



HAL
open science

Fonctionnement hydrologique du bassin versant karstique du système souterrain rivière de l'aven de Camellié - source de Marnade (Gard, France).

Joël Jolivet, Steve Peuble, Frédéric Gallice, Didier Graillot

► To cite this version:

Joël Jolivet, Steve Peuble, Frédéric Gallice, Didier Graillot. Fonctionnement hydrologique du bassin versant karstique du système souterrain rivière de l'aven de Camellié - source de Marnade (Gard, France).. 2024. emse-04718566

HAL Id: emse-04718566

<https://hal-emse.ccsd.cnrs.fr/emse-04718566v1>

Preprint submitted on 2 Oct 2024

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.

Fonctionnement hydrologique du bassin versant karstique du système souterrain rivière de l'aven de Camellié - source de Marnade (Gard, France).

Approches par la pétrographie, la géochimie et la tectonique.

Joël JOLIVET ⁽¹⁾, Steve PEUBLE ⁽²⁾, Frédéric GALLICE ⁽²⁾, Didier GRAILLOT ⁽²⁾

(1) Association Nature-Témoin - 30760 ISSIRAC

(2) Université de Lyon, UMR 5600 EVS - Mines Saint-Etienne

Résumé :

Les deux entités endokarstiques du système Camellié - Marnade se situent au niveau des garrigues septentrionales du Gard et s'étendent sous le plateau calcaire du Barrémien de Méjannes-le-Clap et sous les calcaires plus ou moins marneux de l'Hauterivien de la plaine de Fons-sur-Lussan.

Cette étude consiste à appréhender plus finement des composantes géologiques telles que la géochimie des calcaires de l'Hauterivien, Barrémien inférieur et supérieur, la géologie structurale en précisant le canevas faillé du secteur à partir de la carte géologique Pont-St-Esprit (913), l'hydrochimie et les traçages artificiels, ces derniers permettant d'émettre des hypothèses de fonctionnement et du sens de circulation des eaux du système Camellié-Marnade.

Les rapports, notes, images ou films établis ou réalisés par les spéléologues-plongeurs lors de leurs pérégrinations en milieu souterrain contribuent à de nouvelles observations et à une meilleure compréhension du fonctionnement de ce bassin karstique.

La spéléogénèse de ces cavités est brièvement discutée dans le cadre d'une évolution liée à la mise en place d'une paléo-Cèze durant le Miocène.

Un protocole de caractérisation par analyse géochimique ICP-AES sur des échantillons du Crétacé inférieur et Paléogène référencés sur la carte géologique de Pont-St-Esprit (913) permet de comparer les signatures géochimiques d'échantillons inédits, calcaires du Crétacé inférieur du plateau de Méjannes-le-Clap. (Jolivet et *al.*, 2020)

Cette étude montre que l'évolution du bassin d'alimentation karstique du système Camellié - Marnade a été restreinte dans son espace carbonaté. Son confinement hypogé minimise les débits et volumes d'eau les rendant bien moins incisifs en pleine roche contrairement au bassin versant de la rivière Cèze qui a guidé la mise en place de la structure souterraine.

Mots clés : Hauterivien, Barrémien inférieur et supérieur, Géochimie, Tectonique, Coloration, Hydrochimie, Bassin versant karstique.

Abstract:

The two endokarstic entities of the Camellié-Marnade system are located in the northern garrigues of Gard, extending beneath the Barrémian limestone plateau of Méjannes-le-Clap and the more or less marly Hauterivian limestones of the Fons-sur-Lussan plain.

This study aims to further refine geological components such as the geochemistry of Hauterivian, Lower and Upper Barrémian limestones, and structural geology by detailing the fault network of the area based on the Pont-St-Esprit geological map (913). Hydrochemistry and artificial tracings are employed to hypothesize the functioning and flow direction of water within the Camellié-Marnade system. Reports, notes, images, or films produced by speleologist-divers during their underground explorations provide new insights and contribute to a better understanding of this karstic basin's dynamics.

The speleogenesis of these cavities is briefly discussed in the context of an evolution associated with the development of a paleo-Cèze river during the Miocene. A characterization protocol involving geochemical analysis using ICP-AES on Lower Cretaceous and Paleogene samples referenced on the Pont-St-Esprit geological map (913) allows for a comparison of the geochemical signatures of novel samples, particularly the Lower Cretaceous limestones from the Méjannes-le-Clap plateau (Jolivet et al., 2020).

This study demonstrates that the evolution of the karstic recharge basin of the Camellié-Marnade system has been spatially confined within its carbonate area. Its hypogean confinement minimizes water flow and volumes, making them far less erosive in solid rock compared to the Cèze river watershed, which played a role in guiding the formation of the subterranean structure.

Keywords: Hauterivian, Lower and Upper Barrémian, Geochemistry, Tectonics, Tracings, Hydrochemistry, Karstic watershed

Introduction :

Depuis le début du XX^{ème} siècle l'aven de Camellié (*) a fait l'objet de nombreuses explorations qui se poursuivent encore actuellement par les spéléologues régionaux. Les plongées réalisées dans la rivière souterraine du réseau inférieur débutent en 1979 et aboutissent à un développement topographique total de 6760 mètres, dont 820 mètres noyés, et pour un dénivelé de moins 171 mètres (Bagarre et *al.*, 2002).

La source de Marnade, bien connue pour son moulin, voit sa première investigation en 1955 mais c'est au milieu des années 1970 que les plongeurs explorent sa zone profonde pour un développement actuel noyé de 2300 mètres et une profondeur de moins 176 mètres (Méniscus, 2023).

Les topographies existantes des deux réseaux ne sont pas publiées ici en raison du droit de diffusion de leurs auteurs ou de réalisation en cours.

Ces deux entités hypogées appartiennent à un même bassin versant karstique qui comprend l'aven de Camellié se situant au sud-ouest et constitue l'amont du système hydrologique et la source de Marnade, sise au nord-est, qui représente l'exutoire principal, sinon unique, de cette unité aquatique hypogée.

Les logs hydrostratigraphiques montrent deux réservoirs aquifères carbonatés : le réservoir formé par les calcaires du Barrémien et celui formé par les calcaires de l'Hauterivien.

La zone étudiée dans lequel les deux cavités se sont formées est un paléo-karst méditerranéen. De nombreuses colorations ont prouvé la relation des eaux de la rivière de Camellié avec celles de Marnade.

1 - Le contexte géologique :

1-1 –Sédimentologie :

Une fraction du réseau de Camellié se développe dans un poljé délimité par des failles NE-SO et NO-SE et dont la dépression est couronnée par les calcaires marneux et fins du Barrémien inférieur (n4) et son fond est constitué par les calcaires de l'Hauterivien supérieur (n3 c) sur environ 125mètres d'épaisseur (Photo 1). L'Hauterivien moyen à inférieur (n3 b) apparaît sous la séquence précédente sur une profondeur de 75 mètres à minima comme le montre les logs des forages n°1, 2 et 3 de la Lèque (**BSS).

C'est à l'interface de ces deux séquences que s'écoule la rivière de Camellié à la cote 135 m.NGF pour atteindre son terminus actuel à 90 m.NGF.

Une ammonite (genre *Leopoldia* ou *Lyticoceras* ?) photographiée par les plongeurs vers moins 135 mètres de profondeur peut évoquer les calcaires argileux gris bleu de l'Hauterivien inférieur d'où alternent des marnes litées décapées par le flux du cours d'eau souterrain. Cependant, la variabilité de cet ensemble ne contribue pas à déterminer une limite séquentielle.

Le puits n°2 (AEP), sis au SO et au droit d'une faille inverse, recoupe les calcaires du Barrémien inférieur entre 60 et 110 mètres de profondeur. Le niveau de sa nappe phréatique à 35 mètres au-dessus de celui de la rivière souterraine indique la présence d'un aquifère karstique perché (Fig.1).

Pour l'Hauterivien, les composantes marneuses plus ou moins argileuses avec des alternances de calcaires, principalement des calcarénites, gris bleuâtres puis jaunâtres par oxydation, jouent un rôle de régulateur en raison de l'espace interfoliaire des minéraux argileux, via la rétention puis la restitution peu ou prou rémanente de l'eau en fonction de l'état hydrique de la roche.

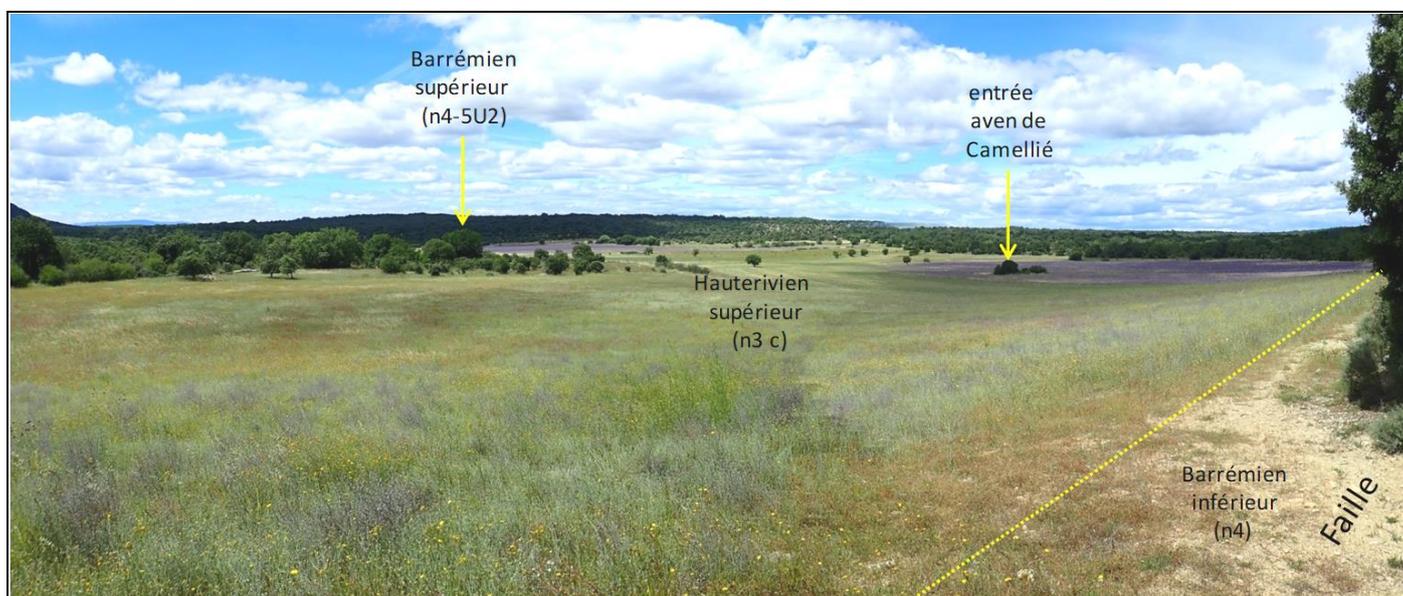


Photo1 - plaine de Camellié

La source de Marnade s'étend dans les calcaires du Barrémien supérieur à faciès urgonien inférieur (n4 U1b à n4 5U2).

Les images rapportées par les plongeurs (Méniscus, 2023) montrent :

1) des calcaires lités en bancs de 20 à 50 cm d'épaisseur appartenant à des stratifications irrégulières débitées en dalles, l'écaillage des parois du conduit noyé étant favorisé par des phénomènes de détente survenus à proximité du conduit. Il pourrait s'agir de surfaces de discordance que l'on rencontre à la limite des calcaires du Barrémien inférieur et supérieur (Sb Ba3) entre les cotes altimétriques moins 65 à moins 45 mètres NGF.

2) au dessus de ces limites, des calcaires massifs du Barrémien supérieur dans lesquels continue le drain principal dont certaines portions sont de facture syngénétique. Il remonte le long d'une faille E-O à la cote moyenne de 85 mètres NGF pouvant correspondre, en tenant compte de la variabilité des épaisseurs de dépôts et des logs de forages locaux à la surface Sb Ba4, limite de séquence stratigraphique du Barrémien supérieur favorable à l'établissement de poches ou conduits karstiques (Bastide, 2014).

Mais seule la détermination des microfaciès par analyse biostratigraphique permettrait de déterminer la nature du découpage de la série barrémienne.

Les valeurs de porosité des interstices de la roche sont relativement faibles (0,3 à 7%) pour les calcaires du Barrémien supérieur et peuvent aller jusqu'à 11 % dans les bancs plus friables mais elles sont vraisemblablement plus élevées dans les paléo-karsts méditerranéens (Thomas, 2022).

Les analyses géochimiques font apparaître une gradation descendante des éléments majeurs, du pourcentage d'altération et des éléments traces du Sr et du S de l'Hauterivien vers le Barrémien-Aptien. Le taux de Si est inversement proportionnel à celui du Ca. Le taux d'altération détermine ici la teneur en argile favorisant le colmatage des fissures des divers calcaires (Tab.1).

Communes	Etage		%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	ppb	ppb
			Si	Ca	Al	Mg	Fe	K	Mn	Na	P	Ti	Altération	S	Sr
Fons/ Lussan	n3 b	Hauterivien moyen/ inf.	0,26	94,3	2,16	1,00	1,36	0,67	0,04	0,12	0,04	0,16	2,2	2659	838
Fons/ Lussan - Lussan	n3 c	Hauterivien supérieur	0,15	95,5	1,70	1,04	0,87	0,54	0,02	0,06	0,04	0,11	1,7	1314	974
Méjannes-le-Clap	n4	Barrémien inférieur	0,13	95,4	1,49	1,31	1,09	0,47	0,04	0,05	0,03	0,09	1,5	1469	517
Méjannes-le-Clap	n4 U1a	Barrémien inférieur	0,07	98,2	0,44	0,81	0,32	0,14	0,01	0,03	0,02	0,03	0,4	1821	243
Méjannes-le-Clap	n4 U1b	Barrémien inf/sup.	0,07	97,3	0,42	1,81	0,25	0,14	0,01	0,04	0,03	0,03	0,4	1565	415
Méjannes-le-Clap	n4 5U2	Barrémien supérieur	0,03	99,5	0,00	0,35	0,05	0,03	0,00	0,02	0,00	0,00	0,0	1886	109
Goudargues	n5	Aptien	0,05	98,5	0,23	0,96	0,10	0,07	0,01	0,06	0,03	0,02	0,2	1999	177

Tab.1 - Découpage analytique des séquences de dépôts de l'Hauterivien et du Barrémien-Aptien de la zone étudiée. Moyenne géochimique réalisée à partir des résultats de plusieurs échantillons prélevés dans chaque étage.

1-2 – Tectonique :

Le descriptif et les images de la progression spéléologique faits par les plongeurs ainsi que les reports topographiques de la rivière souterraine de Camellié et du réseau noyé de Marnade soulignent l'influence de la tectonique sur la morphologie des conduits. Ce canevas faillé très dense se cale plus ou moins sur celui relevé en surface mais une grande partie de ce dernier a été effacé par (i) l'érosion ayant contribué à l'établissement de la surface d'aplanissement sise à la cote moyenne de 300 mètres NGF, appelée parfois fondamentale, du plateau de Lussan - Méjannes-le-Clap au cours du Cénozoïque, (ii) l'incision des vallons secs et leur comblement partiel par les remplissages résiduels, colluviaux et éboulis de pente.

Cet héritage structural important a été modelé depuis les crises tectoniques tardi-hercyniennes et qui vont continuer durant tout le Mésozoïque par des séries de phases de distension créant des pluralités de directions dominantes dans le substratum et générant par la suite, le basculement ou l'enfoncement des blocs carbonatés. Deux directions principales se dégagent de ce processus : les failles NE-SO (faille des Cévennes et de Nîmes) et plus secondairement, les failles NNO et NNE.

La phase tectonique de compression pyrénéo-provençale amorcée à la fin du Crétacé supérieur perdure durant une grande partie du Paléogène. Elle se caractérise par des plis d'axe moyen Est-Ouest et une série de failles sub-verticales de direction moyenne NO-SE et NE-SO.

La phase de distension oligo-miocène ravive les structures faillées antérieures et sépare les Cévennes de la région des Garrigues par le fossé d'effondrement d'Alès.

Le contrecoup de cette étape est la formation de l'anticlinal de Lussan, sorte de renflement de flexion (forebulge), aujourd'hui arasé, consécutif à l'évolution de la faille de Barjac et l'ouverture d'un héli-graben d'axe 120°N parallèle au synclinal d'Issirac et probablement amorcé à la période précédente.

Cet effondrement est souligné par un réseau de fracturations de même direction qui découpe en petits grabens la zone de Pied Sicard (fig.3) avec des reprises de failles normales importantes de direction NNE-SSO. Ces petites structures tectoniques ont piégé des sédiments de l'Eocène supérieur (Jolivet et al., 2017).

Les deux phases de compression alpine durant le Miocène vont affecter le jeu structurant précédent de direction ENE-OSO et NO-SE et à nouveau NNE-SSO, les failles ayant fonctionné en décrochement.

Au Plio-Quaternaire, les soubresauts de la tectonique alpine engendrent des contraintes caractérisées par un régime compressif qui fait à nouveau jouer les failles NE-SO au niveau du couloir rhodanien ainsi que de la bordure cévenole (Lafarge, 1978). Ce soulèvement post néogène de plus d'une centaine de mètres de part et d'autre de la vallée du Rhône permet d'atteindre les altitudes actuelles.

Les diaclases et fractures, simples cassures sans déplacement, fort nombreuses, de dimensions et orientations variées, recoupent perpendiculairement les plans de stratifications. Elles sont souvent colmatées en surface par la terra rossa mêlée à des éléments rocheux de gélifraction.

Ces entités de dislocation constituent l'épikarst qui réceptionne les eaux météoriques et favorise leur infiltration plus ou moins rapide en fonction de leur degré de porosité ainsi que le phénomène d'érosion/corrosion des calcaires surfaciques.

D'après des mesures effectuées en cavité, la charge minérale de l'eau de pluie s'équilibre et prend les valeurs chimiques des eaux du phréatique karstique en une dizaine de mètres de transfert dans les calcaires du Barrémien supérieur (Jolivet, *inédit*).

Autres manifestations de modelé karstique, les dolines se sont développées sur une surface d'aplanissement d'âge fini éocène puis fractionnée et étagée pendant le Néogène.

1-3 –Contact ou joints de stratification :

Il caractérise des surfaces de discontinuité fort nombreuses dans les calcaires du Crétacé inférieur. Ces interruptions sédimentaires sont disparates en raison de la variabilité de leur nature carbonatée et leurs déplacements par la tectonique sub-verticale.

Les joints de stratification présentent des pendages occasionnellement bien inclinés en fonction des plissements subis durant le Paléogène et/ou la proximité de failles majeures. Ils ne peuvent être considérés comme des couches de passage continues qu'à la condition de les associer aux failles et fractures.

2 - Les causalités de la spéléogénèse du système Camellié – Marnade :

Ces deux cavités se sont formées au dépend de discontinuités géologiques tant sédimentaires que structurales qui servent de guide à l'écoulement des eaux souterraines.

La particularité de cette circulation hypogée réside en la direction de son gradient hydraulique orienté SO-NE qui va à l'encontre de celui NO-SE de la rivière Cèze qui constitue le niveau de base local (Fig.2).

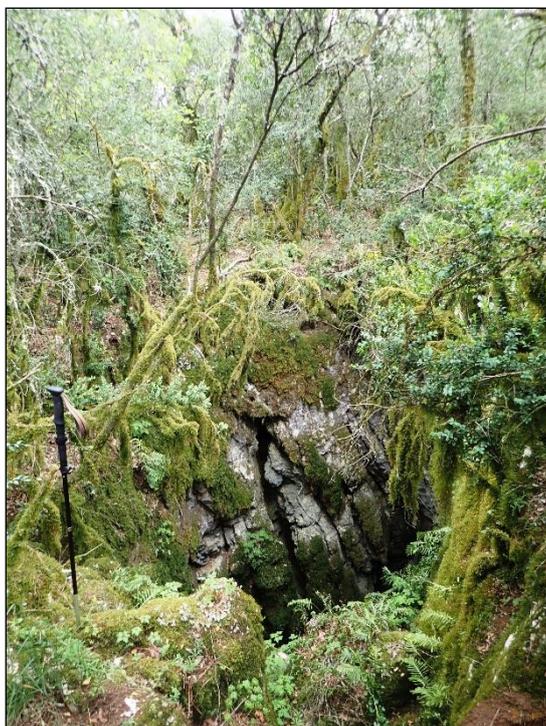
Les topographies de ces ensembles souterrains reportées en surface montrent que l'évolution de leur spéléogénèse se situe d'une part sur l'axe Camellié - Civadière et d'autre part sur les axes mas de la Civadière - pied Sicard suivi de l'axe mas des Ardilliers - source de Marnade (Fig 3).

2-1 - sur l'axe aven de Camellié - mas de la Civadière :

a) les failles normales NNE-SSO encadrent le réseau de Camellié et contraignent les eaux de la rivière à s'écouler dans cette direction (Fig.3).

b) les failles NO-SE en majorité de décrochement fractionnent plus ou moins perpendiculairement la masse carbonatée en paliers soumettant la rivière à une forte géodynamique, la pente de la rivière connue étant d'environ 2.7%.

c) Les relevés topographiques réalisés pendant les dernières explorations s'arrêtent non loin de l'aven du Fangas (Photo 2). Au vu de cet ensemble, il est fort probable que la rivière de Camellié suit son parcours dans un cadre structural similaire jusqu'au niveau du mas de la Civadière (Fig.3) atteignant ainsi son équilibre hydrostatique vers la cote moyenne de 85 mètres NGF qui correspond à celui de la source de Marnade.



*Photo 2 - aven du Fangas (commune de Méjannes-le-Clap)
Son puits unique de 45 mètres s'est développé sur une ligne de failles NE-SO.*

Les contacts stratigraphiques relevés sur la zone indiquent des pendages inclinés vers le SE.

Le rôle de régulateur par la rétention puis la restitution de l'eau en fonction de l'état hydrique des calcaires hauteriviens ainsi que celui du karst perché en amont (au SO) et des bases de stratification, offre un cadre favorable à la mise en place de cette circulation souterraine.

Si les calcaires de l'Hauterivien sont perméables, ils présentent des infiltrations lentes et des débits plus limités en raison de leur matrice argileuse, comme le dévoilent les rétentions d'eau par forte pluie en surface ou exceptionnellement, comme en 2002, avec l'engorgement de l'aven de Camellié et la déstabilisation des parois du puits d'entrée.

Les infiltrations sont bien plus rapides dans les calcaires du Barrémien en raison de leur grande perméabilité en grand et de leur composition chimique riche en Ca et pauvre en Si qui présentent des taux d'altération très faibles.

Sur la surface d'aplanissement, de nombreuses dépressions et bouches d'ovens (Fig.3) s'ouvrent à l'altitude moyenne de 300 NGF, principalement au contact des calcaires du Barrémien inférieur plus ou moins marneux et ainsi que des fractures ou failles apparemment sans direction privilégiées mais favorisant des zones de broyage (Jolivet et *al.*, 2008). Certaines sont associées à des creusements verticaux peu ou prou profonds et peuvent être supposées comme des regards sur le système Camellié-Marnade.

Ces phénomènes sont à conjuguer avec l'érosion différentielle des divers termes qui composent cet étage à laquelle est venue, pour certaines d'entre eux, s'ajouter l'effet d'affouillement corrosif lié aux diverses paléo-couvertures aujourd'hui disparues de l'Eocène (Jolivet et *al.*, 2020).

La doline sise au SO du mas de la Civadière se calque sur un carrefour de failles créditant un changement possible du trajet de la rivière souterraine en direction ENE (Fig. 3).

2-2 - dans l'axe mas de la Civadière - pied Sicard :

a) des failles normales ENE-OSO qui deviennent prépondérantes et établissent un "couloir" directionnel et préférentiel vers l'exutoire de Marnade sont visibles sur une grande partie du lit de combe Longue (Fig.3). Cette modification de direction fait suite à la phase de distension de l'Oligocène puis amplifiée à celle compressive alpine ONO-ESE du Miocène inférieur qu'initie une phase de serrage et de torsion ayant une répercussion sur les failles ONO-ESE et NO-SE (Jolivet et *al.*, 2020 et 2022).

Cette accentuation tectonique se retrouve de part et d'autre de la faille du grand Serre (FF') décalant et abaissant ainsi les terrains de l'Eocène moyen d'environ 80 mètres (Fig.3).

b) les failles NO-SE en majorité de décrochement recoupent toujours orthogonalement cette ligne avec affaissement en seuil des structures.

Sur cet axe aucun regard souterrain ne permet d'atteindre le phréatique karstique. Seul le "couloir" tectonique NE-SO fortement cisailé (fig.3), relevé en surface et évoqué ci-dessus, semble indiquer une contrainte d'écoulement préférentiel vers la source de Marnade. Les cavités présentes sur cette ligne sont peu profondes, à dominante horizontale et s'étendent uniquement dans les calcaires du Barrémien supérieur.

Entre les failles FF' et HH' (Fig.3), la présence de petits grabens indique des zones de décrochement-cisaillement de nombreuses failles favorisant de probables désorganisations spatiales de l'agencement des aires de contact ainsi que l'affouillement plus en profondeur des eaux souterraines.

Cette image de gradation en seuil a affaibli la surface d'aplanissement comme le montre les dolines des altitudes 250 NGF de part et d'autre de la faille FF' (Fig.3). Les terrains de l'Hauterivien sous jacent pourraient perdre dans ces aires, leur rôle de drains d'écoulement au profit de ceux du Barrémien.

c) au sud du "couloir" NE-SO, au lieu-dit mas du Ruph (Fig.3), un réseau de fracturations denses et parallèles ENE-OSO, apparemment sans déplacement et souligné par des effondrements se manifeste grâce au jeu de détente mécanique qui traduit des mouvements de terrains postérieurs au creusement du canyon du Merderis. Cette zone pourrait correspondre à la limite sud de cette partie du bassin versant karstique.

2-3 - dans l'axe mas des Ardilliers - source de Marnade :

a) les failles normales NNE-SSO redeviennent prépondérantes du moins dans l'axe du siphon n°3, le plus profond reconnu, entre moins 100m. et moins 175 mètres de profondeur. Une d'entre elles oriente et contraint ainsi l'écoulement de l'eau vers l'exutoire de la source de Marnade. Le terminus actuel du siphon n°3 se situe tout à proximité de la faille GG' (Fig. 1&3).

b) les failles NO-SE en majorité de décrochement amorcées lors des phases de compression alpine amplifiées au Miocène supérieur, recoupent toujours perpendiculairement le réseau de failles de la ligne d'eau avec de possibles affaissements en seuil des structures. Cette subsidence est caractérisée par les dépressions à 200 NGF de chaque côté des failles GG' et HH' (Fig.3).

C'est à partir d'une de ces ruptures que le drain principal de la source va s'établir en changeant de direction et former les siphons n°1 et n°2 présentant des profondeurs moyennes de moins 30 mètres. Ce changement d'orientation se manifeste en surface par une grande doline au lieu-dit de Darboussas (Fig. 3).

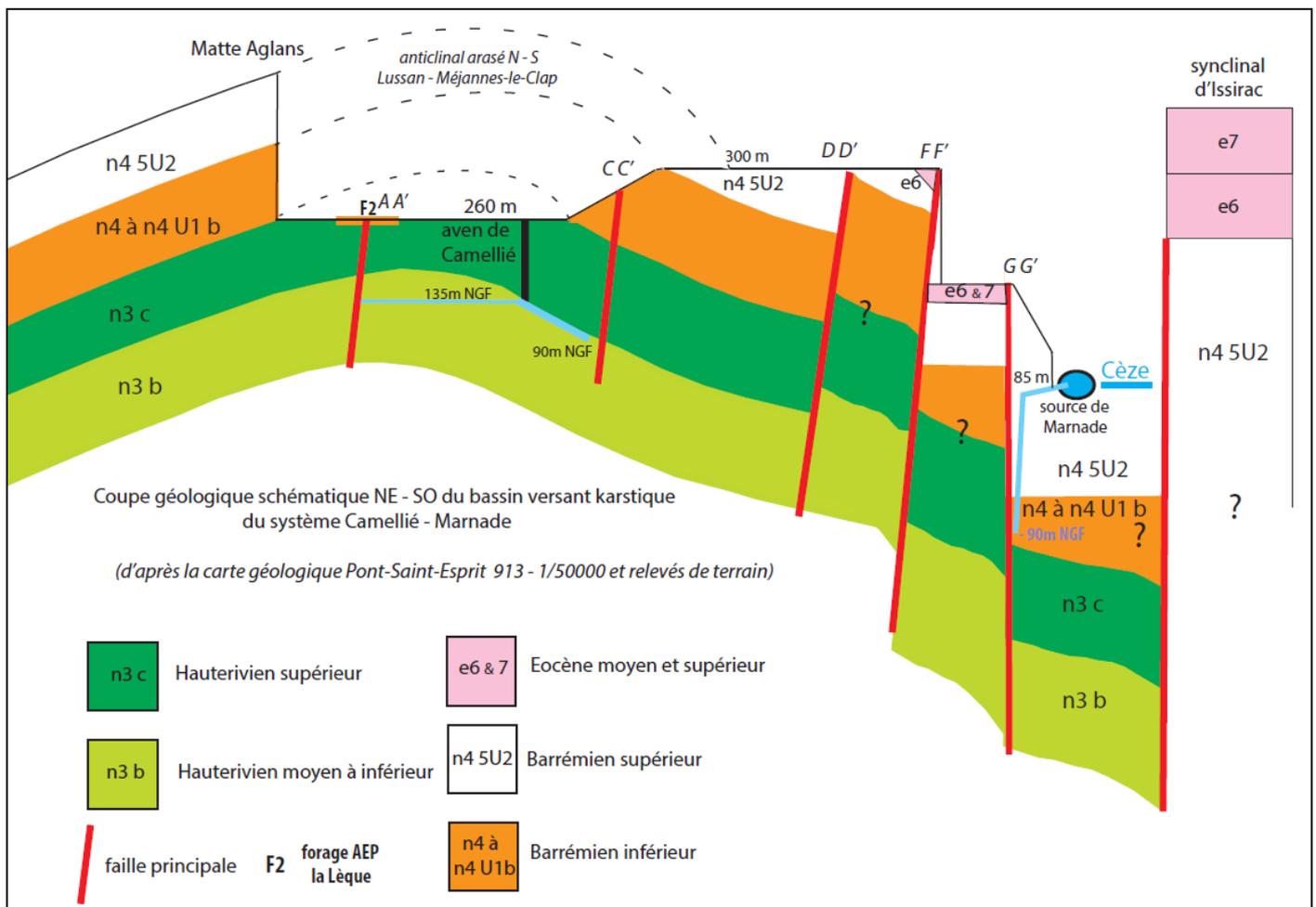


Fig.1 - coupe géologique schématique et interprétative du bassin versant karstique de Camellié - Marnade

3 - Les traçages artificiels :

Les divers traçages réalisés sur ce bassin versant karstique (Jolivet, 2013) caractérisent des zones de continuités tant longitudinales, verticales ou latérales convergentes qui collectent les eaux d'infiltration délimitées par des surfaces d'alimentation induites par les structures géologiques.

Ces colorations supposent un certain nombre de sous bassins karstiques connectés à celui de l'axe principal Camellié-Marnade comme le montre la répartition des lieux d'injection (Tab 2 & Fig.2).

lieu	nature traceur	quantité kg	distance km	date injection	date restitution	temps heures	auteur	institut association
Font d'Higuet	fluorescéine	6	11,00	24/03/1976	21/04/1976	680	Fabre G. et al.	ERA 282 - CNRS
aven de Camellié	fluorescéine	3	8,20	19/05/1968	02/06/1968	325	Pouzancre H. et al.	CERH
aven de Camellié	fluorescéine	4	8,20	22/08/1981	11/10/1981	1200	Guyot J.L. et al.	GSBM
aven Jeanine	fluorescéine	5	6,70	13/03/1969	25/03/1969	278	Fabre G. et al.	ASN
aven des Pères	fluorescéine	1	4,75	31/03/1981	05/04/1981	120	Jolivet J. et al.	Equipe 30 - INRA
aven du lac Froid	fluorescéine	5	5,85	13/03/2011	23/03/2011	240	Jolivet J. et al.	Espace 7300-CNRS
bassin de rétention de Méjannes-le-Clap	fluorescéine	10	7,78	18/05/2018	28/05/2018	252	Jolivet J. et al.	ZABR-Cèze

Tab.2 - récapitulatif des traçages réalisés sur le plateau de Méjannes-le-Clap.

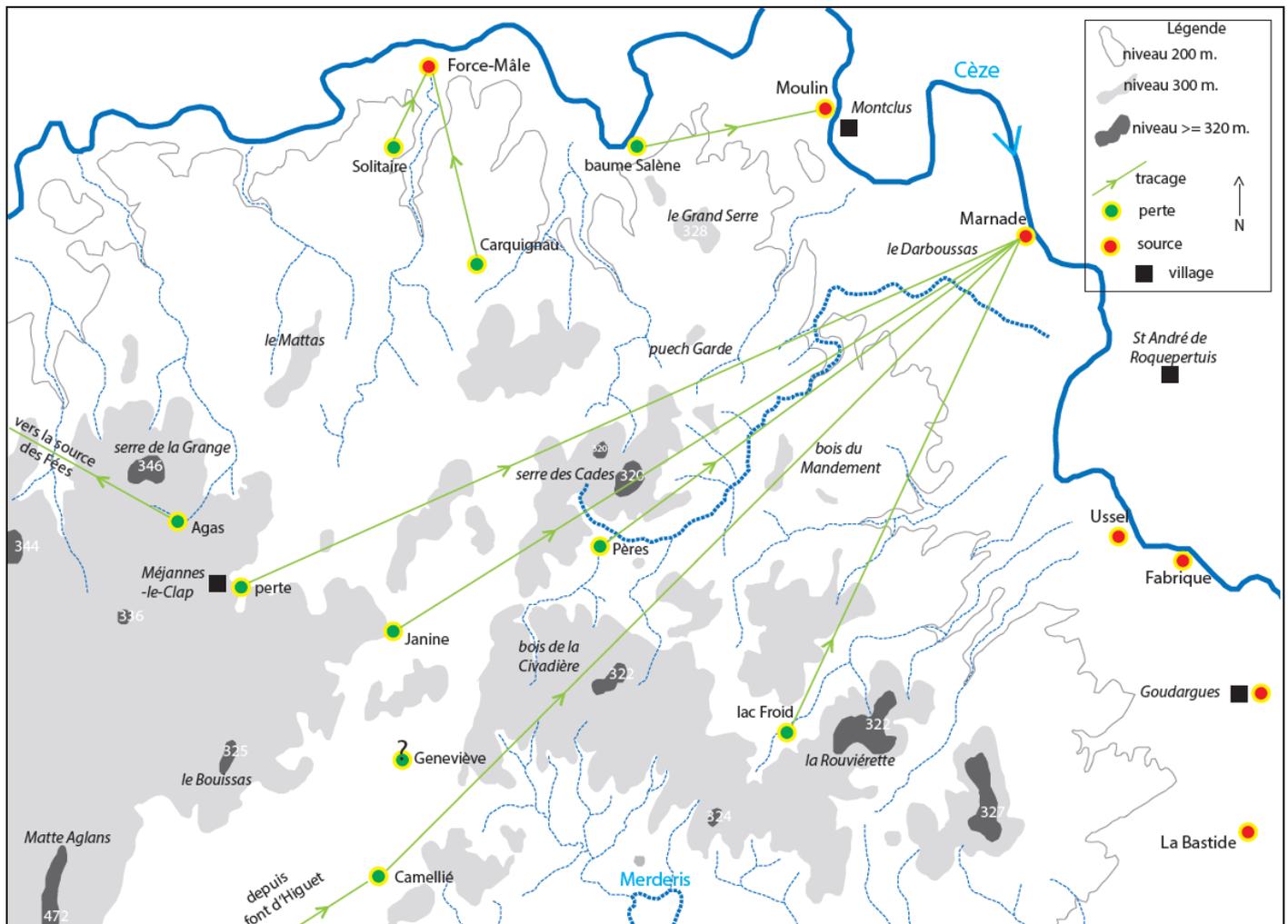


Fig.2 - représentation simplifiée des tracages par une ligne droite reliant un lieu d'injection à un point de restitution.
 Carte des tracages réalisés sur le plateau de Méjannes-le-Clap.
 La coloration de l'aven Geneviève n'a pas été retenue dans le cadre de cette étude en raison d'interprétations contradictoires sur sa réalisation et la très faible quantité de traceur utilisé.
 (d'après la carte géologique 1/50000 - 913)

4 –Hydrochimie :

Le bassin versant karstique de Camellié et de Marnade est alimenté exclusivement par les eaux de pluie comme le montrent les éléments chimiques de type Na^+ , Cl^- ou SO_4^{2-} ou isotopiques comme $\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$. L'altération des roches calcaires et silicatées devient le processus majeur qui contrôle la chimie des eaux (Lavastre et al., 2020).

Pour la rivière de Camellié, les débits ne sont pas connus. La source de Marnade montre de fortes variabilités de débit en fonction des aléas pluvieux saisonniers qui lui confèrent un rôle d'exutoire de trop plein. Ces fluctuations ont été mesurées de 10 jusqu'à 450 L/s voire exceptionnellement à 43 m³/s lors d'une crue violente (Jolivet, 2013). Elles sont notamment dues à la taille du bassin versant karstique et à sa configuration géologique. La mobilisation des eaux de l'épikarst et/ou de l'endokarst ainsi que le type de fonctionnement hydrodynamique souterrain, ici libre et fortement capacitif.

La source de Marnade possède une eau à 95% d'origine karstique et donc avec très peu de relation avec la rivière Cèze (Chapuis, 2020). Un module annuel sur le volume total transité à la source, réalisé entre 2010 et 2011, donnait 1.7*10⁷ m³/an. En cas d'étiage extrême, même si les débits de la source ne sont pas visibles et non quantifiables, l'eau circule en sous écoulement et réurge par des "boulidous" en aval dans le lit de la rivière Cèze.

Les analyses chimiques des deux entités karstiques en comparaison avec celles de la rivière Cèze montrent un pôle carbonaté spécifique d'une eau karstique. Peu de variations apparaissent entre les deux points d'eau en raison des mélanges au sein de l'endokarst (Tab.3).

La présence de Mg et Sr en plus grande proportion dans l'eau du forage de la Lègue provient des calcaires des séries de l'Hauterivien moyen/inférieur et du Barrémien inférieur (Tab.1).

mg/L	Ca	Mg	Na	Sr	SO4	HCO3	EC à 25°C (µS/cm)
Forage la Léque	121,7	5,5	3,2	0,82	9,8	342	590
Marnade	128,2	2,4	3,6	0,42	8,9	358	620
Cèze (pt Courau)	75,0	5,9	4,4	0,99	33,6	184	370

Tab.3- moyenne analytique sur 3 échantillons : éléments chimiques les plus variables entre les points de prélèvements amont et aval du réseau Camellié - Marnade en comparaison avec l'eau de la Cèze.

La source de Marnade se démarque par une très faible activité en ^{222}Rn (245 Bq/m³) contrairement à certaines autres résurgences qui sourdent à la périphérie de la Cèze. Ses eaux sont très probablement influencées par un important dégazage en milieux hypogés et/ou par la présence de bassins souterrains qui induisent une forte diminution du rapport surface/volume dans l'échange eau – roches (Radakovitch et al, 2018).

5 - Surface du bassin versant karstique Camellié – Marnade:

La surface du bassin versant karstique a pu être calculée par :

- la relation pluie efficace / débit durant un module annuel à partir de nombreux jaugeages permettant d'établir des courbes de tarage réalisées à la source de Marnade ainsi que des données de précipitation d'un pluviographe installé à proximité.
- à partir du périmètre établi par le relevé des fracturations en surface et de la situation géographique des points d'injection.

Les résultats donnent des surfaces respectives de 25,5 et 26,5 km² corroborant ainsi la pertinence des mesures (Fig. 3).

6 – Les phases d'évolution de creusement :

Les étapes de creusement de l'aven de Camellié et de la source de Marnade ainsi que celles du canyon indigène du Merderis sont étroitement liées à celles de la Cèze (Jolivet et al, 2011). A partir de la surface d'aplanissement, ce processus est assujéti à un hydrodynamisme souterrain couplé à une géodynamique dans la masse calcaire différée dans le temps en raison de l'architecture évolutive du bassin rhodano-provençal miocène interférant successivement sur les niveaux de base régionaux puis locaux durant le Néogène.

La justification du Messinien dans la formation des gorges de la Cèze, de ses canyons périphériques ainsi que des cavités, en particulier de l'aven de Camellié, ne s'applique nullement à ce concept d'évolution.

Les étagements de ce dernier montrent des enregistrements morphologiques de drains horizontaux, parfois de fort diamètre, qui dénotent, malgré leur colmatage partiel, des gradients hydrodynamiques modérés sous conditions subtropicales humides. Seuls quelques puits de liaison de faible profondeur peuvent marquer des phases modestes d'incision descendantes ou ascendantes.

Dans les galeries reconnues et parcourues par la rivière hypogée, les zones noyées ont de faibles niveaux hydrostatiques malgré les fracturations qui recoupent son parcours.

La grotte Astruc dont la galerie principale est de facture syngénétique et l'aven du Facteur sont des anciens et vastes drains, aujourd'hui fossiles, décalés et déconnectés par rapport aux écoulements actuels du système Camellié - Marnade (Fig.3).

Les changements directionnels et les phases d'enfoncement sont à relier avec celles générales de la rivière Cèze au cours du Néogène (Jolivet et al.,2008).

Pour Marnade, la formation des siphons n°1et n°2 peut se rattacher à l'interface entre les deux stades de l'évolution de l'événement Messinien tandis que le siphon n°3va être impacté par une karstification profonde qu'engendre la seconde phase d'incision majeure correspondante à l'assèchement de la Méditerranée.

Cette dernière étape va permettre l'incision régressive de la Cèze jusqu'à la hauteur du village de St André de Roquepertuis provoquant des déformations verticales que favorise un déséquilibre isostatique régional et la continuation du soulèvement du Massif Central (Jolivet et al, 2023).

Le comblement de la ria éponyme par une aggradation des dépôts du Pliocène va faire remonter les niveaux de base régionaux et locaux et par contre coup ceux des phréatiques karstiques. Les positionnements altimétriques de ces sédiments montrent une instabilité générale réorganisant et agençant des structures en distension N-S à NE-SO suite aux soubresauts des contraintes alpines plio-quadernaire (Jolivet et al, 2023).

7 –Conclusion :

Le contexte géologique relié aux paléoclimats, est primordial dans la compréhension de l'évolution et du fonctionnement hydrologique du bassin versant karstique du système souterrain - rivière de l'aven de Camellié - source de Marnade.

Depuis la surface d'aplanissement déformée durant le Néogène et une partie du Quaternaire jusqu'au transfert d'eau souterraine entre l'aquifère karstique et les formations du Pliocène malgré la présence de niveaux argilo-sableux et à marnes bleues plutôt imperméables, cette dernière conflictualité a régulé une spéléogénèse spécifique à l'établissement d'un vaste réseau de conduits exondés à inondés.

Bien que partiellement exploré, le système n'a pas encore été complètement reconnu dans ses parties amont et médiane du système.

Le contraste de fonctionnement et de morphologie entre les deux entités karstiques montre l'influence des diverses natures des calcaires du Crétacé inférieur et d'une tectonique dont les effets sont répartis de façon hétérogène dans la masse carbonatée soumise aux déformations globales.

Cette organisation a induit un gradient hydraulique peu conventionnel dans le sens où la grande partie de son écoulement se dirige vers le NE alors que le niveau de base de la Cèze est lui de direction NO.

Ce constat peut être imputé à :

- des contraintes directionnelles subies par le cours d'eau souterrain selon les failles NE-SO qui le guident en grande partie délimitant ainsi le périmètre du bassin versant karstique. (Fig.3).
- les affaissements en paliers des failles NO-SE ne peuvent qu'influer sur les zones noyées profondes par leur décrochement et modifient substantiellement la direction d'écoulement vers NNE en aval du système. (Fig.1)
- des contacts stratigraphiques qui sont orientés généralement vers le NE.
- l'aggradation des terres du Pliocène dans la basse vallée de la Cèze et ce jusqu'à St André de Roquepertuis qui provoque une désorganisation spatiale et un blocage partiel du phréatique karstique, d'où le rôle de trop plein de la source de Marnade.
- d'après les colorations, la probabilité d'un fonctionnement en plusieurs sous bassins karstiques alimente le système. Les sorties d'eau dans le lit de la Cèze en aval de la source de Marnade montrent une évolution en cours du gradient hydraulique du phréatique karstique vers le SE.

En conclusion, cette étude montre que le creusement de la rivière Cèze a évolué plus rapidement du fait de sa position extérieure avec un bassin d'alimentation bien plus grand contrairement à celui plus restreint du système karstique Camellié-Marnade dont le confinement hypogé minimise les débits et volumes d'eau les rendant bien moins incisifs en pleine roche.

Fig.3 - carte générale du bassin versant karstique de Camellié - Marnade en nuance de bleu.
En vert, bassin versant karstique périphérique. (d'après la carte géologique 1/50000)

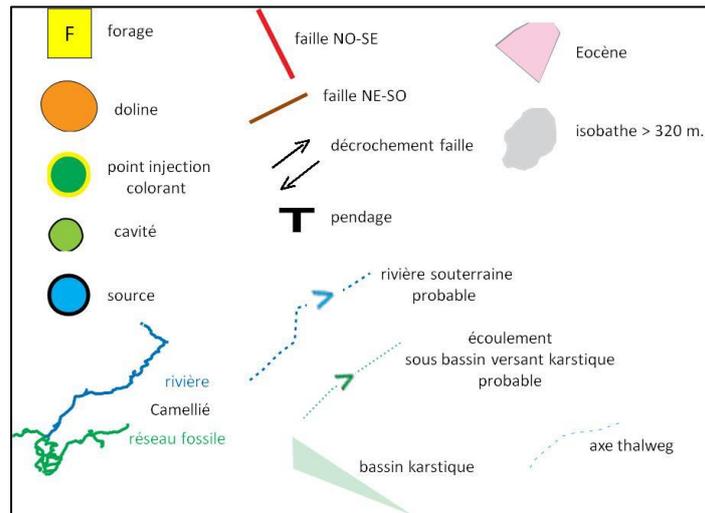


Fig.3a - légende de la figure 3.

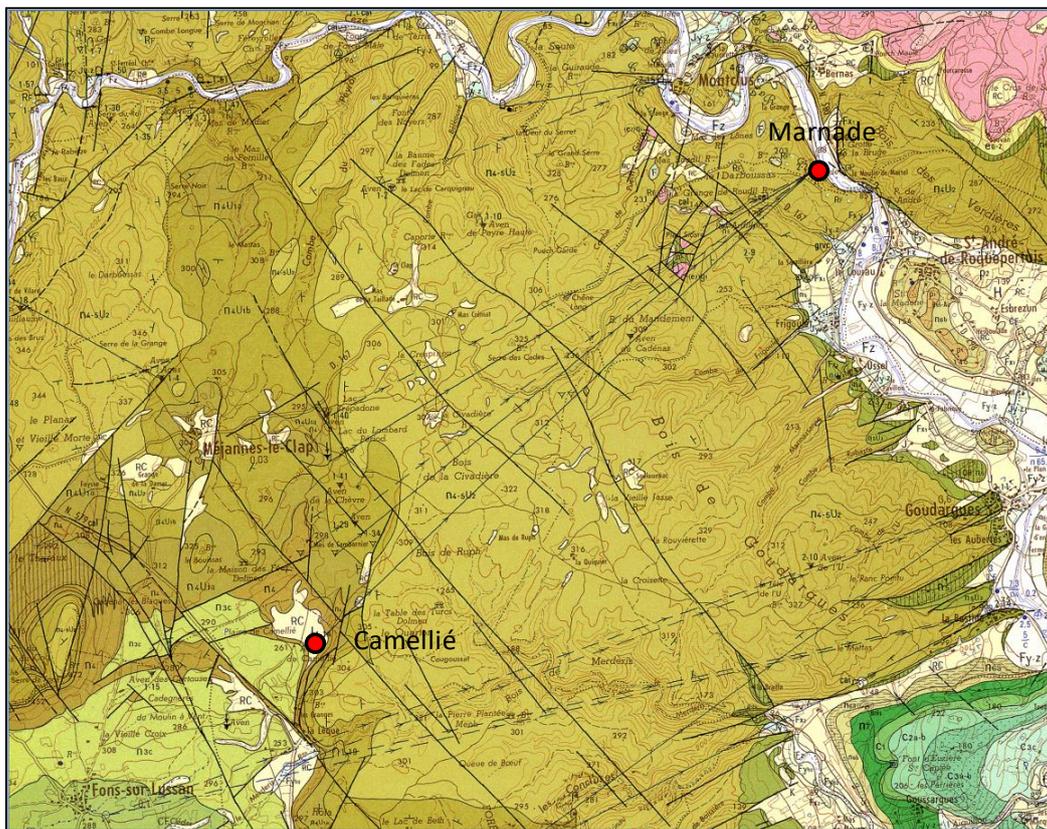


Fig.4 - extrait de la carte géologique initiale (913) au 1/50000

Note :

*L'orthographe du nom Camellié a souvent changé au cours des temps - la graphie usitée est celle de la dernière mouture de la carte IGN.

** BSS : Banque du Sous-Sol - Info Terre - BRGM.

Bibliographie :

Bagarre C., Brahic R., Huttler R., Vasseur F. et Wienin M., (2002) - *l'aven de Camellié* - Spelunca n° 85, 1er trimestre, p. 29 à 38.

Chapuis H., Ré-Bahuaud J., Jolivet J., Paran F., Pascoletti Y. (2020) - *Suivi hydrologique des sources karstiques et de la rivière Cèze*. Karstologia, 2020, 75, pp.17 à 24.

Jolivet J., Martin C., (2008) - *La morphologie karstique dans le canyon de la Cèze et sur le plateau de Méjannes-le-Clap (Garrigues nord, Gard, France) - Rapports avec l'évolution paléogéographique mio-pliocène* - Physio-Géo, Etudes de géographie physique n° XXXV p. 53-75.

Jolivet J. (2011) - *Comparaison de l'évolution endokarstique du réseau de Camélié avec le creusement des canyons de l'Aiguillon et du Merderis (Bassin de la moyenne vallée de la Cèze, Gard, France)* - Physio-Géo, Etudes de géographie physique n° XXXVIII p. 43-54.

Jolivet J. (2013) - *Nouveaux apports sur les traçages et les débits réalisés sur le bassin d'alimentation karstique de la bordure orientale du massif de Lussan (canyon de la Cèze, Gard, France)* - Spelunca n° 129, 2013 p. 27 à 34

Jolivet J., Chapuis H., Re-Bahuaud J., Graillot D., Guy B., Van den Broeck E. (2017) - *Evolution paléogéographique et karstogénèse du bassin d'Issirac (Gard, France) du Crétacé supérieur au Miocène inférieur* - HAL, hal.science/hal-01612184

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-emse.ccsd.cnrs.fr/emse-03710478.

Jolivet J., Peuble S., Paran F., Gallice F., Van den Broeck E., Graillot D. (2023) - *Formation du canyon de l'Ardèche en analogie avec l'endokarst de sa plateforme urgonienne périphérique durant le Néogène (Ardèche, France): comparaison avec les vallées du Rhône et de la Cèze*. - HAL-emse.ccsd.cnrs.fr/emse-04357712.

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

Lavastre V., Ré-Bahuaud J., Chevet J., Peuble S., Graillot D., Jolivet J. (2020) - *Approche géochimique pour la caractérisation des interactions entre eaux de surface et eaux souterraines en milieu karstique : domaine du canyon de la Cèze (Gard, France)* - Karstologia n°75, 2020, p. 41 à 50.

Méniscus X., (2023) - *Exploration de la source de Marnade, film de la plongée du 29 mars 2023* - [youtube.com/watch?v=-KY8jGYUEjg](https://www.youtube.com/watch?v=-KY8jGYUEjg)

Radakovitch O., Mayer A., (2018) - *Quantification des échanges eaux souterraines - rivière à l'aide du radon. Étude pilote appliquée à la Cèze* - Rapport final, janvier 2018, action n°49 du Programme 2010 au titre de l'accord cadre Agence de l'Eau - ZABR Cèze.

Thomas A. (2022) - *Géométrie de la progradation urgonienne et propriétés pétrophysiques des différents faciès (Vercors, France)* - Thèse, Science de la Terre, Université de Lorraine