

Philippe AUDRA^{1,2},
Jean-Yves BIGOT²
et Jean-Claude
NOBÉCOURT²

(1) Université Côte d'Azur,
Polytech'Lab - UPR 7498,
930 route des Colles,
F-06903 Sophia-Antipolis
Philippe.AUDRA@
univ-cotedazur.fr

(2) CRESPE, Vence

Hydrologie du karst en bande nummulitique du système de la Lare (Saint-Benoît, Alpes-de-Haute-Provence) Interprétation de traçages et de suivis hydrologiques

RÉSUMÉ : Le système karstique de la Lare (Saint-Benoît, Alpes-de-Haute-Provence) s'étend entre le Var et le Coulomp en amont de leur confluent, du pont de la Reine Jeanne (alt. 561 m) jusqu'à plus de 2000 m d'altitude. Il est constitué par une étroite bande de calcaires nummulitiques, surmontant des marno-calcaires crétacés et en grande partie recouverts par les marnes priaboniennes et les grès d'Annot. Écoulement et infiltration varient selon l'état hydrologique, avec des pertes partielles lorsque les ruissellements issus d'amonts peu perméables traversent la bande de calcaires nummulitiques. Deux exutoires principaux drainent le secteur : la source captée du ravin du Fontanil à Castellet-lès-Sausses dans les marno-calcaires crétacés, et les exutoires du système de la Lare à Saint-Benoît, à l'extrémité aval de l'éperon de calcaires nummulitiques. Cet éperon recèle notamment la grotte de la Lare, un drain fossile étagé de plus de 2,5 km de développement, hérité du Pliocène (datation cosmogénique à 2,2 Ma). Deux traçages ont été réalisés en 2019 et 2020 dans un écoulement recoupé par la grotte du Brec, située à 1095 m d'altitude dans la bande des calcaires nummulitiques. Le premier traçage à l'Amino G a montré l'absence de connexion avec le captage du Fontanil de Castellet, pourtant très proche. Le second traçage à la fluorescéine a mis en évidence une liaison avec les exutoires du système de la Lare distants de 5,4 km, ainsi que l'indépendance de sources secondaires voisines. La vitesse lente du traceur (10,7 m/h) est liée aux conditions hydrologiques en tarissement, mais le très faible étalement du pic de restitution atteste d'une structure karstique bien hiérarchisée, à l'image des drains fossiles et actifs connus.

Le bassin d'alimentation du captage du ravin du Fontanil de Castellet correspond au versant marno-calcaire de la partie la plus élevée. Pour le système de la Lare, son bassin d'environ 14 km² intègre d'une part la contribution autochtone de la bande des calcaires nummulitiques remontant jusqu'au col du Fâ (1 km²), d'autre part l'apport partiel des surfaces peu perméables environnantes (13 km²). Cette contribution allogène est surtout effective en hautes eaux, par l'intermédiaire de pertes partielles des ravins lors de la traversée de la bande nummulitique. Ce dispositif est caractéristique d'un karst en bande, où la recharge est principalement allogène. Le suivi hydrologique des sources révèle effectivement des pics de crues turbides, directement associés à la contribution de pertes proches. La ressource hydrique est globalement de bonne qualité du fait de la faible pression anthropique sur le bassin, avec des contaminations bactériologiques limitées aux périodes de crue. Elle assure durablement l'alimentation de Castellet pour la source du ravin du Fontanil. Pour le système de la Lare, l'aquifère ici fortement karstifié peut représenter une ressource future valable pour Saint-Benoît, complémentaire à la partie fissurale du reste de l'aquifère nummulitique et des ressources gravitaires limitées.

MOTS-CLEFS : traçage, fluorescéine, karst en bande, calcaires nummulitiques, système de la Lare, grotte du Brec, hydrodynamique, hydrogéologie.

ABSTRACT: HYDROLOGY OF THE STRIPE KARST OF THE LARE SYSTEM (SAINT-BENOÎT, ALPES-DE-HAUTE-PROVENCE, FRANCE). INTERPRETATION OF DYE TRACINGS AND HYDROLOGICAL MONITORING. The Lare karst system (Saint-Benoît, Alpes-

de-Haute-Provence, France) is located in the area comprised upstream to the confluent of Var and Coulomp rivers, from Reine Jeanne bridge (561 m asl.) up to the Mourre Frey summit (2027 m asl.). It is constituted of a narrow stripe of Nummulitic limestones, covering Cretaceous marly limestone and partly buried under the Priabonian marls and the Annot sandstones. In dry period, water entirely infiltrates in the Cretaceous marly limestones of the Mourre Frey, however surface runoff prevails in wet periods. Similarly, surface runoff on the Priabonian marls mainly occurs during wet periods. These runoffs cross the Nummulitic limestone stripe, where they may partly swallow. Two outlets are located in the area: in the Cretaceous marly limestones, the captured spring of the Ravin du Fontanil at Castellet-lès-Sausses, and at the downstream part of the nummulitic limestones spur, the springs of the Lare System at Saint-Benoît. This spur includes the Lare Cave, an abandoned main drain of more than 2.5 km of development, inherited from the Pliocene (cosmogenic dating at 2.2 Ma). Two dye tracings were performed in 2019 and 2020, using a small underground flow intersected by the Brec Cave, which is located at 1095 m asl., below the Col du Fâ, along the nummulitic limestone stripe. A first tracing using Amino G demonstrated the absence of connection with the captured spring of the Ravin du Fontanil of Castellet, which is however located in the close vicinity. The second tracing using fluorescein evidenced a connection with the outlets of the Lare System, located 5.4 km away, and also the independence of nearby secondary springs (Fontani of Saint-Benoît and Tunnel springs). The low velocity of the tracer (10.7 ml/h)

reflects the hydrologic drought condition. However, the short time of concentration of the breakthrough curve reveals a very hierarchized karst structure, such as those observed in the fossil and active known cave passages. The defined catchment areas correspond for the captured spring of Ravin du Fontanil at Castellet to the marly limestone slope of the Mourre Frey. For the Lare System, its catchment covers about 14 km². It is constituted firstly by the autochthonous contribution of the nummulitic limestone stripe, which extends up to the Col du Fâ (1 km²). Secondly, by the marly

limestone areas of the Mourre Frey and by the marls comprised between the Clot Martin sandstone crest and the nummulitic ledge. This allogenic contribution mainly occurs during high water, through partial and diffuse losses in swallow holes, when the streams cross the nummulitic stripe. Such configuration is characteristic of stripe karst, where recharge is mainly allogenic. Hydrologic monitoring of the springs clearly shows turbid flood peaks, directly connected to swallow holes located in the vicinity. Pumping in the Lare System as shown a direct hydraulic interconnection between

all outlets. The hydric resource is generally of good quality thanks to the diffuse uses on the catchment, with only bacteriological contamination limited to the flood periods. This resource sustainably provides water for Castellet through the spring of Ravin du Fontanil. For the Lare System, the aquifer, which is here intensively karstified, could constitute a valuable future resource for Saint-Benoît, in addition to the present resources.

KEY WORDS: dye tracing, fluorescein, stripe karst, Nummulitic limestones, Lare System, Brec Cave, hydrodynamic, hydrogeology.

Introduction

La délimitation des bassins d'alimentation des sources karstiques est un exercice difficile, notamment en raison de la fréquente non-adéquation entre bassins versants topographiques et hydrogéologiques. L'exercice devient encore plus délicat en présence de structures géologiques complexes, combinées à des modalités de recharges variées. Les Alpes de la Haute-Provence reflètent bien ce type de problématique, avec des structures héritées d'une histoire géologique complexe, et surtout des affleurements karstiques mal individualisés. Cette partie méridionale des Alpes ne ressemble pas aux grands entablements calcaires formant des reliefs en bastions comme dans d'autres régions tels les Causses ou les Préalpes du Nord. Elle est caractérisée par des ensembles de calcaires plus ou moins marneux qui compliquent singulièrement la compréhension de son fonctionnement hydrogéologique. La difficulté tient d'une part aux types particuliers d'écoulements superficiels, et d'autre part aux affleurements plus ou moins couverts par des formations peu perméables.

En effet, selon la proportion d'insolubles, le comportement hydrogéologique de ces ensembles calcaires présente toutes les transitions possibles entre l'imperméable, une perméabilité seulement partielle avec des écoulements de surface lors de fortes pluies, et un comportement typiquement karstique. Il n'est ainsi pas évident de déterminer a priori si un affleurement carbonaté contribue ou non à de l'écoulement karstique. La source du Coulomp en est un bon exemple, avec un vaste bassin ($\approx 35 \text{ km}^2$) qui alimente la plus impor-

tante source karstique des Alpes du Sud débitant plus de 1 m³/s, avec des amonts gréseux et argileux ; l'essentiel du bassin dans des calcaires marneux à infiltration diffuse est dépourvu des morphologies karstiques classiques, avec des torrents temporaires ou permanents. Un réseau karstique majeur de 14 km, la grotte des Chamois, se développe dans la tranche basale la plus calcaire de moins de 50 m d'épaisseur [Audra & Nobécourt, 2013].

L'autre difficulté est due aux calcaires des Alpes du Sud fréquemment couverts par des formations peu perméables (marnes, grès...) situées en amont topographique. Les dispositifs présentent parfois des cas extrêmes où les affleurements calcaires sont réduits à leur seule tranche le long de parois encadrées dans ce cas, les écoulements de surface issus des amonts imperméables viennent au contact des calcaires, qu'ils traversent la plupart du temps, sans qu'il soit possible d'établir clairement s'il existe des pertes partielles lors de la traversée du calcaire, surtout lorsque les alluvions issues de l'amont tapissent les talwegs et les fissures. Il s'agit de « karsts en bande » typiques [*stripe-karst* au sens de Lauritzen, 2001], correspondant à des affleurements karstiques de surface limitée, en bandes étroites et très allongées, cas extrême des karsts de contact [Mihevc, 1994]. La part de l'alimentation allogène par le biais de pertes au contact des calcaires est largement majoritaire, et le drainage souterrain s'organise dans ces minces bandes calcaires, parfois sur de grandes distances.

Contrairement aux autres secteurs des Alpes-de-Haute-Provence, qui restent en grande partie peu connus du point

de vue hydrogéologique et des réseaux karstiques significatifs, le système de la Lare (Saint-Benoît) développe un réseau fossile sur plus de 2 km remontant à partir des points d'émergence localisés près de la clue du pont de la Reine Jeanne [Audra & Bigot, 2005 et 2009]. De plus, des cavités importantes ont été récemment reconnues sur ses hauts versants, notamment la grotte du Brec située à Castellet-lès-Sausses, à plus de 5 km et 500 m de dénivellation au-dessus du point d'émergence [Audra, 2019]. Elle recèle en particulier un écoulement souterrain important permettant d'envisager des traçages. Une première tentative d'établir une liaison avec la source captée toute proche du ravin du Fontanil s'est soldée par un échec. Il apparaissait alors que la grotte du Brec pouvait constituer un élément en liaison avec le système de la Lare, qui bien qu'assez éloigné, pouvait être alimenté par la longue bande de calcaires nummulitiques, encadrée dans des marnes. Cette bande calcaire s'étire depuis l'aval au pont de la Reine Jeanne, jusqu'au col du Fâ, en passant par la grotte du Brec.

Un traçage depuis la grotte du Brec devenait alors envisageable, avec surveillance des sources de la Lare, non suivies lors de la première tentative du fait de son éloignement comparativement à la source toute proche du ravin du Fontanil. Ceci pour deux raisons, la première pour démontrer la liaison pressentie, et la deuxième pour mieux comprendre le fonctionnement hydrogéologique du karst en bande nummulitique et des affleurements marneux environnants (alimentation binaire). Comme lors de la première tentative de traçage, le point d'émergence présumé du système de la

Lare a été équipé d'un fluorimètre assurant une surveillance continue pendant une période assez longue et l'établissement d'une courbe de restitution nécessaire à la compréhension des modalités de circulation. Les points de sortie annexes ont été surveillés par flaonnages réguliers, et la fluorescéine a été retenue en tant que traceur puissant, peu sujet à l'absorption des argiles, pouvant être détecté après un long cheminement et une dilution en zone saturée.

Dans une première partie, nous détaillerons les caractéristiques topographiques et géologiques du secteur étudié, et ferons le point sur les connaissances antérieures en matière d'hydrogéologie et d'organisation des réseaux karstiques. Après une revue détaillée des méthodes employées, les résultats des deux traçages et du suivi hydrologique associé seront exposés. La discussion portera sur

l'apport des deux traçages, la compréhension des modes d'alimentation binaires de son bassin étendu, la dynamique des écoulements souterrains apparaissant au cours des périodes de suivi, et enfin la vulnérabilité et les modalités de protection de cette importante ressource hydrique locale.

I. Site d'étude

A. Contexte topographique et structural

Ce secteur d'étude des Alpes-de-Haute-Provence s'étend sur les communes de Saint-Benoît pour l'aval, et de Castellet-lès-Sausses pour l'amont (figure 1). Il est compris entre le Var et son affluent le Coulomp, au nord-ouest de leur confluent à la clue du pont de Gueydan (alt. 523 m). Il culmine au nord sur le sommet de Mourre Frey (2027 m),

situé au-dessus du col du Fâ (1320 m). La topographie s'abaisse vers le sud, selon un large vallon raviné de « robines » (ravines, ou *bad-lands*), jusqu'au pont de la Reine Jeanne enjambant le Coulomp (alt. 561 m). Ce large vallon est délimité à l'ouest par les crêtes gréseuses du Clot Martin (1522 m), et à l'est par la barre de calcaires nummulitiques de la Lare qui se prolonge jusqu'à Castellet, dont la crête ondule entre 700 et 950 m d'altitude. Le versant oriental de cette crête domine la vallée du Var. Hormis les deux grandes vallées périphériques du Var et du Coulomp, le secteur n'est drainé que par de petits ruisseaux, bien souvent temporaires, partagés en deux sous-bassins, dirigés pour la partie nord amont vers la clue du pont de Gueydan sur le Var, et pour la partie sud aval vers la clue du pont de la Reine Jeanne sur le Coulomp.

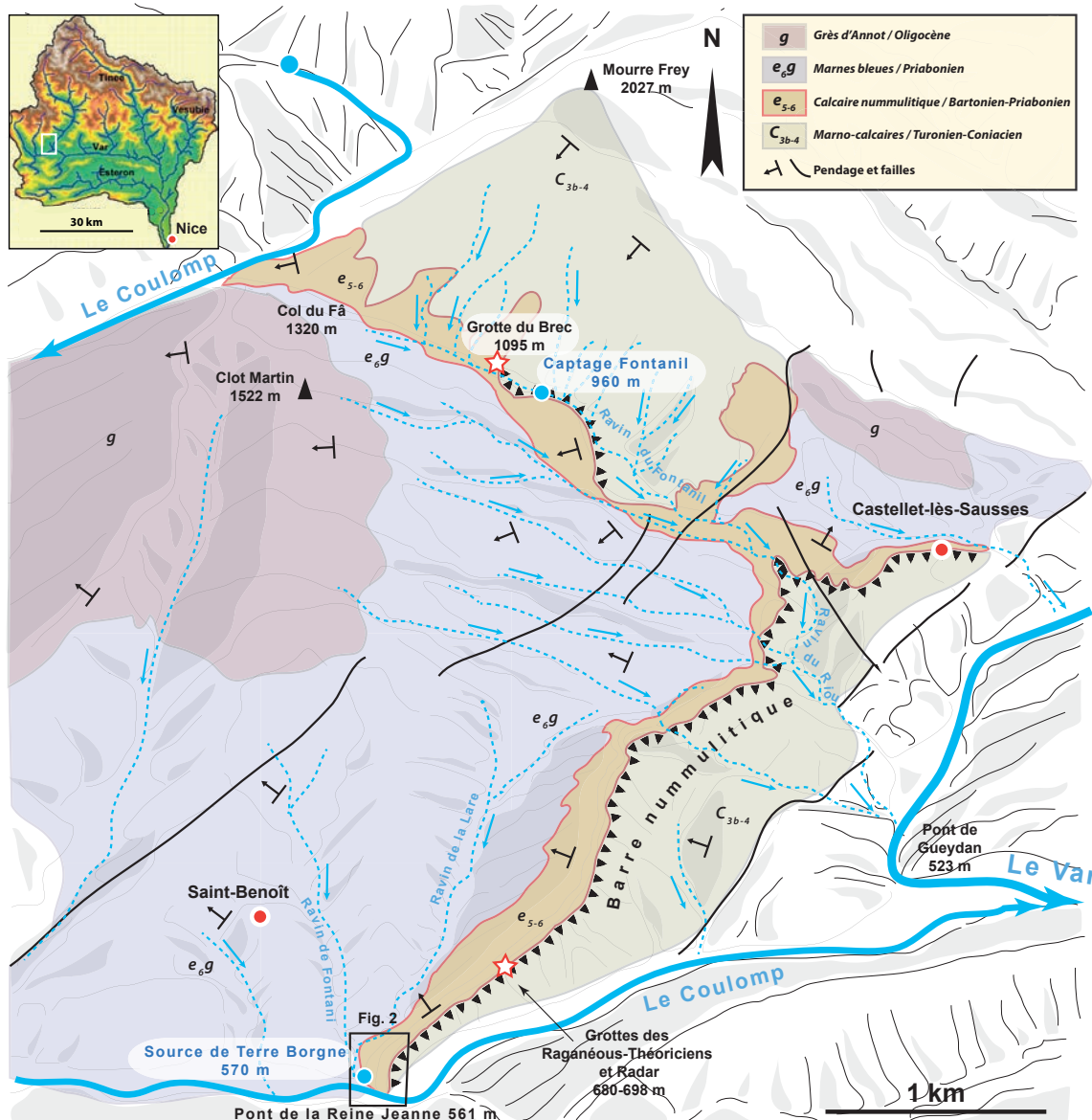
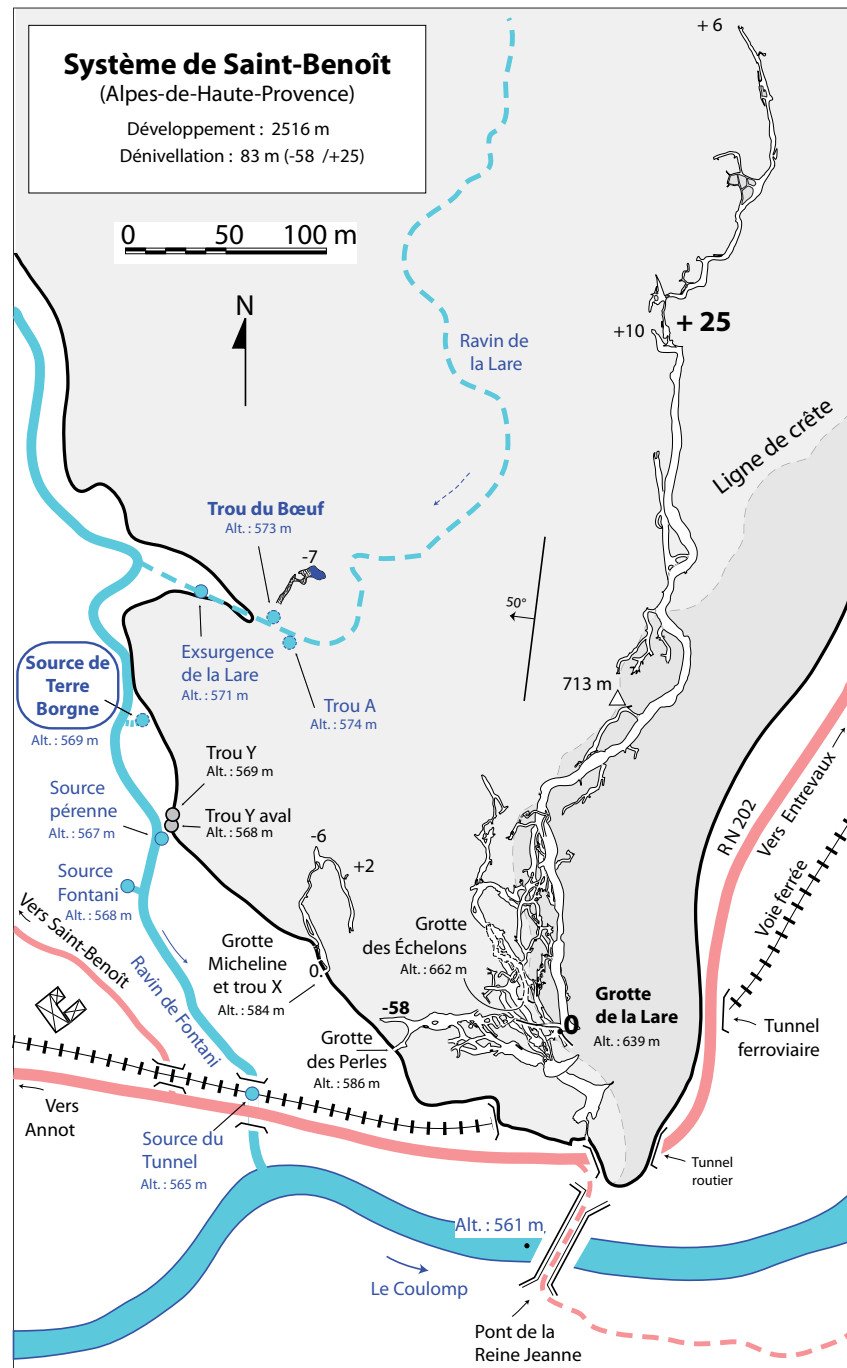


Figure 1: Contexte topographique et structural du secteur d'étude. L'encadré situe la zone d'étude dans le bassin versant du Var. Topographic and structural context. The study area is located in the frame showing the Var River catchment.

Le secteur se localise à l'extrémité sud-est de la branche occidentale de l'Arc de Castellane, dont la flèche est matérialisée par le faisceau décrochant sénestre de Rouaine, jalonné ici par les failles NE-SO passant au-dessus de Saint-Benoît et Castellet-lès-Sausses [Kerckhove et Roux, 1976]. Les pendages dirigés vers le sud pour la partie septentrionale et vers l'ouest pour la partie méridionale correspondent au volet interne de la terminaison du synclinal d'Annot (figure 1). D'est en ouest et depuis la base, la série stratigraphique est représentée par :

- les calcaires marneux du Crétacé supérieur (C_{3b-4} , Turonien-Coniacien) localisés sur les versants bordant le Var, et se relevant au nord sur le flanc du volet synclinal pour

Figure 2: Plan d'ensemble des exutoires environnant la grotte de la Lare (localisations des exutoires d'après Siffre [1956]; cartographie d'après Audra & Bigot [2009], modifiée).
Map of the springs surrounding the Lare Cave (location of springs after Siffre [1956]; mapping after Audra & Bigot [2009], modified).



- former des crêtes à plus de 2000 m d'altitude, notamment à Mourre Frey ;
- la barre des calcaires nummulitiques (e_{5-6} , Bartonien-Priabonien), épais de 30 à 70 m, armant les paysages du secteur et dominant ici la rive droite du Var ;
- les marnes puis les argiles bleues (e_{6-g} , Priabonien) qui couvrent la majorité de la surface du large vallon N-S sculpté de robines descendant du col du Fâ vers Saint-Benoît ;
- enfin les grès d'Annot (g, Priabonien-Rupélien), formant la corniche sommitale du Clot Martin à l'ouest.

En somme, si l'on s'affranchit des complexités locales, le secteur se présente sous la forme d'une structure monoclinale arquée, plongeant globalement vers le SO.

B. Hydrogéologie

Dans la partie nord, des ruissellements temporaires parcourent les hauts versants. Sur les flancs des marno-calcaires crétacés de Mourre Frey, l'infiltration est diffuse, tandis qu'en période humide les ruissellements atteignent le fond du vallon descendant du col du Fâ. Sous le Clot Martin, l'aquifère des grès d'Annot permet le maintien de petits écoulements d'étiage, grossis en période de pluie par les multiples ravins entaillant les marnes priaboniennes. Ces deux contributeurs traversent la bande étroite des calcaires nummulitiques, où l'on soupçonne des pertes diffuses dans les fissures occultées par les alluvions marneuses, qui alimenteront l'aquifère profond du nummulitique (figure 1). La partie sud offre une disposition similaire, mais le calcaire nummulitique en position haute sur la crête de la Lare n'est traversé par les ruissellements temporaires que dans sa partie basse. L'observation des débits écoulés et l'examen des zones de pertes potentielles dans les traversées des calcaires nummulitiques montrent un comportement complexe : les calcaires crétacés de Mourre Frey absorbent de manière diffuse la totalité des faibles écoulements d'étiage ; dans la partie couverte par les marnes priaboniennes, une faible part du ruissellement est susceptible de s'infiltrer localement lors de la brève traversée des calcaires nummulitiques. En période de fort écoulement, les débits absorbés par les pertes doivent augmenter, mais l'essentiel franchit les affleurements calcaires pour rejoindre le fond des grandes vallées. En l'absence de mesures, qu'il faudrait multiplier sur les différents talwegs et dans les différents contextes hydrologiques, il est impossible de quantifier précisément la part de chaque contribution.

Hormis les petites sources de déversement suintant du haut des versants, à la base des grès au contact des argiles priaboniennes, peu de

points de sortie abondants concernent le secteur. La source du ravin du Fontanil de Castellet (notée « Captage Fontanil » sur la figure 1) jaillit à l'altitude de 960 m, entre le col du Fâ et Castellet, dont elle constitue la principale alimentation en eau potable. Elle sort de fissures dans les marno-calcaires crétacés, localement déformés en une ondulation anticlinale transverse d'axe NO-SE évidée en boutonnière. Son débit est de quelques L/s à l'étiage et d'environ 10 L/s en moyenne, avec des crues bien plus importantes. Son bassin d'alimentation, estimé entre 1,5 et 2 km², correspondrait aux pentes marno-calcaires de Mourre-Frey [Tennevin, 2014].

Une seconde zone d'exutoires regroupe une série de sources localisées en périphérie de l'éperon de la Lare dominant la clue du pont de la Reine Jeanne (figure 2). Ils constituent les exutoires associés au système karstique du même nom [Audra et Bigot, 2009]. Ces sources avaient été précisément identifiées par M. Siffre [1956], lors de sa première étude scientifique, réalisée à l'âge de 14 ans.

Une série d'exutoires étagés environne l'éperon de la Lare, soit d'amont en aval :

- Le trou du Bœuf (alt. 573 m) est le trop-plein le plus élevé. Il s'ouvre dans le ravin de la Lare, où il fonctionne en perte lorsque les écoulements de surface sont modestes. Toutefois, en crue il peut au contraire déverser jusqu'à 2,5 m³/s, en déversant une eau cristalline ou turbide (figure 3). Une série de pompages (L. Catsoyannis & M.-L. Catsoyannis, décembre 2015) ainsi qu'une plongée (Ph. Bertochio, décembre 2017), ont permis de reconnaître un conduit partiellement noyé de largeur plurimétrique, colmaté à 40 m par de gros galets (> 20 cm), attestant de la violence du courant lors des crues.
- Le trou A (alt. 574 m) est situé en face du trou du Bœuf, un peu en amont. C'est un interstrate impénétrable avec écoulement temporaire.
- L'exurgence de la Lare (alt. 571 m), sourd dans les alluvions, en contrebas du trou du Bœuf. Elle n'est décelable que lorsqu'elle est active et que le ravin de la Lare est à sec.
- La source de Terre Borgne [d'après les locaux] ou de Talaborgne [Siffre, 1956] est une vasque de trop-plein en rive gauche du ravin de Fontani de Saint-Benoît (alt. 569 m) (figure 7). Le débit peut dépasser les 100-200 L/s en

crue, et elle tarit à l'étiage jusqu'à se vider entièrement, révélant un puits de 2 m dans les colluvions, d'où son nom. Les habitants proches ont observé ses tarissements et réactivations brutales « sans rapport avec les pluies tombant à proximité », ce qui suggère qu'une partie du bassin est suffisamment éloignée pour induire des réactions différées de quelques jours.

- La source pérenne (alt. 567 m) sourd dans les alluvions du ravin de Fontani de Saint-Benoît, au pied d'un petit éperon de calcaire nummulitique. Elle n'est observable qu'en étiage extrême, lorsque le ravin de Fontani est à sec. Elle ne tarit jamais, mais lors des étiages extrêmes son débit est limité à un écoulement infime. Deux trop-pleins (trous Y), utilisés comme tanière hivernale par les blaireaux, percent le calcaire juste au-dessus.
- La source dite « Fontani » à Saint-Benoît (alt. 568 m) est la seule localisée en rive droite, jaillissant parfois sous pression au travers de la terrasse alluviale, au pied d'un saule (figure 4). Son débit peu variable est de quelques L/s, elle ne tarit que rarement.
- Une série de petites sources sortant en rive droite dans les alluvions du ravin de Fontani, entre Terre Borgne et Fontani, de faible débit mais persistantes alors que Fontani est tari. Leur origine est inconnue, elles pourraient provenir de pertes de l'important écoulement circulant dans le caniveau au sommet du champ voisin.
- La source du Tunnel (alt. 565 m) est une sortie d'eau significative (env. ½ L/s), présente sous le ponceau du train, en rive droite. Elle pourrait correspondre à des pertes du ravin de Fontani entre les sources du système de la Lare et le pont, car sa localisation rend difficile de lui trouver une alimentation autre.

Hormis cette dernière source découverte récemment, l'observation montre un fonctionnement activant ou désactivant les trop-pleins en fonction de la charge hydraulique, depuis la source pérenne à l'aval jusqu'au trou du Bœuf à l'amont. Il



Figure 3: Crue d'environ 2,5 m³/s au trou du Bœuf, le 5 novembre 2005. L'eau est turbide du fait de pertes en amont du système. Cliché J.-Y. Bigot. Flood of about 2.5 m³/s at the Trou du Bœuf, November 5, 2005. Turbidity is related to swallow holes located upstream.

est clair que toutes ces sorties d'eau sont étroitement liées entre elles, à l'exception sans doute de celle de Fontani, localisée sur l'autre rive. Les résultats de cette étude devront confirmer cette hypothèse.

Un forage de 100 m de profondeur avait été réalisé à la Bastide Neuve (aujourd'hui dénommée « Domaine des Sources »), située sur la bordure occidentale basse du synclinal, 2 km à l'ouest des sources de la Lare [Mangan, 2005]. Il traverse les calcaires nummulitiques et le sommet des marno-calcaires crétacés. Les essais de pompage ont attesté l'existence d'un réservoir moyennement productif, limité à quelques m³/h, avec une perméabilité d'ensemble de 0,5.10⁻⁶ m/s, correspondant à un aquifère fissuré. Ceci montre que la karstification n'est pas développée aux environs de ce forage, alors qu'elle est intense et bien visible autour des cavités et des sources de la Lare.

Enfin, dans la partie haute du bassin versant, en contrebas du col du Fâ, se trouve la grotte du Brec (alt. 1095 m). Elle développe 311 m de conduits partiellement actifs dans les calcaires nummulitiques. Il s'agit d'une source de trop-plein, tarie à l'étiage mais pouvant déverser jusqu'à plus de 100 L/s. Un prolongement récemment découvert a permis de recouper un écoulement important

débitant habituellement plusieurs L/s, à l'origine des déversements de crue, mais qui disparaît à l'étiage dans des soutirages impénétrables [Audra, 2019]. Son bassin d'alimentation correspond très vraisemblablement au versant sus-jacent de Mourre Frey, par des pertes au pied des ravins voisins, comme l'atteste l'observation d'une mise en charge quasi-instantanée suite à un orage (L. Catsoyannis & M.-L. Catsoyannis, février 2016). La destination de cet écoulement interne à la cavité restait énigmatique, et justifiait la campagne de traçages présentée ici.

C. Spéléogénèse

Hormis la grotte du Brec, le secteur comporte peu de cavités significatives, toutes étant concentrées dans l'éperon de la Lare. La plus importante est la grotte de la Lare (figure 2), développant 2,5 km de conduits étagés sur 83 m de dénivellation [Audra et Bigot, 2009]. Le drain principal, de belle taille (diamètre 4 m en moyenne) et aujourd'hui inactif, ainsi que ses différents boyaux de soutirage, attestent d'un fonctionnement ancien épinoyé, alternant mises en charge et vidanges selon la situation hydrologique [Audra et Bigot, 2005]. Ce drain reflète des conditions hydrauliques probablement très similaires à celles qui caractérisent actuellement l'étage actif et noyé, connu sur seulement 40 m au trou du Bœuf. L'extrémité amont du drain principal de la grotte de la Lare est à très faible distance du ravin de la Lare, où d'anciennes pertes colmatées ont été reconnues (figure 8). Elles constituaient une partie de l'alimentation, complémentaire à des arrivées plus lointaines. Les galets allogènes apportés par cette perte et piégés dans le drain fossile ont été datés par les isotopes cosmogéniques à 2,2 Ma [Ph. Häuselmann, inédit]. Par ailleurs, plus de 1 km de conduits fossiles de morphologie similaire ont été découverts avec l'ensemble des grottes des Raganéous-Théoriciens et Radar, qui s'ouvrent en paroi de la barre nummulitique. Comme la grotte de la Lare, il s'agit d'anciens points d'émergence, ici sous forme de puits-cheminées témoignant d'une importante remontée du niveau de base. Ce fonctionnement est parfaitement compatible avec une aggradation fluviale à la fin du Pliocène ayant colmaté une vallée antérieurement incisée, très probablement lors de l'épisode messinien (étude en cours).



Figure 4 : La source de Fontani à Saint-Benoît jaillit au travers des alluvions en rive droite du ravin. Cliché J.-Y. Bigot. *The Fontani spring in Saint-Benoît pours across alluvium of the right bank.*

II. Méthodes

Nous avons choisi de réaliser des traçages artificiels successifs, avec surveillance uniquement du point de restitution le plus probable, plutôt qu'une surveillance d'une multitude de points de sortie potentiels, quitte à renouveler l'expérience jusqu'à obtention d'un résultat positif. Cette stratégie, *a priori* dispendieuse en efforts et coûts de toutes sortes (traceur, temps, tournées...), s'est avérée adaptée à notre site. Elle permet notamment d'ajuster la quantité de traceur injectée à l'émergence envisagée, ni trop peu, ce qui entraînerait des résultats équivoques difficilement interprétables, ni en quantité excessive, ce qui pourrait générer des conséquences émotives difficiles à maîtriser. La contrepartie négative est que la réponse ne tombe pas nécessairement au premier coup, et qu'il faut envisager la possibilité d'une étude prolongée sur plusieurs années avant d'avoir la possibilité de produire des résultats. Mais elle a le mérite de permettre un ajustement progressif des protocoles, avec l'avancement progressif des connaissances.

Deux traçages artificiels ont donc été réalisés par injections successives d'Amino G puis de fluorescéine [Goldscheider et al., 2008]. L'Amino G a été retenu pour le premier traçage, pour lequel était supposée une sortie sur la toute proche source du Fontanil, captage AEP de la commune de Castellet-les-Sausses, où il était par conséquent préférable que le traceur reste invisible. Pour le second traçage, supposant de longues distances avec de probables zones noyées en aval, c'est la fluorescéine qui a été choisie, avec d'autant plus de sérénité que le point de

sortie envisagé n'était pas capté, et que le ruisseau de surface, totalement masqué par la végétation ripicole se jette à très peu de distance dans un cours d'eau plus important, assurant ainsi une dilution suffisante du traceur.

Les points de sortie potentiels ont été équipés d'un fluorimètre Albillia GGUN-FL30, avec un enregistrement dans les longueurs d'ondes correspondant à l'uranine (fluorescéine), la rhodamine, l' amino G, la turbidité, ainsi que la température [Schneegg, 2002]. Le seuil de détection est de 0,02 µg/L pour l'uranine. Le fluorimètre a été calibré par dilution des traceurs utilisés. Le fluorimètre a été installé plusieurs semaines avant l'injection, afin d'évaluer les valeurs du bruit de fond, notamment en période de crue où les eaux peuvent être turbides. Un flaconnage ponctuel en redondance a également été effectué lors des visites de relève du fluorimètre. Des mesures ponctuelles de pH, de conductivité électrique (CE) (instruments WTW 3110) et de température ont été réalisées lors de l'injection et aux points de sortie potentiels, afin d'établir un profil physique des eaux étudiées. Pour le suivi des écoulements, les sources ont été équipées chacune d'une paire de sondes Reefnet®, enregistrant dans l'eau la hauteur de la colonne (pression) et la température, ainsi que dans l'air pour la compensation des variations de pression atmosphérique. Des mesures de débit au seuil et par dilution de sel ont été réalisées ponctuellement. Aucun fluocapteur n'a été utilisé, les résultats obtenus étant trop souvent équivoques, notamment en cas de crue turbide pouvant transporter des matières organiques lessivées sur le bassin

d'alimentation, éventualité très probable dans le contexte de la manipulation. Les données météorologiques (pluie) proviennent de la station de Méailles (station amateur sous convention Météo-France), située 10 km au nord du secteur concerné.

III. Résultats

L'ensemble des données établies à partir des traçages est résumé dans les tableaux 1 et 2, les mesures des caractéristiques physiques des eaux dans le tableau 3.

A. Traçage du 2 février 2019

(figure 5, tableau 1)

2 kg d'Amino G sont injectés dans l'actif de la grotte du Brec qui écoule ≈ 3 L/s. La source du ravin du Fontanil de Castellet, captée à 800 m de distance de la grotte du Brec dans les marno-calcaires crétacés de Castellet-lès-Sausses, débite alors ≈ 25 L/s, dans un contexte alternant orages, fusion nivale, puis regel. Aucun passage du traceur n'y est enregistré durant les 3 semaines ayant suivi l'injection. Le pic nettement visible dans la longueur d'onde de l'Amino G est antérieur à la date d'injection, il correspond à la réaction à un épisode orageux. D'une manière générale, la fluorescence présente des valeurs faibles correspondant au bruit de fond.

B. Traçage du 15 juin 2020

(figure 6, tableau 2)

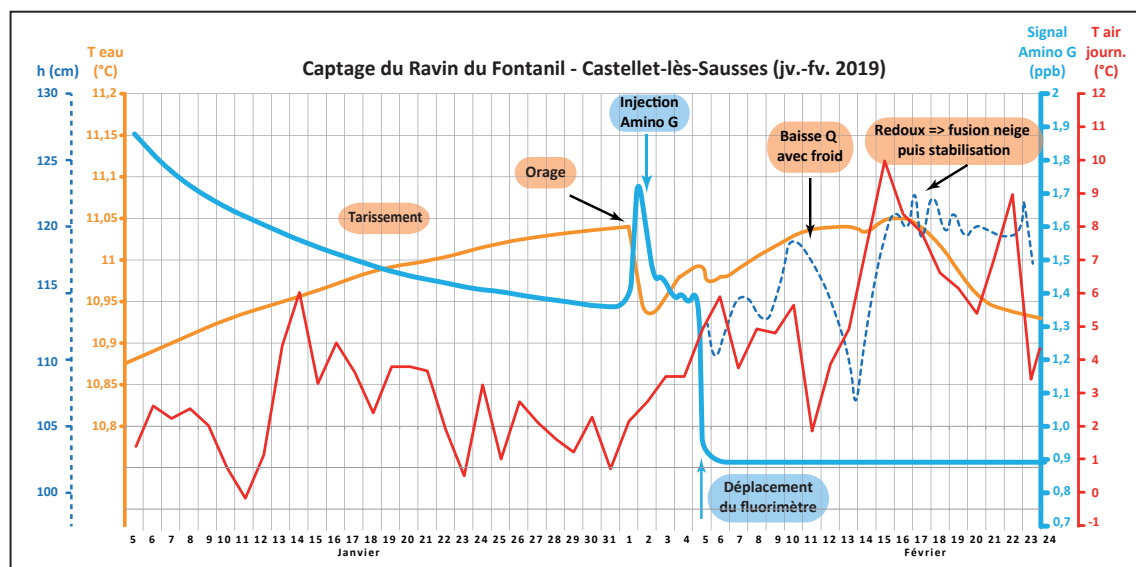
950 g de fluorescéine sont injectés dans l'actif de la grotte du Brec qui écoule $\approx 2-3$ L/s. Les points surveillés correspondent à la série d'exutoires étagés au pied des grottes de la Lare, à Saint-Benoît, en bordure de la vallée du Coulomp, à plus de 5 km de distance du point d'injection (figure 1). Ces manifestations karstiques sont situées à l'extrémité aval de la

Traçage février 2019	
Injection	Grotte du Brec
Date d'injection	2/2/19 09:56
Débit d'injection	≈ 3 L/s
Traceur	2 kg Amino G
Opérateurs	Ph. Audra, L. Catsoyannis, M.-L. Catsoyannis
Conditions hydrologiques	Orages, fusion nivale, puis regel
Suivi source du ravin du Fontanil de Castellet	44.005810°N, 6.738815°E, alt. 960 m Castellet-lès-Sausses, Alpes-de Haute-Provence Q ≈ 20 à 30 L/s Suivi 05/01 => 23/02/2019 Fluorimètre GGUN - FL30 (Albilla), fréquence mesure : 15 mn Paramètres mesurés : traceurs (uranine, rhodamine, Amino G), turbidité, température, Q (jaugeages au seuil et par dilution de sel), CE, pH
Résultats	Aucun passage du traceur enregistré

bande de calcaires nummulitiques qui remonte en continuité jusqu'au-dessus du col du Fâ, où se situe la grotte du Brec. Dans les semaines précédentes, des orages quotidiens violents sur l'ensemble du massif ont alimenté les sources de Saint-Benoît. Début juin, le trou du Bœuf écoule environ 300 L/s et Terre Borgne 200 L/s. Passé le 6 juin, l'été hydrologique s'installe, sans pluie efficace significative et ce durant toute la restitution, à l'exception de deux orages notables en fin de restitution. Le trou du Bœuf est tari avant l'injection, Terre Borgne tarit progressivement, ne laissant que la source pérenne située à l'aval dans les alluvions, indétectable à cause du maintien d'un faible écoulement dans le ruisseau de surface. Le traceur réapparaît 2 semaines après l'injection ($V = 14$ m/h), avec une concentration maximale de 34 $\mu\text{g/L}$ bien visible à l'œil nu pendant une dizaine de jours (figure 7), la restitution s'étalant sur 3 semaines. Du fait de l'écoulement de la source pérenne non comptabilisable et des fortes variations de débit de Terre Borgne

Tableau 1 : Synthèse des résultats du traçage de février 2019 injecté à la grotte du Brec. *Synthesis of the data of February 2019 dye tracing at the Brec Cave.*

Figure 5 : Enregistrement du bruit de fond de fluorescence dans la longueur d'onde de l'Amino G, de la température de l'air et de l'eau, ainsi que la hauteur d'eau dans le captage du ravin du Fontanil de Castellet (courbes lissées), dans les mois précédant et suivant l'injection d'Amino G à la grotte du Brec le 2 février 2019. *Monitoring of the fluorescence background in the Amino G wavelength, temperature of air and water, and water depth in the drinkwater catchment of the Ravin du Fontanil of Castellet (smoothed curves), in the months before and after the injection of Amino G in the Brec Cave, on February 2nd, 2019.*



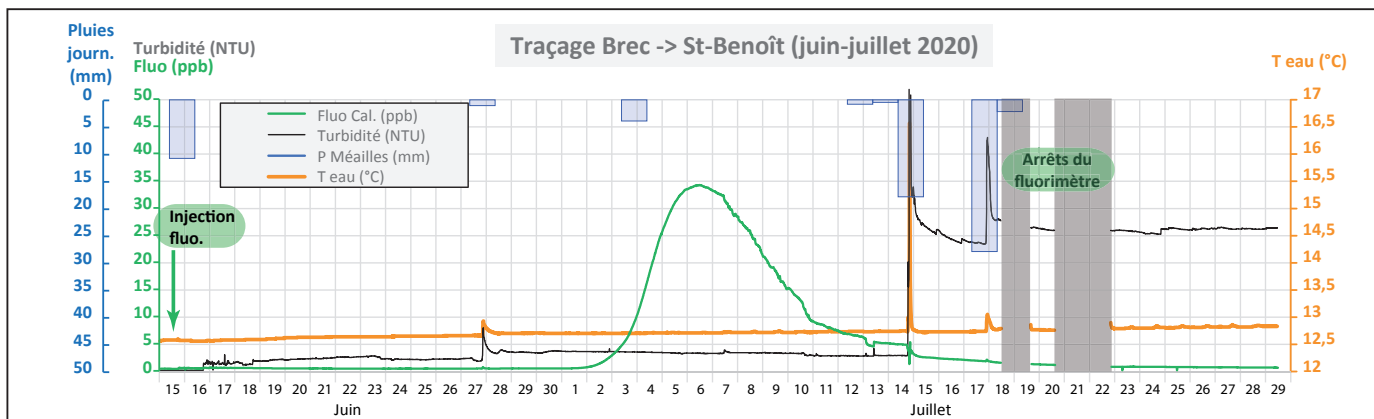


Figure 6: Courbe de restitution (juin-juillet 2020) à la source de Terre Borgne de la fluorescéine injectée à la grotte du Brec le 15 juin 2020. Breakthrough curve (June-July 2020) at Terre Borgne spring of the fluorescein injected on 15th June, 2020, in the Brec Cave.

sur des intervalles de temps de l'ordre de la journée, le taux de restitution n'a pu être calculé précisément.

IV. Interprétations

A. Interprétation des traçages (tableaux 1 et 2)

Le premier traçage n'a pas été détecté au captage du ravin du Fontanil de Castellet. Il n'est pourtant situé qu'à 800 m de distance et 135 m en contrebas de la grotte du Brec. Malgré le fort gradient entre ces deux points, les deux aquifères – nummulitique et crétacé –, semblent indépendants, au moins dans ce secteur. Les mesures physiques réalisées simultanément montrent néanmoins un profil similaire des eaux, avec seulement de légères différences de température et de conductivité (tableau 3). Leurs bassins d'alimentation voisinent en effet sur les pentes de Mourre Frey, ce qui explique cette similitude (figure 8).

Le second traçage a démontré la liaison entre la grotte du Brec et les sources du système de la Lare à Saint-Benoît. Les vitesses de passage du traceur sont relativement lentes, respectivement 14,4 et 10,7 m/h pour l'arrivée des premiers signes de restitution du traceur et pour le pic de concentration. Elles traduisent surtout l'effet des conditions hydrologiques en tarissement, où les circulations ralentissent significativement. Elles seraient assurément plus rapides en condition de crue. Le rapport RV de la vitesse maximale à la vitesse modale (V_{max}/V_{mod}) est un bon indicateur des conditions de circulation. Il caractérise la pente de la courbe de montée de concentration (et indirectement l'étalement du pic de restitution), avec des valeurs comprises entre 1 et 2 pour les chenaux karstiques hiérarchisés, entre 3 et 5 pour les fissures noyées, et entre 6 et 14 pour les aquifères

Traçage juin 2020	
Injection	Grotte du Brec
Localisation	44.009165°N, 6.730234°E, alt. 1 095 m Castellet-lès-Sausses, Alpes-de-Haute-Provence
Date d'injection	15/06/2020 de 12:30 à 13:30
Débit d'injection	2-3 L/s
Traceur	950 g fluorescéine
Opérateur	Ph. Audra
Conditions hydrologiques	Orages quotidiens violents jusqu'au 13/06/2020, tarissement quasiment non influencé après l'injection, et sur toute la durée de la restitution
Suivi Trou du Bœuf	43.961381° - 6.732058° - alt. 573 m Saint-Benoît, Alpes-de-Haute-Provence ⇒ Q = 300 L/s mi-juin, puis tari lors de la restitution
Suivi Source de Fontani de Saint-Benoît	43.960155°, 6.731248° - alt. 568 m Saint-Benoît, Alpes-de-Haute-Provence Q < 1/L/s ⇒ Suivi visuel, non teinté lors de la restitution à Terre Borgne
Suivi source de Terre Borgne	43.960155°, 6.731248° - alt. 569 m Saint-Benoît, Alpes-de-Haute-Provence Q variable (200 L/s, puis 50 à 0 L/s durant restitution) Suivi 05/06 => 29/07/2020 Fluorimètre GGUN – FL30 (Albillia), fréquence mesure : 10 mn Paramètres mesurés : traceurs (uranine, rhodamine, Amino G), turbidité, température, Q (jaugeage au seuil)
Résultats	Distance = 5,4 km ; dénivellation = 525 m ; pente = 9,7%
t1 Début restitution	01/07 5:00 => 376 h (≈ 15 j.)
t2 Fin restitution	22/07/2020 20:22 => 895 h (≈ 37 j.)
tr Durée restitution	519 h (≈ 22 j.)
Concentration max. sortie	34 µg/L
Concentration moy. Sortie	11,4 µg/L
tm Temps modal	06/07 11:50 => 503 h (≈ 21 j.)
Vmax	14,4 m/h
Vm Vitesse modale	10,7 m/h
RV (Vmax/Vm)	1,35
r% (taux de restitution)	Sans objet (Q non disponible)

Tableau 2: Synthèse des résultats du traçage de juin 2020 injecté à la grotte du Brec. Synthesis of the data of the June 2020 dye tracing at the Grotte du Brec.

fissurés non karstiques [Sommeria, 1986]. La valeur obtenue de 1,35 atteste d'un très faible étalement du nuage de traceur dans un réseau karstique à chenaux bien hiérarchisés, ce qui est conforme à la structure du réseau observable dans les conduits fossiles de la grotte de la Lare.

La source du Tunnel jaillissant sous la voie ferrée a fait l'objet d'un échantillonnage manuel unique durant la restitution. Sa concentration est de moitié par rapport à celle de la source. L'hypothèse de pertes du ravin de Fontani de Saint-Benoît juste en amont du tunnel est ainsi confortée, la différence de concentration de traceur étant interprétée comme résultant de la dilution de l'eau des émergences dans celle du ruisseau aérien et une atténuation de la fluorescence au long du parcours en aval des sources.

B. Bassins versants emboîtés et contribution partielle des écoulements allogènes

La définition des limites de bassin versant est ici particulièrement complexe, du fait de la structure de karst en bande, avec une contribution partielle et non quantifiée des surfaces imperméables. Le bassin des sources du système de la Lare combine d'une part l'alimentation autochtone des affleurements de calcaires nummulitiques et d'autre part l'alimentation allogène par les surfaces semi-imperméables en position topographique amont, à l'origine de ruissellements de surface pouvant pour partie contribuer à la recharge de l'aquifère nummulitique.

Le second traçage positif réalisé à la grotte du Brec a montré la liaison avec les sources du système de la Lare à Saint-Benoît, distantes de plus de 5 km. Par ailleurs, il démontre également la contribution à ces sources de la bande étroite des calcaires nummulitiques, continue de la grotte du Brec au nord jusqu'à l'éperon de la Lare au sud (figures 1

Figure 7: La vasque de Terre Borgne, en début de matinée du 7 juillet 2020, alors que la concentration de fluorescéine est presque à son maximum (32 µg/L à ce moment-là). Du fait de l'étiage prononcé, la source ne déverse plus depuis environ une journée, le seuil de déversement situé à droite n'est pas visible sur la photographie. Cliché C. Espla. *The Terre Borgne pool, in the morning of July 7th, 2020, when the fluorescein concentration reached almost its maximum (32 µg/L at this moment). Because of draught, the spring do not pour since about 1 day. The spillway, located to the right, is not visible on the picture.*



et 8). On peut sans risque y inclure le prolongement du nummulitique jusqu'au col du Fâ, dont le pendage est dirigé vers le sud. En revanche, au-delà du col, le pendage s'infléchit significativement vers le nord-ouest, en direction de la vallée du Coulomp où de petites sources en paroi rive gauche de la gorge drainent cette retombée du versant. De même, le placage de calcaire nummulitique des Sanguinières, situé au-dessus de Castellet sur les flancs de Mourre Frey, doit posséder ses propres exutoires, comme l'atteste la présence d'une source captée au point bas de l'affleurement, au-dessus du quartier du Marc. Compte tenu de ces interprétations et de la difficulté à délimiter avec précision les affleurements de nummulitique passant en transition progressive aux marnes priaboniennes, nous estimons la surface de recharge autochtone à environ 1 km², ce qui est modeste. Par ailleurs, le bassin allogène regroupe l'ensemble des aires situées en amont topographique du nummulitique, constituées de roches semi-imperméables (grès, marnes et marno-calcaires), et qui contribuent au ruissellement de

surface arrivant en contact avec les calcaires nummulitiques, où des pertes peuvent exister (figure 8). Il s'agit : 1/ des versants marno-calcaires crétacés de Mourre Frey surplombant la grotte du Brec (figure 8B). En période sèche, le ruissellement y est inexistant ou très faible, et dans ce cas il s'infiltre dans le Crétacé, vraisemblablement au profit du captage du ravin du Fontanil de Castellet. En revanche, lorsque le ruissellement est important, les ravins sont alimentés jusqu'au pied du versant où ils traversent les calcaires nummulitiques, dans lesquels ils peuvent se perdre partiellement, au profit cette fois-ci du système de la Lare. La rapidité des mises en charge observées dans la grotte du Brec confirme une telle alimentation par des pertes proches et importantes. 2/ De la même manière, les versants de Mourre Frey situés à l'est de la grotte du Brec alimentent le ravin du Fontanil de Castellet où ils se cumulent avec le débit issu du captage du Fontanil, le ravin prenant alors à l'aval le nom de Riou. Entre les cotes 830 et 740 m, ce ravin pérenne traverse à nouveau les calcaires nummulitiques, où des pertes peuvent également exister. Ceci implique que le bassin versant du captage du Fontanil est emboîté dans celui du système de la Lare, sachant que toutefois l'essentiel de son débit écoulé s'en échappe en ruissellements de surface. Les pertes, si elles existent dans la partie aval du Riou, ne peuvent être que partielles. 3/ Dans la partie moyenne et basse du secteur, l'ensemble des ravins issus des crêtes gréseuses de Clot Martin, qui entaillent ensuite en robines les marnes priaboniennes,

Point de mesure	Date	Conditions hydrologiques	Valeurs pH / T / conduct. / Q
Grotte du Brec (écoulement au point d'injection)	05/01/2019	Redoux hivernal	pH 7,9 / 10,5 °C / 327 µS/cm
Source du ravin du Fontanil de Castellet			pH 7,1 / 10,3 °C / 304 µS/cm
Source de Fontani de Saint-Benoît	05/02/2019	Fortes pluies 3 jours ½ avant	12,3 °C / 400 µS/cm
Source de Terre Borgne			12,5 °C / 334 µS/cm / 100 L/s

Tableau 3: Mesures ponctuelles des caractéristiques physiques des points étudiés. *Data of the discrete physical measurements of the studied spots.*

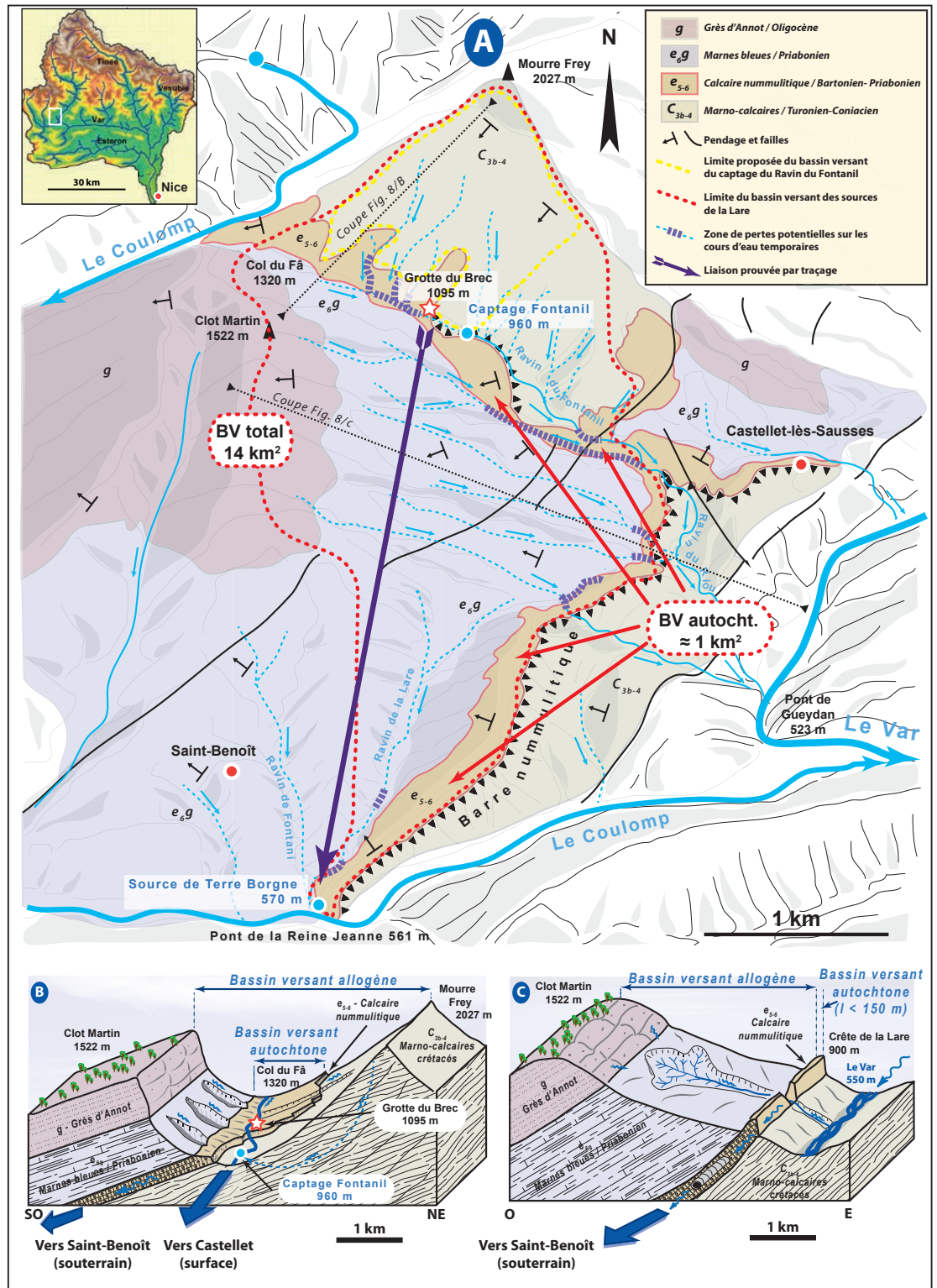
traversent la bande nummulitique où des pertes peuvent exister (figure 8C). Des pertes anciennes en rapport avec l'amont des conduits fossiles de la grotte de la Lare ont ainsi été identifiées, et on peut également y rattacher le trou du Bœuf qui absorbe les écoulements du ravin de la Lare, lors d'averses modérées quand les écoulements du ravin sont modestes et que le trou du Bœuf est inactif (figure 8A). En somme, cette contribution

alloène à l'aquifère nummulitique est de toute évidence très partielle, puisque les écoulements des ravins ne traversent la bande nummulitique qu'en période de pluie. La localisation des zones de pertes diffuses et leur quantification reste à faire. Toutefois, cette contribution est certaine, au regard des débits de crues des exutoires du système de la Lare et notamment du trou du Bœuf ($\approx 3 \text{ m}^3/\text{s}$), disproportionnés par rapport à la seule

surface de la bande nummulitique, et qui délivre des eaux extrêmement turbides attestant d'une contribution proche et abondante de pertes issues d'écoulements en provenance des marnes priaboniennes.

Au total, l'ensemble de ce bassin versant est estimé à 14 km^2 (figure 8A), en rappelant encore que l'essentiel de sa surface alloène ($\approx 13 \text{ km}^2$) ne contribue que de manière très partielle à la recharge de l'aquifère nummulitique.

Figure 8 : A/ Synthèse hydrogéologique du bassin du système de la Lare. B-C/ Conditions structurales de la recharge de l'aquifère nummulitique par les écoulements alloènes de crue. L'emplacement des profils est indiqué sur la figure A. B/ Dans la partie amont du bassin, en provenance du Crétacé supérieur de Mourre Frey et des grès d'Annot du Clot Martin. C/ Dans la partie aval, en provenance des grès et des marnes priaboniennes du Clot Martin. A/ Hydrogeological synthesis of the Lare System catchment. B-C/ Structural context of the recharge of the nummulitic aquifer by alloene runoff during high water. The location of profiles is indicated on figure A. B/ In the upstream part of the catchment, originating from the Upper Cretaceous marls of the Mourre Frey and from the Annot sandstones of the Clot Martin. C/ In the downstream part of the catchment, originating from the Priabonian sandstones and marls of the Clot Martin.



C. Fonctionnement hydrologique

Au captage du Fontanil de Castellet, suivi de janvier à février 2019, les mesures de température dans le bassin révèlent une partie de sa dynamique selon la recharge (figure 5). La température extérieure, en baisse jusqu'au 30 janvier, a maintenu le couvert neigeux, sans dégel ni infiltration significative. L'augmentation lente de la température de la source (moyenne calculée sur la période : $+ 0,006 \text{ }^\circ\text{C} / \text{j.}$) traduit une vidange d'eau à temps de séjour croissant dans l'aquifère fissuré. Le redoux accompagné de pluie dans la nuit du 31 janvier au 1^{er} février est enregistré dès le petit matin par une chute de température de la source associée à un pic de fluorescence, soit un temps de réponse d'environ 9 h au pic de pluie (rappelons que ce pic de fluorescence intervient avant l'injection, et ne peut être attribué à un passage du traceur). L'évolution ultérieure de la température de la source au cours du mois de février traduit le même type de réaction au gel puis à la fusion nivale.

La source temporaire de Terre Borgne, suivie de juin à juillet 2020 (mesures ponctuelles), a subi de fortes variations de débit au cours de l'étude, passant de 200 L/s début juin à l'issue d'une longue période fortement orageuse, à 0,8 L/s le 5 juillet, puis un arrêt de l'écoulement le 7 juillet, concomitant du pic de concentration. Le 11 juillet, l'écoulement reprend avec 0,1 L/s, puis 1,25 L/s le 13 juillet, environ 50 L/s le 15 juillet, pour à nouveau s'assécher à la fin des enregistrements. Le tarissement est rapide, et la reprise d'écoulement répond aux orages locaux, associée à des pics de turbidité proportionnels aux précipitations (figure 6). La position de la source de Terre Borgne, perchée 1 m au-dessus du ravin du Fontani, exclut toute possibilité de contamination par de la charge turbide provenant de ce dernier. En l'absence de données horaires de précipitations sur le bassin, il n'est pas possible d'estimer précisément les temps de réponse. Toutefois, l'orage du 14 juillet ayant été observé vers 17 h à Méailles, 10 km plus au nord, le temps de réponse serait de 3 h pour cet événement. Entre le dernier orage le 27 juin et la reprise des orages le 14 juillet, le tarissement se manifeste par une baisse régulière de la turbidité (moyenne calculée sur la période : $-0,033 \text{ NTU} / \text{j.}$), la température restant remarquablement constante ($12,7 \text{ }^\circ\text{C} \pm 0,02$). La tendance est similaire

après les pics de crue suivants. Les trois pics de crue associés aux orages des 27 juin, 14 et 18 juillet ont des signatures identiques : outre les pics de turbidité, la température s'élève brutalement de 0,2 à 0,5 $^\circ\text{C}$ pour les orages du 27 juin et du 18 juillet, et de plus de 4 $^\circ\text{C}$ pour l'orage du 14 juillet. D'une manière générale et *a fortiori* pour l'orage du 14 juillet, la concomitance des pics de turbidité et de température suggère l'arrivée d'eau chaude et turbide, en provenance de ruissellements de surface, via des pertes probablement peu éloignées, vu le temps de réponse très court. Elles sont localisées très certainement dans le ravin de la Lare, et on peut supposer ici une contribution du trou du Bœuf qui ne déversait pas à ce moment-là.

La question s'est posée de la représentativité des valeurs enregistrées à Terre Borgne lorsqu'elle s'est tarie en fin de période, car il s'agit d'un trop-plein. Toutefois, l'examen de la courbe de restitution montre une décroissance régulière de la concentration de traceur ; d'autre part, la température de l'eau de la vasque est restée stable à 12,7-12,8 $^\circ\text{C}$, sans influence du réchauffement estival où la température extérieure variait quotidiennement entre 10 et 33 $^\circ\text{C}$: ces deux arguments suggèrent que la vasque n'est pas un bassin mort une fois la source tarie, mais un regard en communication avec l'aquifère qui continue à se vidanger à l'aval par la petite source pérenne, avec un renouvellement permanent de l'eau de la vasque. Par ailleurs, les différents pompages effectués au trou du Bœuf et à Terre Borgne (L. & M.-L. Catsoyannis, déc. 2015), ont montré des rabattements instantanés donc une connexion directe de l'ensemble des sources de rive gauche, à l'exception de la source de Fontani de Saint-Benoît qui apparaît indépendante. De plus, les mesures physiques ponctuelles du 05/02/2019, bien qu'étant dans une gamme proche, montrent une légère différence entre les sources de Terre Borgne et Fontani (tableau 3). Enfin, l'absence de traceur détecté à la source de Fontani confirme définitivement l'indépendance de cette source de celles du système de la Lare.

D. Ressource et vulnérabilité

Les deux traçages réalisés ont permis de mieux délimiter les bassins d'alimentation, d'une part de la source du ravin du Fontanil captée au profit de Castellet-lès-Sausses, et d'autre part de l'ensemble des

sources du système de la Lare jaillissant au pied de l'éperon voisin du pont de la Reine Jeanne.

La source captée du ravin du Fontanil de Castellet, émergeant des marno-calcaires crétacés du versant de Mourre Frey, draine un aquifère fissuré. Elle délivre un débit relativement pondéré et des eaux généralement de bonne qualité, compte tenu de la faible pression sur son bassin, limitée à de petits troupeaux ovins en période estivale. Cependant, les crues turbides provoquant des contaminations bactériologiques épisodiques justifient pleinement l'emploi du système en place de désinfection par UV [Tennevin, 2014]. Enfin, son débit satisfait aux besoins actuels et futurs du village.

Les exutoires du système de la Lare ne sont pas captés, du fait de leur position 200 m en contrebas du village de Saint-Benoît, lequel est desservi de fait par d'autres ressources. Ils drainent cependant un aquifère devant être préservé pour un éventuel usage futur. Les résultats montrent que si les parties plus distantes de l'aquifère ont un potentiel productif apparemment modeste [Mangan, 2005], la zone proche des exutoires doit contenir un volume important et aisément mobilisable dans la zone saturée et fortement karstifiée, qui pourrait être sollicitée en compensation des très faibles débits d'étiage. La qualité des eaux est assurément correcte compte tenu de la faible pression agricole sur le bassin et de la rareté des axes de communication. Il conviendrait cependant de prendre en compte les pics de turbidité auxquels sont inmanquablement associées les contaminations bactériologiques, inhérentes à la nature karstique de l'aquifère et à son alimentation binaire en partie par des pertes d'eaux de surface. Les vitesses d'écoulement lentes ($< 15 \text{ m/h}$), mises en évidence lors du traçage en période de tarissement, attestent d'une faible vulnérabilité, tout au moins en périodes d'étiage.

Conclusion

Les deux traçages réalisés ont permis d'approfondir la connaissance du fonctionnement hydrogéologique du système de la Lare à Saint-Benoît et de la source du ravin du Fontanil à Castellet-lès-Sausses. Cette dernière apparaît indépendante de l'écoulement recoupé dans la grotte du Breç. Son bassin d'alimentation recouvre les marno-calcaires crétacés du versant

de Mourre Frey et alimente un aquifère fissuré avec une dynamique pondérée.

Le second traçage a mis en évidence le lien entre la grotte du Brec et les sources du système karstique de la Lare à Saint-Benoît. La vitesse de passage du traceur ($V_{\text{mod}} = 10,7 \text{ m/h}$) relativement lente est liée aux conditions hydrologiques de tarissement, mais le rapport aux vitesses maximales ($V_{\text{max}} / V_{\text{mod}} = 1,35$) caractérise un écoulement en drains karstiques bien hiérarchisés, ce qui est conforme à la structure du drain fossile de la grotte de la Lare et de la courte portion active reconnue par pompage et plongée dans le trou du Bœuf. Cette karstification intense et fortement transmissive a été démontrée sur l'axe de drainage, tout particulièrement autour des points d'émergence du système de la Lare. Pour autant, ce n'est pas le cas de l'ensemble de l'aquifère, comme le montre l'essai de pompage de la Bastide Neuve à 2 km au nord. Cette variation spatiale des dynamiques de l'aquifère ne préjuge pas du comportement des autres points, qu'il s'agirait de tester en cas de projet d'exploitation. Les autres pompages montrent une connexion hydraulique directe entre tous les exutoires de la Lare (trou du Bœuf, trou A, exurgence de la Lare, Terre Borgne), cette dernière étant un regard direct sur l'aquifère vidangé à l'étiage par la source pérenne. La source de Fontani de Saint-Benoît naissant en rive droite, qui n'a pas restitué de traceur, est indépendante. De même, la source du Tunnel semble alimentée par des pertes du ravin du Fontani de Saint-Benoît localisées à très courte distance en amont.

Le bassin d'alimentation des sources du système de la Lare intègre d'une part une composante autochtone correspondant à la bande de calcaires nummulitiques qui s'étend jusqu'au col du Fâ, d'une surface estimée à 1 km^2 . D'autre part, il s'y adjoint une composante allogène intégrant les versants marno-calcaires de Mourre Frey et les vallons marneux compris entre les crêtes gréseuses du Clot Martin et la corniche nummulitique, soit approximativement 13 km^2 supplémentaires. La contribution de ce bassin allogène est difficile à quantifier, probablement infime à l'étiage, et très partielle en hautes eaux. En effet, les ravins issus des marnes traversent la bande des calcaires nummulitiques, où les pertes probables ne peuvent être que partielles. Cependant, ce sont ces pertes qui sont à l'origine des pics marqués de crues turbides ($3 \text{ m}^3/\text{s}$). Ce fonctionnement contrasté est typique d'un karst en bande, où la part des surfaces allogènes est très supérieure à celle des surfaces autochtones, représentées ici par l'étroite bande de calcaires nummulitiques.

Les eaux de ces aquifères sont globalement de bonne qualité au vu de la faible pression sur leur bassin versant. La source captée du ravin du Fontanil pourvoit pleinement à l'alimentation de Castellet-lès-Sausses, avec une marge quantitative suffisante à moyen terme. Les exutoires du système de la Lare à Saint-Benoît, non exploités pour l'heure, constituent une ressource pour le futur, en quantité et qualité appréciable. La bonne qualité des eaux impose toutefois un traitement basique pour éliminer les contaminations

bactériologiques associées aux pics de crues turbides, inhérentes au karst.

À l'avenir, il serait intéressant d'approfondir la connaissance de cet aquifère par un suivi en continu des exutoires, combiné à des traçages effectués en conditions hydrologiques variées à partir des pertes des différents vallons. Ceci permettrait de mieux caractériser la vulnérabilité de cet aquifère, en ciblant les sous-bassins selon leurs caractéristiques hydrologiques et les risques de contamination éventuellement présents en surface.

Un long-métrage sur l'eau au long de la vallée du Var sera diffusé courant 2021 sur France3 [Espla & Espla, 2021]. Une séquence y est consacrée à ce traçage.

Remerciements :

Deux relecteurs anonymes ainsi que l'éditeur de la revue, pour les remarques constructives ayant permis d'améliorer significativement la forme de l'article. Claude Camillieri, maire de Castellet-lès-Sausses, pour les autorisations d'injection à la grotte du Brec et son adaptation pour la gestion du captage municipal. Maurice Laugier, maire de Saint-Benoît pour l'intérêt porté à cette étude. Viviane Pons-Bertaina, maire de Méailles, pour les données météorologiques. Marie-Line Catsoyannis, Lionel Catsoyannis, Didier Cailhol, et Ma Qiang, pour leur aide sur le terrain. Caroline Espla et Jérôme Espla pour la couverture cinématographique. Philipp Häuselmann pour les datations cosmogéniques de la grotte de la Lare réalisées à l'Institute for Applied Geology de Wien, Autriche.

Bibliographie

AUDRA P. 2019 - Alpes-de-Haute-Provence : grotte du Brec. *Spéléo Magazine*, 106, 20-24 (+ plan HT).
AUDRA P. & BIGOT J.-Y. 2005 - La grotte de Saint-Benoît : un modèle de cavité épinoyée. In: Audra P. (Dir.) - *Méailles et la région d'Annot. Paysages culturels karstiques. Architecture d'une relation homme-territoire unique*. Univ. Nice Sophia-Antipolis, Département de Géographie & Museo di Storia Naturale e Archeologia di Montebelluna, p. 65-69. https://www.researchgate.net/publication/343530427_La_grotte_de_Saint-Benoit_un_modele_de_cavite_epinoyee_THE_SAINTEBENOIT_CAVE_A_MODEL_OF_EPIPHREATIC_CAVE
AUDRA P. & BIGOT J.-Y. 2009 - Les grottes de Saint-Benoît (Alpes-de-Haute-Provence). *Speleunca*, 114, 7-17. https://www.academia.edu/2002774/2009_Les_grottes_de_Saint-Benoit%3%A0Alpes_de_Haute-Provence_
AUDRA P. & NOBÉCOURT J.-C. 2013 - Lag and transfer time inferred from melting cycles record in the Coulomp karst spring (Alpes de Haute-Provence, France). In Filippi M. & Bosák P. (Eds) -

16th International Congress of Speleology, Brno, 3, 335-339. Czech Speleological Society. Praha. <https://digital.lib.usf.edu/SFS0050565/00001>
ESPLA C. & ESPLA J. 2021 - *Le Var, ce torrent qui se prend pour un fleuve*, Vidéogramme 52 mn, AMDA production et Poisson-lune productions pour France3 PACA.
GOLDSCHIEDER N., MEIMAN J., PRONK M. & SMART C. 2008 - Tracer tests in karst hydrogeology and speleology, *International Journal of Speleology*, vol. 37, n° 1, p. 27-40. <https://scholarcommons.usf.edu/ijsvol37/iss1/3/>
KERCKHOVE C. & ROUX M. 1976 - Carte géologique de la France à 1/50 000, feuille 971 Castellane et notice 35 p. BRGM, Orléans.
LAURITZEN S.E. 2001 - Marble stripe karst of the Scandinavian Caledonides. *Acta Carsologica*, 30, 2, 47-79. <https://www.dlib.si/details/URN:NBN:SI:doc-CWIDV4EP>
MANGAN C. 2005 - *Domaine de la Bastide Neuve (04 - Saint-Benoît). Recherche d'eau pour utilisation domestique*. 10 p. Rapport inédit, Cabinet Mangan, Nice.

MIHEVC A. 1994 - Contact karst of Brkini Hills. *Acta Carsologica*, 23, 99-109. <https://www.dlib.si/details/URN:NBN:SI:DOC-OYFMZJWE>
SCHNEGG P.-A. 2002 - An inexpensive field fluorometer for hydrogeological tracer tests with three tracers and turbidity measurement. *XXXII IAH & ALHUSUD Congress Groundwater and Human Development. Balkema, Mar del Plata, Argentina*, p. 1484-1488. <http://members.unine.ch/pierre.schnegg/mardelp.pdf>
SIFFRE M. 1956 - *Morphologie souterraine et hydrogéologie du massif calcaire de la Lare, Saint-Benoît, (Basses-Alpes)*. Mémoires du Spéléo-club de Paris, 5 (1977), 46 pp.
SOMMERIA L. 1986 - *Comportement des traceurs fluorescents et phénomènes de dispersion. Application à l'étude d'aquifères fissurés*. 186 p. Thèse, Univ. Grenoble.
TENNEVIN G. 2014 - *Source du ravin de Fontanil, Castellet-lès-Sausses, 04. Dossier préparatoire à la venue de l'hydrogéologue agréé*, 56 p. Rapport inédit, H2EA, Nice.