., Kissel C., Wandres C. (2017) - *$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ and unspiked ^{40}K - ^{40}Ar dating of upper Pleistocene volcanic activity in the Bas-Vivarais (Ardèche, France)*. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 341, pp. 301-314

Schumm S.A. , Ethridge F.G. (1994) - *Origin, evolution and morphology of fluvial system*. Soc. for Sed. Geol (SEPM), Special publication, 51, p.11-27.

Siltter, C., Millot G. (1964) - *Les climats français reconstitués par les argiles néoformées et les microflores* - Geologische Rundschau, vol. 54, p.333 - 343

Tassy A., Mocochain L., Bellier O., Braucher R., Gattacceca J., Bourlès D. (2013) - *Coupling cosmogenic dating and magnetostratigraphy to constrain the chronological evolution of peri-Mediterranean karsts during the Messinian and the Pliocene: Example of Ardeche Valley, Southern France*. Geomorphology Volume 189, 1 May 2013, Pages 81-9