



**HAL**  
open science

## **Un enregistreur exceptionnel de l'incision de la vallée de la Têt : le karst de Villefranche-de-Conflent (Pyrénées-Orientales).**

Gabriel Hez, Stéphane Jaillet, Marc Calvet, Jean-Jacques Delannoy

### ► **To cite this version:**

Gabriel Hez, Stéphane Jaillet, Marc Calvet, Jean-Jacques Delannoy. Un enregistreur exceptionnel de l'incision de la vallée de la Têt : le karst de Villefranche-de-Conflent (Pyrénées-Orientales).. *Karstologia*, 2015, 65, pp.9-32. <hal-02939635>

**HAL Id: hal-02939635**

**<https://hal.science/hal-02939635v1>**

Submitted on 17 Feb 2025

**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.



Distributed under a Creative Commons CC BY-NC 4.0 - Attribution - Non-commercial use - International License

Gabriel HEZ<sup>1</sup> et <sup>3</sup>,  
Stéphane JAILLET<sup>1</sup>,  
Marc CALVET<sup>2</sup> et  
Jean-Jacques DELANNOY<sup>1</sup>

(1) Laboratoire EDYTEM,  
Université de Savoie, CNRS,  
73376 Le Bourget du Lac cedex,  
gabrielhez@orange.fr

(2) Université de Perpignan-Via Domitia,  
UMR 7194 CNRS,  
52, avenue Paul Alduy,  
66860 Perpignan cedex - France

(3) Spéléo-Club de Villefranche  
de Conflent,  
24, rue Saint-Jacques  
66500 Villefranche-de-Conflent

# Un enregistreur exceptionnel de l'incision de la vallée de la Têt: le karst de Villefranche-de-Conflent (Pyrénées-Orientales)

**RÉSUMÉ:** L'espace méditerranéen offre une grande variété de karsts avec des caractéristiques parfois similaires, comme les émergences vauclusiennes, mais aussi avec des différences de fonctionnement et d'évolution souvent liées au contexte litho-structural et à la néotectonique. Le karst présenté dans cette étude n'accumule pas encore une littérature scientifique comme certains de ses illustres voisins. Pourtant il conserve dans ses galeries, et à différents niveaux de karstification, des archives naturelles qui permettent de reconstituer en partie la longue histoire de l'encaissement d'un tronçon d'une vallée fluviale méditerranéenne. Les grands réseaux souterrains de plusieurs dizaines de kilomètres et l'étagement de cavités sur près de mille mètres dans le massif du Coronat, représentent les principales caractéristiques du karst de Villefranche-de-Conflent.

La conservation des nappes alluviales de la vallée de la Têt dans les gorges de Villefranche est variable selon les niveaux altitudinaux. Ces terrasses alluviales sont continues pour les plus récentes, discontinues pour les moyennes et absentes au-dessus de 540 m NGF. En revanche, le milieu souterrain conserve à tous les étages des sédiments allogènes provenant de la Têt. Cette constatation est primordiale pour l'étude de ce karst. Les relations spatio-temporelles intimes entre la vallée et l'endokarst peuvent être étudiées finement dans les bas niveaux de karstification, grâce aux archives fluviales présentes dans la vallée aux altitudes proches de celles des grands réseaux souterrains. Ceci

permet de caler la morphogenèse de ces réseaux avec les basses et moyennes terrasses alluviales de la Têt sur le tronçon des gorges de Villefranche. En revanche, pour les étages supérieurs du karst, où les nappes alluviales sont absentes des versants, c'est l'étude des morphologies d'érosion et des remplissages de cavités qui permettront d'étudier les rythmes d'incision de la vallée de la Têt. Les datations cosmogéniques réalisées sur des sédiments endokarstiques de deux niveaux de conduits du massif du Coronat montrent une karstification dès le Pliocène inférieur et permettent de proposer une vitesse d'incision de la Têt de 0,54 cm/siècle.

**MOTS-CLÉS:** relation karst/vallée, étagement de cavités, vallée de la Têt, massif du Coronat, karst de Villefranche, datations cosmogéniques.

**ABSTRACT:** AN EXCEPTIONAL RECORDER OF THE TÊT VALLEY INCISION: THE VILLEFRANCHE KARST, PYRÉNÉES-ORIENTALES, FRANCE. The Mediterranean area offers a large variety of karsts which are sometimes similar, such as the vauclisian springs, but also with functioning and evolution differences which are often linked to the litho structural context and to neotectonics. The karst described in this study doesn't have a scientific literature like some of its famous neighbors. And yet it has natural and outstanding archives in galleries at different karstification levels. These archives allow to reconstitute part of the long history of the entrenchment of a Mediterranean fluvial

valley. The large underground networks and the cave levels in the Coronat massif are the main characteristics of the Villefranche karst. The alluvial sheet conservation in the Têt valley in the gorges of Villefranche varies according to altitudinal levels. The most recent alluvial terraces can be continuous, the middle ones can be discontinuous and the highest ones have disappeared. On the other hand the underground environment protects allogeneous sediments, coming from the Têt, at all levels. This is really important for the study of this karst. In lower levels of karstification, we can study the spatio temporal relation between the valley and the endokarst. This can be done thanks to the fluvial archives which can be found where the valley is nearly as high as the large underground networks. Which allows to connect the morphogenesis of these networks with the low and middle alluvial terraces of the Têt on the section of the Villefranche gorges. On the other end in the higher levels of the karst there is no alluvial sheet on the slope. The study of the erosion forms and the fillings of the cavities will allow us to know the incision rhythm of the Têt valley. The cosmogenic datings realized on endokarstic sediments of two levels of conduits of the massif of Coronat show a karstification from the lower Pliocene and allow to propose a rate of incision of the Têt about 0,54cm / century.

**KEY-WORDS:** relationship karst/valley, cave levels, Têt valley, Coronat massif, Villefranche karst, cosmogenic dating.

## Introduction

La notion d'étagement de cavités dans le karst en fonction de l'évolution du niveau de base karstique est un des concepts fondamentaux de la karstologie [Palmer, 2007]. Les phases d'encaissements de la vallée sont parfois

interrompues par une stabilisation suffisamment longue du niveau de base, pour la mise en place de réseaux souterrains subhorizontaux [Camus, 1997]. De nombreux écrits traitent le sujet des relations étroites entre l'encaissement d'une vallée et la mise

en place successive d'étages de grottes [Palmer, 1987; Quinif, 1989; Maire, 1990; Audra, 1994; Delannoy, 1997; Granger et al., 2001; Häuselmann, 2002; Camus, 2003; Palmer 2007; Nehme, 2013; Hez, 2015]. Ces étages correspondent à des niveaux de karstification mis en place

par des stabilisations de niveau de base nécessaires pour creuser une cavité en quelques dizaines de milliers d'années. En revanche, la mise en place des cavités de grande taille nécessite une période de stabilité plus longue [Audra, 1994].

Les karsts étagés sont donc les témoins de l'évolution des niveaux de base locaux et souvent régionaux. L'étagement de cavités peut être le résultat d'abaissements successifs du niveau de base, mais pas systématiquement pour tous les étages [Delannoy, 1997]. Si la vallée ne subit pas d'aggradation majeure, comme celle du post-Messinien enregistrée dans de nombreuses vallées du bassin méditerranéen, notamment dans la vallée du Rhône [Clauzon, 1982; Mocochain, 2007], la plus grande partie des karsts étagés répondront à cette logique: les cavités les plus hautes en altitude sont les plus anciennes et les plus basses, les plus récentes [Palmer, 2007; Audra & Palmer, 2013]. La question est donc de savoir dans quelle mesure les étagements du karst de Villefranche ont enregistré les fluctuations eustatiques messino-pliocènes.

Les réseaux souterrains sont d'exceptionnels indicateurs morphogéniques. Les formes d'érosion sculptées sur les parois et plafonds, mais aussi la conservation des dépôts allogènes, constituent les remarquables témoins de l'encaissement d'une vallée dans le temps long (plusieurs millions d'années). Dater les sédiments piégés dans les grottes étagées d'un karst, permet donc de mesurer la vitesse du creusement d'une vallée, ce qui n'est pas toujours possible avec les indicateurs morphologiques externes

[Maire, 1990], trop souvent disparus sous l'action de l'érosion.

Les recherches se multiplient dans les karsts étagés du monde; elles permettent de reconstituer l'évolution des vallées karstiques ainsi que celle des régions périphériques [Palmer, 2007]. Les concepts fondamentaux concernant les rythmes de surrection, d'incision et de dénudation, peuvent ainsi être abordés grâce aux méthodes de datations des sédiments allogènes enfouis et conservés dans l'endokarst. Le niveau de base fluvial d'une vallée peut évoluer en fonction des variations du niveau de la mer (eustatisme), en fonction de la surrection tectonique d'une chaîne de montagnes et/ou en fonction des différentes crises climatiques [Palmer, 2000], mais aussi du fait des dynamiques régionales ou locales (mouvements de masse, travertins et faille active) pouvant constituer des barrages entraînant une accretion fluviale, donc une élévation du niveau de base en amont.

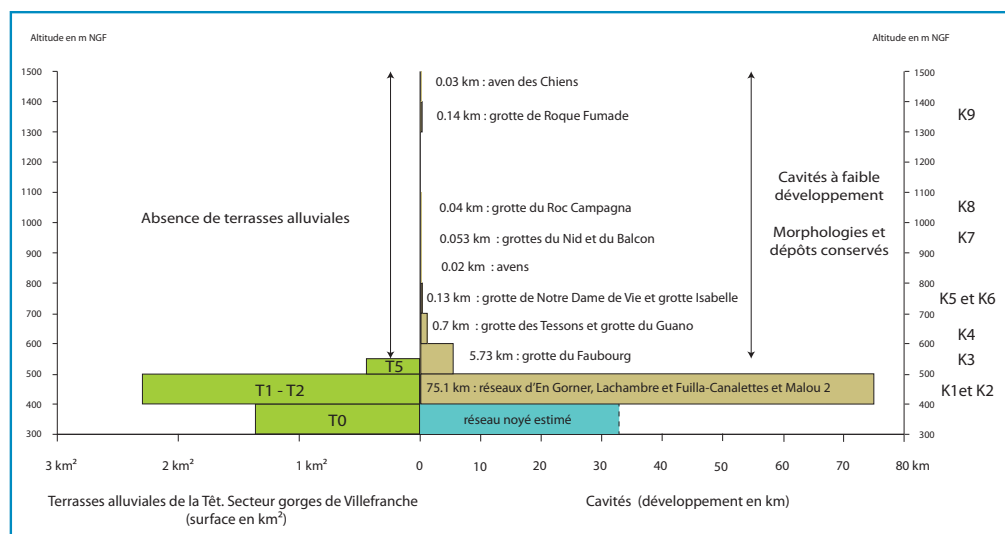
La problématique de cette étude est de mettre les grands réseaux souterrains et les étages de cavités du karst de Villefranche, en relation avec l'encaissement de la vallée de la Têt pour comprendre et analyser les relations spatio-temporelles entre le karst et la vallée. De ce fait, il est intéressant de savoir de quelle manière ce karst renseigne sur l'incision de cette vallée de l'Est pyrénéen. Les cavités conservent, des témoins morphologiques et sédimentaires de l'évolution de la vallée. Le choix méthodologique s'est orienté vers les grands réseaux souterrains subhorizontaux, qui se développent quelques

dizaines de mètres seulement au-dessus du cours d'eau actuel (la Têt), offrant ainsi la possibilité de les mettre en relations avec les nappes alluviales relativement bien conservées de ce niveau (figure 1). Au-delà de cet étage de karstification, identifié K1 dans cette étude, la présence des terrasses alluviales devient sporadique voire nulle. C'est donc l'endokarst étagé, avec ses formes et ses dépôts, qui permettra d'étudier les niveaux les plus hauts. Les grands réseaux souterrains de plusieurs dizaines de kilomètres et l'étagement de cavités sur près de mille mètres dans le massif du Coronat, représentent donc les principales caractéristiques du karst de Villefranche.

L'état des connaissances actuelles du secteur d'étude, constitue une base importante de données pour la réalisation de ce travail. Les connaissances géologiques, géomorphologiques et spéléologiques, produites par des études, des travaux de recherches et d'innombrables relevés topographiques dans le milieu souterrain, ont permis et motivé cette étude.

La carte géologique de la feuille de Prades à 1/50 000, apporte des informations capitales sur la mise en place et l'évolution complexe des formations paléozoïques et du synclinal dévonien de Villefranche. La notice explicative présente le karst de Villefranche avec ses grands réseaux souterrains (hormis le réseau Lachambre), et expose les principales circulations souterraines révélées par des traçages, sur la base des travaux réalisés vers 1965 par le Groupe d'Etude et de Recherches Spéléologiques. Les formations superficielles, et notamment les nappes alluviales de la Têt, du Cady et

Figure 1 : Histogramme quantitatif cavités / terrasses alluviales par tranche altitudinale de 100 m. Quantitative histogram of cavities/ alluvial terraces from altitudinal sections of 100 meters.



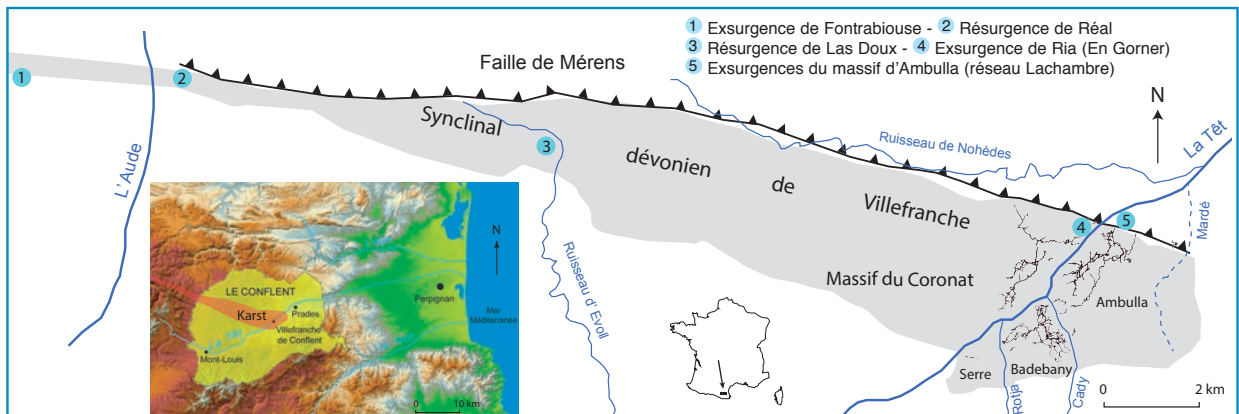


Figure 2: Carte de localisation du site présentant le synclinal de Villefranche et ses cinq principales émergences. On distingue les quatre massifs karstiques, ainsi que les grands réseaux. La Têt qui s'écoule vers le nord-est, incise l'unité dévonienne à l'est. On note la faille de Mérens qui suit la bordure septentrionale du synclinal de Villefranche. Site location map showing Villefranche syncline and its five main emergences. We can see four karstic massifs as well as the large networks. The Têt which runs to the North East, incises the Devonian unit to the East. We can notice the Merens fault which follows the septentrional border of the Villefranche syncline.

de la Rotja, sont décrites succinctement dans cette notice explicative, et elles sont calées en altitude relative par rapport aux cours d'eau [Guitard & al., 1998].

Des recherches concernant, la vallée de la Têt et les marqueurs de son encaissement ont accumulé une base de données considérable. L'étude fine des nappes alluviales de la vallée de la Têt, par un travail de description, de détermination, de pétrographie, de morphométrie et d'altération des matériaux [Calvet, 1996], constitue une masse d'informations importante pour l'étude des relations karst/vallée. Plus généralement, ces travaux réalisés dans les Pyrénées-Orientales et concernant la mise en place des reliefs durant les surrections néogènes et quaternaires, ainsi que l'évolution des morphologies et des paléo-environnements, fournissent les bases pour démarrer une recherche en géomorphologie karstique.

Le travail d'exploration et de cartographie dans le cadre de la spéléologie, a débuté dans les années 1950 dans les Pyrénées-Orientales. Il a permis de constituer une banque de données capitales pour nos recherches. Depuis 1983, le Groupe d'Exploration Souterraine de Barcelone (GES) puis le Collectif du Conflent Souterrain (CCS), sous l'impulsion de Joan Borràs, ont réalisé les topographies des trois grands réseaux du karst de Villefranche, ainsi que celles d'autres cavités du secteur. Sans ce travail, l'étude de la mise en place des cavités et l'étude géomorphologique entreprise depuis 2011 n'aurait pas pu s'orienter vers l'étude des grandes cavités. Le travail remarquable de ce groupe de spéléolo-

gie de la Catalogne du Sud est un atout considérable pour la recherche.

Enfin, le travail de recherches spéléologiques, mis en place au sein du Spéléo Club de Villefranche, a permis depuis 2003 d'inventorier les cavités du karst, de cartographier 23 cavités [Hez, 2015], de désobstruer une quinzaine d'entrées de grottes et avens. Ce travail s'est traduit par quelques découvertes mineures d'un point de vue spéléologiques, mais d'une importance capitale pour la recherche (Grotte du Faubourg, 2005). De plus, les cavités cartographiées sont systématiquement insérées dans un modèle numérique de terrain [Hez, 2015] qui permet de visualiser l'étagement de cavités et l'envergure du karst. Mais aussi, il permet de présenter sous forme d'illustration les caractéristiques karstiques du terrain d'étude.

En fonction des objectifs de recherches, des méthodes mises en place et des connaissances acquises au préalable, trois points principaux seront développés. On présentera d'abord (i) le karst de Villefranche à travers son contexte géologique sommaire, en évoquant les principales formations géologiques, l'identification de la tectonique dans l'endokarst, et le synclinal de Villefranche. Ensuite, l'état des connaissances de cet ensemble karstique sera développé. Puis (ii) un exemple de relation fine karst/terrasses: le Puits des racines avec les basses et moyennes terrasses alluviales (T1 et T2) permettra de développer l'étude de l'analyse altimétrique des terrasses alluviales de la Têt, dans les gorges de Villefranche, en relation avec les niveaux de karstification décelables

dans les réseaux souterrains. Enfin (iii) le karst étagé de Villefranche sera présenté dans son ensemble. À travers l'étude des cavités de la rive droite de la Têt nous aborderons le fonctionnement des systèmes souterrains durant leur évolution. Ensuite, un modèle de karstification des étages de cavités du massif du Coronat sur le temps long sera présenté, avec l'enregistrement de l'incision de la vallée de la Têt par le karst étagé du massif du Coronat, modèle appuyé sur les datations par isotopes cosmogéniques publiées par ailleurs [Calvet & al., 2015].

## I. Le karst de Villefranche

Situé au centre des Pyrénées-Orientales entre la Cerdagne et la plaine du Roussillon, le Conflent (figure 2) est un territoire de moyenne montagne avec des altitudes comprises entre 230 et 2881 mètres. Celui-ci est traversé d'ouest en est par la Têt, depuis la frontière de la Cerdagne et du Capcir en amont, jusqu'en aval aux portes du Ribéral et des Aspres. Ce « pays » est marqué par la confluence des cours d'eau qui descendent du massif du Canigou (2785 m) et rejoignent la Têt en rive droite. Les cavités de ce secteur sont bien connues des spéléologues, les explorations effectuées depuis le milieu du XX<sup>e</sup> siècle et la réalisation des topographies des grands réseaux souterrains [GES & CCS, 1995 à 2015] ont mis en évidence l'importance de ce karst. Cependant, peu de recherches scientifiques ont été menées sur ce patrimoine karstique. La particularité de ce site est liée à la proximité de trois grands réseaux totalisant plus de 70 km de galeries, dans un contexte géologique plissé et



Photo 1 : Brèche calcaire de la grotte de Sirach. Cette roche détritique est formée de blocs de cavitycalcaires anguleux cimentés dans une matrice argileuse. Dans le karst de Villefranche, cette formation miocène (Burdigalien) n'est observable que dans cette cavité. *Sirach cave limy breccia. This detritic rock is formed of sharp lime blocks cemented in an argillaceous matrix. This miocene formation (Burdigalian) can only be seen in this Villefranche karst cavity.*

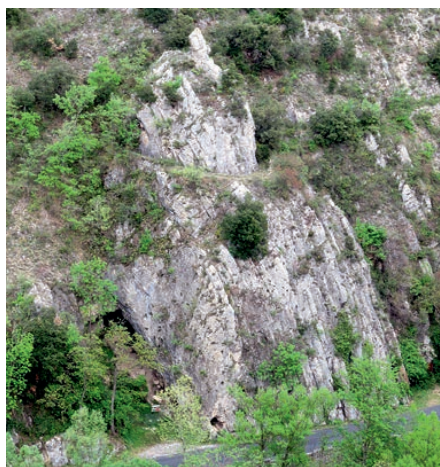
fortement comprimé [Guitard & *al.*, 1998], développant des conduits subhorizontaux dans des terrains sédimentaires fortement inclinés.

Dans cette première partie, nous présenterons le karst de Villefranche dans son contexte géographique et géologique, pour dresser l'état des connaissances karstologiques actuelles sur cet ensemble. Nous développerons l'aspect géomorphologique de celui-ci par la présentation de sa vallée et de ses affluents, ses massifs et ses cavités, ainsi que l'étagement de l'endokarst mis en évidence récemment par les recherches spéléologiques et universitaires entreprises ces dernières années [Hez 2012, 2013 a et b, 2015].

#### A. Contexte géologique du synclinal de Villefranche

Le karst barré de Villefranche se développe dans les roches carbonatées du Paléozoïque (Dévonien), dans la partie orientale du synclinal. Cette unité géologique se caractérise par des calcaires métamorphiques reconnus pour leurs marbres [Guitard & *al.*, 1998] tels que :

Photo 2 : Les strates subverticales des terrains sédimentaires dévoniens du massif de Badebany attestent la compression tectonique hercynienne. La tâche noire correspond au porche d'entrée de la grotte de Fuilla. *Devonian sedimentary land subvertical layers of the Badebany massif: they are the proof of the hercynian tectonic compression. The black spot corresponds to the entrance porch of the Fuilla cave.*



« la griotte », « la fleur de pêcher » et « la flambée rose de Villefranche ».

Le synclinal de Villefranche (figures 2 et 7) s'étend d'ouest en est sur une trentaine de kilomètres, de Fontrabieuse à Corneilla de Conflent, avec une largeur d'environ 4 km sur sa partie orientale au niveau de la Têt, où la concentration de cavités est la plus importante. La faille majeure de Mérens chevauche au nord le synclinal; elle est rapportée à l'orogénèse hercynienne, mais elle a joué à plusieurs reprises par la suite. Elle borde la partie septentrionale du massif du Coronat au niveau de la vallée de Nohèdes, et barre le karst au niveau de la vallée de la Têt.

#### 1) Les principales formations géologiques

Les schistes noirs et les calcaires du Siluro-Dévonien (s1-d5) se rencontrent sur le terrain de façon sporadique. La plus grande partie affleurante de cette formation décrit une bande irrégulière depuis la rive droite de la Têt jusqu'au N-O de Jujols. Cette couche plutôt imperméable est sous-jacente aux calcaires du Dévonien moyen. Ce contact se distingue clairement en rive gauche de la Têt sur le massif du Coronat et en rive droite sur la partie S-E du massif de la Serre (photo 5). La série carbonatée du Dévonien moyen, orientée NO-SE, représente l'axe du synclinal de Villefranche. C'est dans cette unité géologique pouvant atteindre une puissance de 400 m que se développent tous les réseaux souterrains. Environ 300 Ma séparent les terrains du Primaire des terrains néogènes présentés ci-dessous.

Les dépôts néogènes de piémont occupent, à l'Est et au Sud du massif karstique, le fossé du Conflent, qui s'ouvre à l'est sur le grand bassin du Roussillon [Guitard & *al.*, 1998; Calvet, 1996; Calvet *et al.*, 2008 et 2015 pour une brève synthèse]. La formation d'Escaro du Miocène inférieur (Burdigalien) est constituée de sables grossiers ainsi que de gros blocs de gneiss métriques, ces dépôts auraient pour origine les massifs du Canigou et de la Carança. Cette série néogène possède un niveau de brèche calcaire encroûtée à la base. La grotte de Sirach se développe en partie dans cette brèche calcaire (photo 1), constituée de blocs cimentés par de l'argile. Le Miocène inférieur, formation d'Escaro et ses équivalents latéraux et distaux, datés à l'aval par le site à mammifères d'Espira, sont déformés en synclinal dissymétrique, fortement relevé sur sa marge sud contre la faille majeure qui limite le demi graben du Conflent. Une formation très riche en blocs de quartz, la série du col de Fins, est discordante sur le Miocène inférieur et a été attribuée par hypothèse à un Miocène supérieur équivalent à celui du fossé de Cerdagne, qui prolonge le Conflent à l'Ouest. Une importante

phase de ravinement, marquant l'événement messinien [Clauzon *et al.*, 1987], précède le Pliocène. Ce dernier remblaye la paléovallée messinienne, étroite et axée sur la bordure nord du Conflent. Il montre une séquence progradante deltaïque, dont les *bottom sets* marins affleurent jusqu'en moyen Conflent, et les tops sets conglomératiques se suivent jusqu'aux environs de Prades. La déformation des couches pliocènes sur toute la bordure nord de la paléo ria montre la poursuite de la tectonique cassante jusqu'au Pléistocène inférieur au moins.

Les formations superficielles quaternaires du secteur d'étude sont représentées par les hautes terrasses T4, situées au S-E de Ria, auxquelles se raccordent d'épais cônes de piémont au Sud. Les basses terrasses T1 et T2 occupent une grande partie de la vallée de la Têt entre Serdinya et Prades (figure 6). Notons la présence d'un lambeau de terrasse ancienne T5 à l'ouest du Fort Libéria à 540 m NGF [Calvet, 1996].

## 2) Une tectonique identifiée dans l'endokarst

L'orogénèse hercynienne serait responsable de la mise en place de la faille de Mérens ainsi que du synclinal de Villefranche et de ses empilements d'écaillés et de plis isoclinaux couchés [Guitard *et al.*, 1998]. La compression paléogène, déformant les terrains paléozoïques déjà plissés (photo 2), a probablement fait rejouer ces anciennes structures. À l'échelle des Pyrénées, la compression tectonique paléogène, agissant sur la zone axiale, a produit un raccourcissement de plus de 100 km des terrains en place et a pu ainsi créer des volumes conséquents entraînant une érosion intense qui explique en partie cette lacune sédimentaire d'environ 300 Ma constatée sur la carte géologique. Les contraintes tectoniques engendrées par le mouvement des blocs sont fréquemment observables dans les cavités du Conflent (photo 3). Des rejeux de failles d'âge plio-quadernaire ont même pu être enregistrés dans l'endokarst. Ils sont reconnus par des interruptions subites de galerie dans les grottes de Notre-Dame de Vie et du Faubourg ou des décalages de parois plus modestes, associés à des stries dans le remplissage. Ils permettront de caler sur une échelle chronologique, ces épisodes postérieurs à la formation des cavités concernées par ces fermetures de galeries.

## 3) Le synclinal de Villefranche : une gouttière karstique de trente kilomètres

Cinq émergences karstiques majeures sont localisées au niveau du synclinal de Villefranche (Salvayre, 1989). Elles appartiennent aux systèmes karstiques drainant les calcaires métamorphiques depuis la vallée de l'Aude jusqu'à la Têt (figure 2). L'unité dévonienne fonctionne comme une gouttière qui restitue les eaux souterraines dans les vallées respectives de l'Aude, d'Evol et de la Têt qui la recourent successivement d'ouest en est. La faille de Mérens barre le karst de Villefranche à l'est, au niveau des émergences 4 et 5 (figure 2), au contact des terrains imperméables du Cambrien.

Dans le secteur d'étude, on note l'exurgence de Ria en rive gauche de la Têt (n° 4 sur la figure 2), qui est l'exutoire du système d'En Gorner, cette cavité développant plus de 17 km dans le massif du Coronat ; la zone de résurgences en rive droite de la Têt (n° 5 sur la figure 2), à la base du massif d'Ambulla restitue les eaux souterraines du massif de Badebany et de celui d'Ambulla, ainsi que celles des pertes du Cady [Salvayre, 1979].

## B. État des connaissances : l'ensemble karstique de Villefranche

Nous définissons ici l'ensemble karstique de Villefranche comme la somme des quatre massifs distincts dans lesquels se développent des systèmes souterrains reconnus, du moins pour trois d'entre eux. Cette partie de l'article présente l'état des connaissances de cet ensemble dans un cadre géomorphologique, en exposant ses différents éléments : les massifs, les vallées et l'endokarst. Une description de l'étagement des cavités du massif du Coronat est présentée.

### 1) Les massifs karstiques et l'organisation des vallées

Quatre massifs distincts constituent l'ensemble karstique de Villefranche : (i) le massif du Coronat en rive gauche de la Têt, et (ii) les massifs d'Ambulla, de Badebany et de la Serre en rive droite. Les trois derniers sont de moindre ampleur par rapport à l'imposant massif du Coronat. Toutefois, ils connaissent une densité importante de cavités (figure 3). Le réseau hydrographique est constitué de cinq cours d'eau, la Têt et ses quatre affluents. Le Cady et la Rotja dévalent les pentes du Canigou (2785 m) avant



Photo 3 : Zone de broyage au sein d'une fracture dans la grotte du Faubourg. Ces phénomènes hérités des mouvements et des pressions tectoniques se rencontrent dans presque toutes les cavités du karst de Villefranche. *Grinding zone in the middle of a fracture in the Faubourg cave. These phenomena have been inherited from tectonic pressures and motions. They can be seen in most karst cavities in Villefranche.*

de rejoindre la Têt en rive droite. Le ruisseau de Nohèdes borde la partie septentrionale du massif du Coronat, et le ruisseau d'Evol (figure 2) descend du col de Portus en longeant la partie occidentale de ce même massif ; ces deux derniers rejoignent la Têt en rive gauche. Les trois massifs de la rive droite et celui du Coronat ne formaient qu'un seul ensemble, dans la série carbonatée du Dévonien moyen (d3-4), avant l'incision épigénique de la Têt et de ses deux affluents : la Rotja et le Cady [Hez, 2013a].

### a) Le massif du Coronat en rive gauche de la Têt

Face au pic du Canigou, le Coronat (photo 4) se situe en rive gauche de la Têt. Il culmine à 2172 m NGF dans sa partie occidentale. Ce massif a une superficie d'environ 60 km<sup>2</sup>. Son point bas se place à la confluence de la vallée de Nohèdes et de la Têt vers 376 mètres d'altitude. On relève une dissymétrie entre le versant nord et le versant sud, en effet les 2/3 du volume du massif sont au sud, où l'on rencontre la majorité des cavités. En revanche le versant nord présente des pentes plus fortes, coupées d'escarpements rocheux. Les deux versants sont fortement incisés et drainent le ruissellement de surface en direction des trois vallées. Ces ravins peuvent être

actifs pendant les périodes de fortes pluies et lors de la fonte des neiges, comme le ravin des Horts.

Du sommet au point bas du massif, on devine la ligne de crête orientée ouest-est. Elle n'est pas évidente à définir sur un terrain largement boisé, avec une topographie de faible pente et parfois plane. Le massif associe donc des bordures très raides, de fort commandement, et une topographie culminante aplanie, comme le Pla des Horts et le Pla d'Aussa, situés entre 1450 et 1200 m NGF. Le massif du Coronat a donc connu une morphogénèse complexe et le relief actuel est l'héritage de plusieurs orogénèses, aplanissements, soulèvements, érosion glaciaire discrète à l'ouest (auge d'Evol, front à 1 500 m; esquisses de cirques sur le flanc nord) et une karstification de surface et souterraine, observée de 400 à 1900 m NGF.

Plus de 50 cavités réparties à différents niveaux altimétriques, ont été répertoriées dans ce massif [Salvyre, 1979; Hez, 2014]. La plupart d'entre elles sont concentrées sur le versant sud dans la vallée de la Têt près de Villefranche

(figure 3), entre les villages de Serdinya et Ria-Sirach. L'émergence karstique principale est l'exsurgence de Ria (Co 3), en rive gauche de la Têt. Quelques sources (Co 5) apparaissent au bord de la Têt, toujours en rive gauche, elles sont temporaires et fonctionnent lors du débordement de la nappe du Puits des Racines (Co 2).

#### b) Les massifs en rive droite de la Têt, d'aval en amont

Le massif d'Ambulla est le plus imposant des trois reliefs carbonatés situés en rive droite de la Têt. Il marque la limite orientale du synclinal de Villefranche. Son relief de plateau, qui dérive d'un aplanissement, est troué par un probable paléo-poljé situé vers 700 m, dominé par les formes douces et arrondies sur les sommets (813 m) (figure 3); son amplitude altimétrique est de 440 m. Les abrupts rocheux du massif sont localisés sur le versant nord, dominant la Têt, et surtout dans la vallée du Cady, sur le versant ouest. Un ravin orienté SE-NO éventre le paléo poljé et incise en partie le versant nord du plateau.

Tout comme dans les autres massifs de la rive droite, il n'y a aucun écoulement de surface. À l'est, le massif d'Ambulla est délimité par la vallée du Mardé qui connaît un écoulement temporaire. La zone noyée du réseau Lachambre alimente les résurgences d'Ambulla (Am 3), nommées aussi résurgences d'En Gorner, du fait de la proximité de ce toponyme, bien qu'elles ne drainent pas le réseau dit d'En Gorner. L'endokarst de ce massif développe plus de 32 km de galeries, avec 20 cavités réparties sur deux niveaux altitudinaux.

Le massif de Badebany présente une surface environ deux fois moins importante que celui d'Ambulla. Ce massif culmine à 793 m, son commandement est d'environ 370 m. Il présente le témoin exigu d'un aplanissement sur sa partie sommitale (figure 3). Le versant nord est boisé, sa pente est régulière. Il est délimité par deux cours d'eau affluents de la Têt. De nombreux éboulis occupent les versants ouest du massif, ils constituent souvent la base des abrupts rocheux répartis de façon sporadique à différents niveaux altitudinaux. Les circulations de surface sont inexistantes. Dans le domaine endokarstique, le niveau épiphréatique du réseau est alimenté par les pertes du Cady et par celles de la Rotja; on rencontre dans les zones inférieures du réseau des regards sur la zone noyée du karst. Une émergence (Ba 7) au N-O du massif a été découverte lors des travaux de construction de la centrale hydroélectrique de Villefranche. Cette résurgence se trouve dans les galeries de la centrale, elle peut être un exutoire d'une partie du système de Fuilla-Canalettes et/ou la restitution des pertes de la Rotja. L'endokarst du massif de Badebany totalise 28 km de galeries avec 11 cavités répertoriées [Borràs & GES-CSC, 2008].

Situé en amont de la confluence de la Têt et de la Rotja, le massif de la Serre est la plus modeste des trois unités dévoniennes de la rive droite. Son amplitude altimétrique est d'environ 300 m, sa partie sommitale, légèrement aplanie atteint 775 m (figure 3). Il présente deux versants assez pentus (30 à 40°), largement boisés. Sur le versant NO, quelques escarpements rocheux s'étagent au milieu de la végétation. Il n'existe aucune circulation de surface et aucun écoulement endokarstique n'a été identifié dans les cinq cavités connues du massif. Karstifié à différentes altitudes, il est possible qu'il conserve des indicateurs

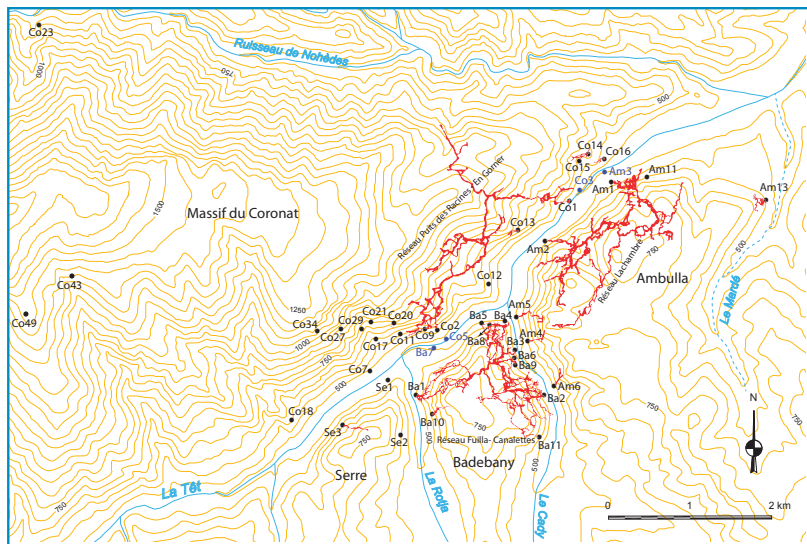


Figure 3: Carte des codes des principales cavités du karst de Villefranche. On distingue les orientations majeures des galeries des trois grands réseaux souterrains. Les conduits orientés SO-NE représentent les paléo-drains assimilés aux pertes de la Têt, comme le boulevard du Canigou pour le réseau Lachambre, la galerie du Métro pour la grotte d'En Gorner et la Grande Galerie pour le réseau de Fuilla-Canalettes. Dans ce dernier, les conduits orientés SE-NO sont assimilés aux pertes du Cady. L'incision du Cady dans l'unité dévonnaise du synclinal, semble avoir tronçonné un paléo-système en deux unités géomorphologiques distinctes. D'après les topographies de Joan Borràs (GES et CCS) réalisées entre 1996 et 2011, et les relevés de Gabriel Hez (SCV) de 2003 à 2014. Code map of the main cavities of the Villefranche karst. We can see the major orientation of the 3 large underground network galleries. The conduits which are orientated SO-NE, represent the paleo drains assimilated to the Têt losses, like the "boulevard du Canigou" for the Lachambre network, the "galerie du metro" for the "En Gorner" cave and the "Grande Galerie" for the Fuilla-Canalettes network. In this last one, the conduits which are orientated SE-NO are assimilated to the "Cady" losses. The Cady incision in the Devonian unit of the synclinal seems to have cut up a paleo system in the 2 distinct geomorphological units. According to Joan Borràs topographies (GES and CCS) which he did between 1996 and 2011 and Gabriel Hez surveys (SCV) from 2003 to 2014.



Photo 4: Le karst de Villefranche est constitué de quatre massifs distincts: l'imposant massif du Coronat qui culmine à 2 172 m (zone boisée à gauche), et les trois massifs en rive droite de la vallée de la Têt. De gauche à droite, les massifs de la Serre, de Badebany et d'Ambulla. Ces derniers, plus modestes, conservent pourtant deux systèmes souterrains de plus d'une vingtaine de kilomètres chacun. *The Villefranche karst is made of 4 separate massifs: the impressive Coronat massif which culminates at 2172m (wooden area on the left) and 3 massifs on the right bank of the Têt valley. From the left to the right the massif of the Serre, of the Badebany and the Ambulla. These last ones are smaller and yet they have 2 underground systems which are more than 20 kms long each.*

et des archives naturelles susceptibles de nous fournir des informations paléogéographiques concernant l'incision de la Têt et de la Rotja. De plus, la situation géographique de ce massif permet de supposer qu'au contact des schistes siluro-dévonien (photo 5), une paléo-perte de la Têt alimentait et traversait les massifs de Badebany et d'Ambulla avant l'individualisation totale des trois massifs. Dans ces deux réseaux, les galeries orientées SO-NE laissent, en effet, entrevoir un paléo-système tronçonné par l'incision du Cady. Aucune émergence n'a été repérée à la base du massif de la Serre. Il est probable qu'il existe des sources karstiques discrètes dans les lits de la Rotja ou de la Têt, à la base des basses terrasses alluviales de la confluence.

## 2) Caractéristiques des réseaux souterrains

Les réseaux souterrains du karst de Villefranche se développent dans les quatre

massifs décrits précédemment. On y compte 87 cavités, avec près de 82 km de galeries topographiées [Borràs & GES-CSC, 2014; Hez, 2014]. Les caractéristiques de cet ensemble géomorphologique souterrain sont: (i) l'existence de trois grands réseaux subhorizontaux au niveau inférieur, (ii) un étagement de cavités sur près de 1 000 mètres dans le massif du Coronat, et (iii) une bonne conservation de morphologies d'érosion souterraine et de dépôts alluviaux allogènes piégés dans les grottes étagées de ce même massif, au moins aux étages inférieurs.

### a) Les trois grands réseaux subhorizontaux: un modèle de karstification à l'étage inférieur

Le karst de Villefranche est caractérisé par de grands systèmes souterrains subhorizontaux présentant de larges paléo-drains qui conservent des dépôts alluviaux allogènes, un

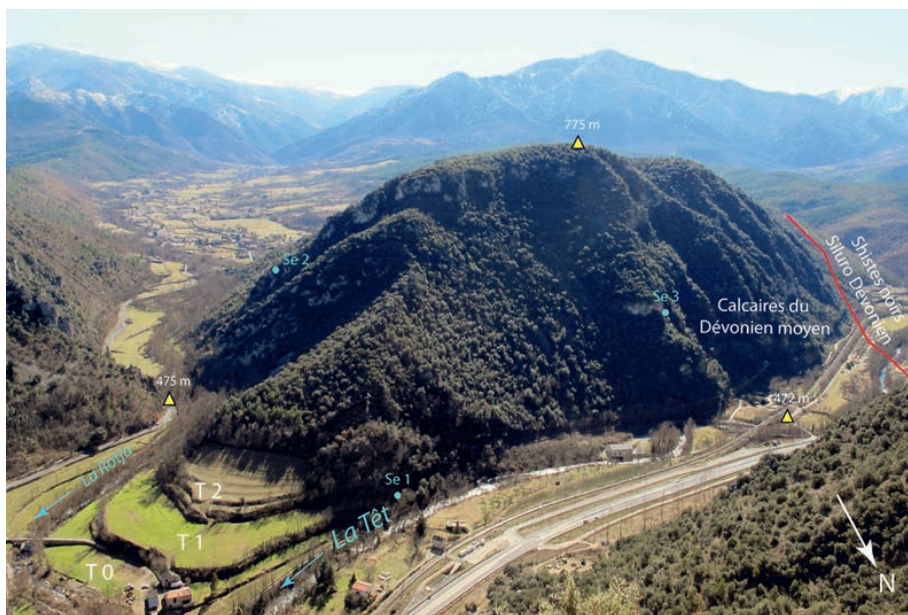


Photo 5: Vue plongeante du massif de la Serre, depuis l'entrée de la grotte de Notre-Dame de Vie à 710 m NGF. Sur ce cliché, sont indiquées les trois cavités du massif dont celle du Mas Py (Se 1) qui est en relation altimétrique avec les basses et moyennes terrasses alluviales du secteur (T1 et T2). Le contact schistes noirs-calcaires du Siluro Dévonien est tracé en rouge. Ces premiers, relativement imperméables, auraient favorisé la capture de la Têt au contact des calcaires du synclinal de Villefranche. *View from above the Serre massif, from the Notre-Dame cave entrance at 710m NGF. On this photo you can see the 3 cavities of the massif. One of them is the Mas Py cavity (Se1) which is in altimetric relation with the low and middle alluvial terraces of the T1 and T2 area. The contact of the Siluro Devonian black lime schists is drawn in red. These ones, which are relatively impervious, would have helped to the privacy of the Têt, in contact with the Villefranche synclinal limes.*

concrétionnement abondant et de vastes salles d'effondrement. Ces trois réseaux sont à des niveaux altimétriques proches, et ont dans leurs massifs respectifs des cavités étagées. C'est dans le massif du Coronat que le potentiel d'étagement est le plus important. Les trois cavités majeures du Conflent développent près de 70 km de galeries, à environ une dizaine de mètres au-dessus du niveau actuel de la Têt. Dans ces cavités, on peut observer des siphons actifs, qui constituent des regards sur la zone noyée de l'aquifère karstique.

Ces grands réseaux souterrains de l'étage inférieur ont principalement été mis en place par les pertes de la Têt et de ses deux affluents : la Rotja et le Cady. Une partie des conduits souterrains est orientée SO-NE, parallèle à l'axe de la vallée de la Têt. L'autre partie est orientée SE-NO, parallèle aux vallées de la Rotja et du Cady. Les galeries SE-NO des réseaux de Fuilla-Canalettes et de Lachambre, ont été mises en place par les paléo-pertes des deux affluents en rive droite de la Têt, alimentés par l'imposant massif du Canigou (2785 m).

En rive droite, le réseau **Lachambre** dans le massif d'Ambulla développe plus de 26 km [Borràs & GES-CSC, 2014]. Il se positionne au niveau ou sous la terrasse T2. L'organisation des conduits de ce système peut être représentée par deux galeries principales orientées SO-NE, parallèles à la Têt : la galerie du Canigou et celle du Marteau. Des fractures SE-NO marquent le changement ponctuel de direction des galeries, qui se traduit sur le terrain par un parcours sinueux de paléodrain présentant des méandres. Cette cavité conserve des morphologies d'érosion et des dépôts alluviaux qui attestent d'un paléo-fonctionnement marqué par différentes phases. Les parois des larges conduits ont enregistré le passage de la rivière souterraine (photo 6), ainsi que les différentes étapes de son évolution dans le temps. Les grottes des Puces (Am 4) et de la Vieille Gare (Am 5), situées en rive droite du Cady à la confluence de la Têt, pourraient être interprétées comme la continuité d'un paléo-système souterrain divisé par l'incision de la vallée du Cady [Hez, 2012]. Quelques autres cavités sont réparties sur le massif ; elles marquent un second niveau de karstification, comme dans les deux autres massifs de la rive droite.

En rive gauche de la vallée du Mardé, au sud du village de Sirach, s'ouvre la



**Photo 6 :** Galerie du Canigou dans le réseau Lachambre. Ce conduit conserve des indicateurs morphogéniques remarquables tel que des formes de creusement caractéristiques, comme les encoches de rivière ainsi que des dépôts alluviaux allogènes de granulométrie variable. Notons la concordance du niveau supérieure de l'encoche de la rive droite avec celui de la rive gauche. Cliché S. Jaillet. *Canigou gallery in the Lachambre network. This pipe has impressive morphogenic indicators such as characteristic excavation shapes, like river notches and allogenic alluvial deposits of different granulometry. Notice the conformity of the upper level notch on the right bank with the notch on the left bank.*

grotte du même nom (Am 13). Elle présente un intérêt géomorphologique quant à la connaissance du paléo-système de la rive droite de la Têt, et pourrait constituer une paléo-émergence d'un niveau supérieur au réseau Lachambre, raccordé à la terrasse T4. Cette cavité se développe en grande partie dans une brèche calcaire burdigalienne (photo 1). Ceci lui confère un atypisme morphogénique notable face aux autres grottes du karst de Villefranche.

Perchée à environ 500 m NGF, dans les Gorges de la Têt, la grotte de Vidatripa présente des paléo-drains parallèles à la vallée. Cette cavité de plus de 2700 mètres de développement correspond au niveau de karstification de la grotte de Sirach, située plus en aval.

Le **réseau de Fuilla-Canalettes**, dans le massif de Badebany, développe 26,5 km de galeries [Borràs & GES-CSC, 2008]. Les conduits de ce système présentent deux orientations majeures, similaires à celles du réseau Lachambre : les galeries SO-NE, parallèles à la vallée de la Têt et les conduits orientés SE-NO, parallèles à la vallée du Cady (figure 3). La grotte de Fuilla (Ba 1) qui s'ouvre en rive droite de la Rotja, au niveau de la terrasse T1, présente des morphologies d'érosion permettant d'indiquer le sens de l'écoulement passé. Cette cavité a probablement fonctionné comme une

perte de la Rotja. Des dépôts détritiques allogènes fins et grossiers sont en place dans toutes les galeries avec parfois des dépôts de sédiments fins piégés dans les parois à plusieurs mètres de hauteur. Ceci indique une remobilisation de ces dépôts par transport et/ou par un phénomène de soutirage. Le secteur des Canalettes (Ba 2) présente plusieurs galeries parallèles de direction SE-NO avec les mêmes indicateurs que la grotte de Fuilla. Ces conduits sont les anciens affluents de la galerie principale orientée SO-NE. Ce grand réseau souterrain subhorizontal conserve de vastes conduits avec des morphologies variées, ponctués par des effondrements notables, ayant créé des salles imposantes. Les dépôts gravitaires formant des éboulis conséquents sont très souvent stabilisés par des dépôts carbonatés. Les grottes de Cova Bastera (Ba 4), de l'Ours (Ba 8) et du Figuier (Ba 10) se situent au-dessus du réseau. Elles constituent des niveaux plus élevés de karstification, identifiés également dans les deux autres massifs de la rive droite (Ambulla et Serre) par des cavités nettement perchées au-dessus de la vallée.

Le **réseau d'En Gorner** est la cavité majeure du massif du Coronat, avec plus de 17 km de galeries. La branche nord de cette grotte est parcourue par un tronçon de rivière d'une centaine de mètres. C'est l'unique portion de rivière souterraine

reconnue dans le karst de Villefranche. Les galeries du siphon amont s'orientent vers la vallée de Nohèdes, tandis que le siphon aval se dirige vers la vallée de la Têt. La coloration de la rivière souterraine effectuée en 1978 est ressortie 45 h plus tard à l'exsurgence de Ria [Salvayre, 1981]. Le village de Ria est alimenté en eau potable par cette émergence karstique (Co 3). Les galeries de Nohèdes et du Métro de ce réseau sont soumises à la montée des eaux, durant la fonte des neiges ou lors d'épisodes prolongés de fortes précipitations. Le siphon aval de la rivière souterraine sature et refoule vers les galeries supérieures. Les conduits du réseau d'En Gorner sont principalement orientés SO-NE, excepté les galeries de Nohèdes et du Métro. Le paysage souterrain observable dans cette cavité est similaire à celui des deux autres réseaux de la rive droite de la Têt. De larges conduits, de nombreux effondrements et des zones très concrétionnées composent cet environnement souterrain. Cette cavité semble avoir connu trois alimentations distinctes ; (i) les pertes de la vallée de la Têt dans le secteur du contact Siluro-Dévonien/Dévonien moyen pour la genèse des conduits SO-NE ; (ii) les pertes de la vallée de Nohèdes qui alimenteraient la rivière souterraine actuelle et anciennement les galeries de Nohèdes et du Métro ; (iii) le massif du Coronat qui représente une surface d'absorption non négligeable, ainsi que ses multiples ravins très incisés, à écoulement temporaire. La paléo-confluence souterraine des deux premières alimentations se situe au point de jonction des galeries de Nohèdes et du Chaos : le carrefour du Métro. Le Puits des Racines est la seconde entrée du réseau d'En Gorner. C'est un puits artificiel donnant accès au secteur ouest du système. Un forage de 14 m a été réalisé pour capter l'eau souterraine et alimenter Villefranche en eau potable. La zone du Puits des Racines est constituée de conduits présentant des morphologies d'érosion attestant d'un paléo-écoulement vers le NE, ce qui confirme que ce secteur est un ancien amont du réseau d'En Gorner [Hez, 2006].

#### **b) Des cavités étagées sur 1 000 m de dénivelé : neuf niveaux reconnus**

L'étagement du karst du massif du Coronat, mis en évidence par l'inventaire et la topographie des cavités (figure 4), se localise sur le versant sud de ce massif, le versant nord constituant la rive droite

de la rivière de Nohèdes. Le premier étage, proche du niveau de base actuel de la Têt, correspond aux grands réseaux souterrains du karst de Villefranche. Le 9<sup>e</sup> niveau se situe à 1 358 m NGF avec la grotte de Roque Fumade. L'amplitude altimétrique de cet étagement est de 978 m, avec une moyenne d'espacement de 134 m entre les niveaux. Les cavités étagées présentent toutes des développements subhorizontaux qui expriment des épisodes de stabilisation du niveau de base de la Têt (Hez 2013b) ; elles révèlent ainsi les phases successives de karstification dans l'histoire de l'encaissement progressif de la Têt.

Les sept étages au-dessus des grands systèmes karstiques ne conservent que des tronçons de galeries limités en développement, du fait (i) de l'érosion qui a engendré le recul et l'incision du versant sud du massif du Coronat, amputant ainsi les cavités d'une partie de leurs conduits, (ii) du colmatage total des galeries par des dépôts alluviaux, gravitaires, carbonatés et détritiques, empêchant toute exploration spéléologique vers la suite logique, indiquée par les coups de gouge observables sur les parois des galeries (ex : grottes du Faubourg et Isabelle), (iii) des interruptions subites de galeries provoquées par les rejeux tectoniques déconnectant ainsi les conduits par le décalage des blocs du massif, comme on peut l'observer dans les grottes du Faubourg et de Notre-Dame de Vie. Un décalage complet d'une vaste galerie nécessiterait un rejet de plusieurs mètres [Hobléa, 1992].

Les morphologies d'érosion fournissent des informations précieuses sur les anciennes circulations souterraines, notamment sur la direction de ces écoulements. Les vagues d'érosion observées sur les parois des cavités étagées attestent d'anciens fonctionnements vers l'intérieur du massif, en direction de l'axe du synclinal de Villefranche (grottes du Faubourg, Co9, et Isabelle, Co21), et aussi parallèlement à la Têt (SO-NE) comme dans la grotte du Guano (Co17) et dans une grande partie du réseau d'En Gorner. Ces tronçons de conduits souterrains étagés peuvent donc correspondre à des niveaux d'auto-captures successives de la Têt en rive gauche. Une grande partie de l'étagement se situe entre Villefranche et le Roc Campagna (Co34), la grotte de Roque Fumade (Co43) en est plus distante. En rive droite, l'étagement de cavités se limite à 2 voire 3 niveaux dans

les massifs nettement moins élevés que celui du Coronat.

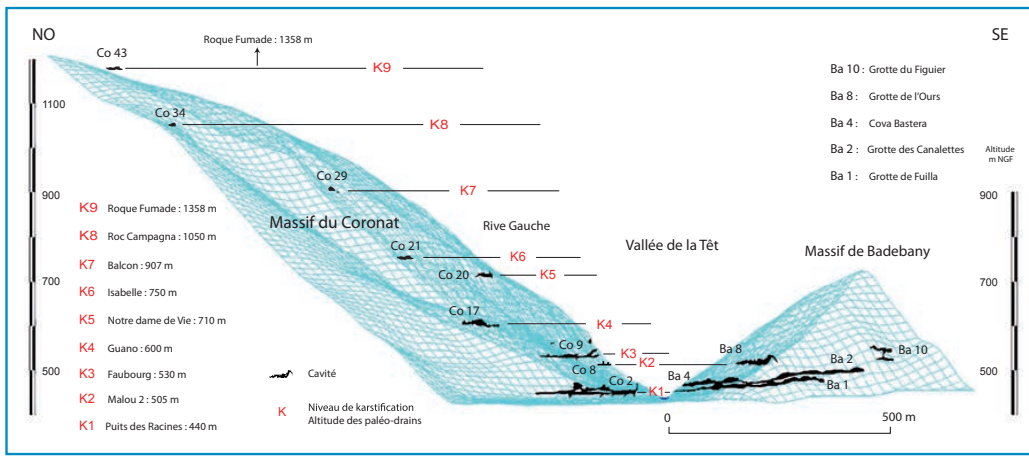
Dans l'état actuel des connaissances spéléologiques, les cavités subhorizontales de cet étagement ne présentent, pas de connexion entre elles (figure 4). En effet, contrairement à un réseau étagé qui possède des niveaux reliés par des conduits verticaux (comme le système de la Dent de Crolles, Chartreuse), l'étagement de cavités du karst de Villefranche semble être constitué de réseaux subhorizontaux distincts issus d'abaissments et de périodes stables répétés du niveau de base de la Têt. Ce rythme d'encaissement défini par des phases de stationnement et d'incision de la vallée, pourrait en partie répondre à nos questionnements concernant la mise en place des réseaux étagés sur le temps long. Néanmoins, les événements tectoniques « récents » et les variations climatiques plio-quaternaires doivent être pris en compte pour compléter la réflexion. De plus, la notion géomorphologique d'étagement de grottes doit s'appuyer sur des considérations géométriques, morphologiques et sédimentologiques [Quinif, 1989 ; Camus, 2003].

#### **c) Des remplissages allogènes présents dans les différents étages du karst**

Les sédiments alluviaux allogènes piégés dans les cavités, sont l'expression d'un fonctionnement en perte de rivière [Kranjc, 1989]. Ils sont acheminés dans les galeries par les pertes ou les captures d'une rivière épigée. L'analyse de ces sédiments permet de retrouver leur origine de surface ainsi que leur mode de dépôt.

Les cavités étagées du karst de Villefranche conservent des remplissages détritiques allogènes piégés notamment dans les conduits du massif du Coronat. Ces dépôts de granulométrie variable se rencontrent sous forme d'argile, de limon, de sable, de gravier et de galet. Ces remplissages détritiques, mis en place par une paléo-Têt et ses affluents, sont conservés dans l'endokarst à presque tous les niveaux de l'étagement (Hez, 2013b). Huit étages sur neuf ont révélé la présence de dépôts alluviaux en place. Les observations menées sur le terrain mettent en évidence une décroissance granulométrique du matériel alluvial en fonction de l'altitude (figure 5), mais aussi en fonction de l'éloignement des tronçons de cavités par rapport à la Têt, ce qui peut expliquer cette diminution de la taille du matériel. Une observation

Figure 4 : Étagement de cavités en rive gauche de la vallée de la Têt, dans le secteur des gorges de Villefranche de Conflent. Les neuf niveaux de grottes conservent des indicateurs de paléo-circulation, ainsi que des dépôts alluviaux allogènes, qui marquent la progression de l'encastement de la vallée, ainsi que les phases successives de karstification.



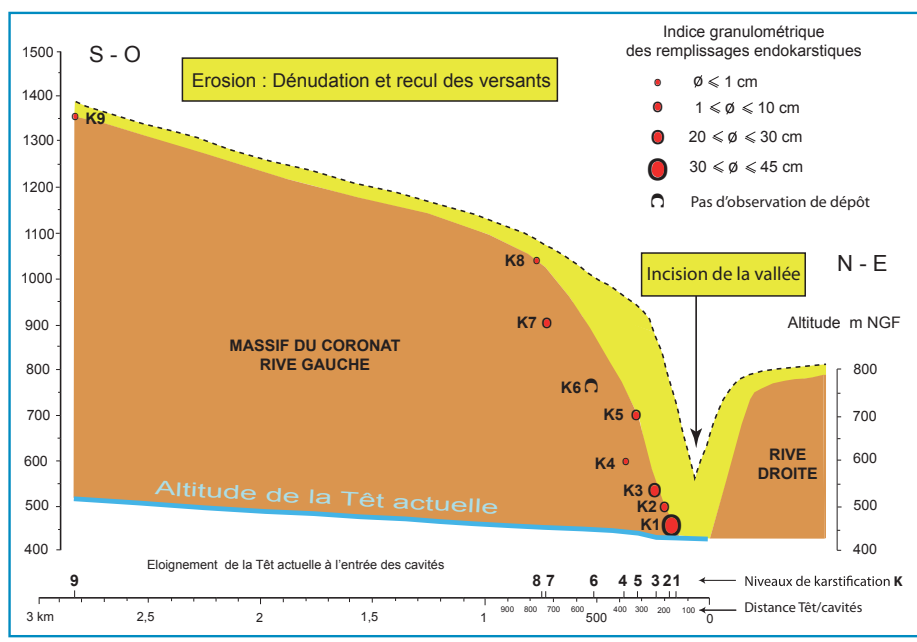
Le réseau de Fuilla-Canalettes est représenté en rive droite. Le massif de Badebany, dans lequel se développe ce système souterrain, possède deux niveaux de cavités. *Cavity stepping on the left bank of the Têt valley, in the area of the Villefranche de Conflent gorges. The cave nine levels keep their paleocirculation indicators, as well as the allogenic alluvial deposits, which indicate the progression of the valley entrenchment, as well as the successive phases of the karstification. The Fuilla-Canalettes network is shown on the right bank. The Badebany massif, in which the underground system is developed as the 2 cavity levels.*

préliminaire de ces dépôts a permis d'identifier des sables micacés, des galets de schistes, des micaschistes, des gneiss ceillés, de granitoïdes et de quartz, à presque tous les niveaux de l'étagement. La nature et la provenance de ces remplissages fluviaux restent encore à définir précisément par une étude pétrographique.

Nous considérons ici que les cavités de ce karst étagé indiquent des niveaux stationnaires de la vallée de la Têt, impliquant chacun une phase de karstification prolongée. Les remplissages alluviaux piégés dans les conduits, ainsi que les morphologies de galeries constituent la mémoire karstique de ces phases stationnaires de la Têt. Or l'étude des cavités permet de mieux en comprendre la morphogenèse, à la fois les conditions de sa mise en place mais aussi celle des dépôts synchrones ou diachrones qui l'occupent. Dans le cas du karst du Conflent, la richesse d'un étagement sur 1 000 m de dénivellation associé

à la présence de sédiments allochtones ouvre une perspective majeure de dater ces niveaux de karstification et donc les phases d'incision de la Têt. Cependant les conduits à grands développements spéléologiques sont essentiellement présents dans les niveaux les plus bas. Dans ces niveaux, on identifie une partie importante des nappes alluviales souterraines (zone d'entrée et transit souterrain). Dans les niveaux les plus hauts, le recul des versants a fait disparaître les conduits les plus proches de la zone des pertes et c'est un matériel plus éloigné des sources qui est en général identifié (figure 5). C'est donc dans les niveaux du bas, à fort développement spéléologique qu'il est possible d'étudier la totalité des morphologies et des dépôts associés et qu'il est donc possible de mieux saisir les relations fines qui unissent karstogenèse et dynamique d'évolution de la vallée et d'établir un modèle, transposable aux étages supérieurs.

Figure 5 : Diagramme de décroissance granulométrique des dépôts alluviaux allogènes piégés dans les cavités étagées du massif du Coronat (Hez 2013b). Cette illustration propose une lecture altitudinale par cavité de l'indice granulométrique des galets et graviers, la taille maximale du grain étant la référence. Une lecture longitudinale permet de situer les cavités par rapport à Têt. *Granulometric decline diagram of the allogenic alluvial deposit trapped in the stepped cavities of the Coronat massif. This drawing offers an altitudinal reading of the granulometric index of the pebbles and gravel, for each cavity. The reference is the maximal size of the grain. A longitudinal reading allows to locate the cavities in comparison with the Têt.*



## II. Un exemple de relation fine karst/terrasses : le puits des Racines avec les basses et moyennes terrasses alluviales (T1 et T2)

### A. Les terrasses alluviales de la Têt dans les gorges de Villefranche

La succession de phases de creusement et de remblaiement d'une vallée est à l'origine de la mise en place des terrasses alluviales. La conservation de celles-ci dépend en grande partie du facteur temps, mais aussi de l'espace latéral dont elles disposent pour se trouver à l'abri des crues méditerranéennes dévastatrices. Dans les gorges de Villefranche, compte tenu du rétrécissement de la vallée (photo 7), certains niveaux de terrasses ne sont pas représentés. En aval des gorges, c'est à partir de Millas que l'on retrouve la série complète des terrasses alluviales de la Têt [Calvet, 1996], dont nous reprenons ici la numérotation. Nous préciserons la localisation et l'analyse préliminaire des dépôts alluviaux de surface. Puis des profils de la Têt, intégrant les terrasses et les cavités, permettront de proposer visuellement un calage altitudinal des trois objets géomorphologiques : rivière/terrasse/karst, afin de poser une première base pour une réflexion concernant les relations spatio-temporelles entre le karst et la vallée.



Photo 7 : Les gorges de Villefranche vues depuis le massif karstique de la Serre en rive droite. On distingue l'encaissement de la Têt au niveau du village de Villefranche. Cette incision fluviale tronçonne la partie orientale du synclinal dévonien. *The Villefranche gorges seen from the Serre karstic massif on the right bank. We can see the Têt entrenchment at the level of the Villefranche village. This fluvial incision cuts the oriental part of the Devonian synclinal.*

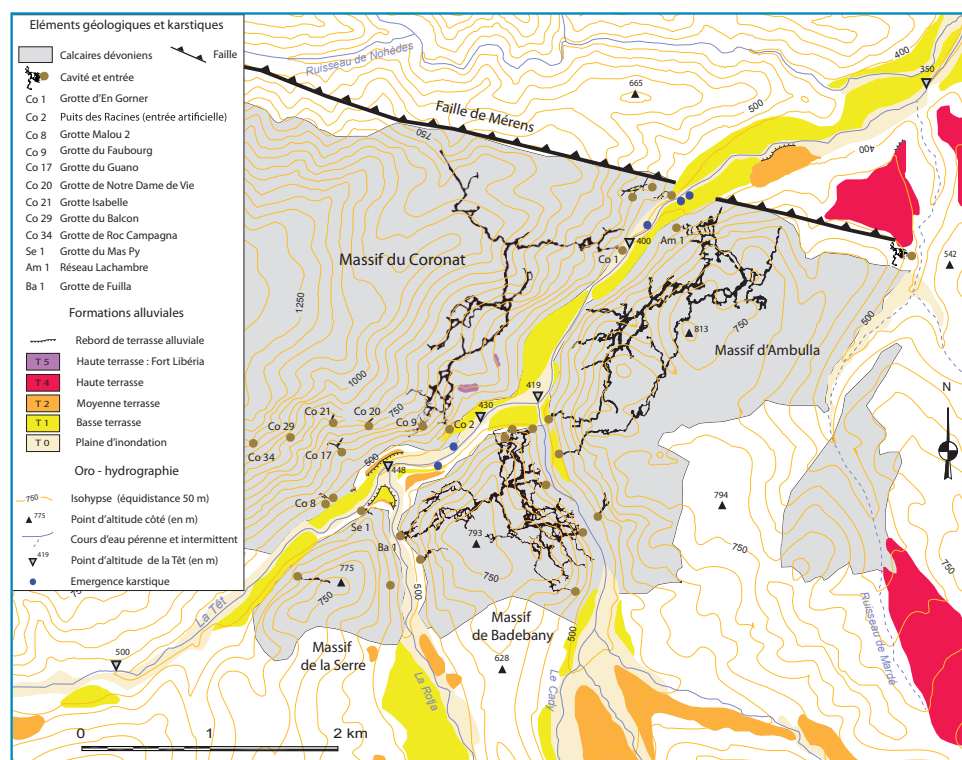
### 1) Localisation et analyse préliminaire des terrasses : une série incomplète

La carte proposée en figure 6 localise les terrasses des gorges de Villefranche ainsi que celles des vallées de la Rotja et du Cady, néanmoins non décrites, car n'entrant pas dans le cadre de cette étude.

Cette carte des terrasses alluviales de la Têt présente la distribution planimétrique, sans information altitudinale,

Figure 6 : Carte des terrasses alluviales de la Têt, de la Rotja et du Cady sur le secteur du karst de Villefranche. Notons l'absence du niveau T3, la faible représentation de T2 dans le passage calcaire de la Têt et l'absence de terrasses au-dessus du niveau T5 à 540 m NGF. Cette carte a été réalisée avec les données du BRGM (1998) en ce qui concerne les formations superficielles du Quaternaire (terrasses uniquement), ainsi que celles du Dévonien moyen. Les

données et les informations prises sur le terrain ont permis de compléter et d'enrichir ce document, notamment en amont et en aval des gorges de Villefranche. *Map of the alluvial terraces of the Têt, of the Rotja and the Cady, in the area of the Villefranche karst. Notice the absence of level 3 as well as the poor presence of the T2 in the Têt lime passage and the absence of terraces above level T5 at 540 m NGF. This map was drawn with the BRGM datas (1998) regarding the superficial formations of the quaternary (only for terraces) as well as those of the middle Devonian. The datas and the informations taken on site have allowed to complete and enrich this document, especially upstream and downstream of Villefranche.*



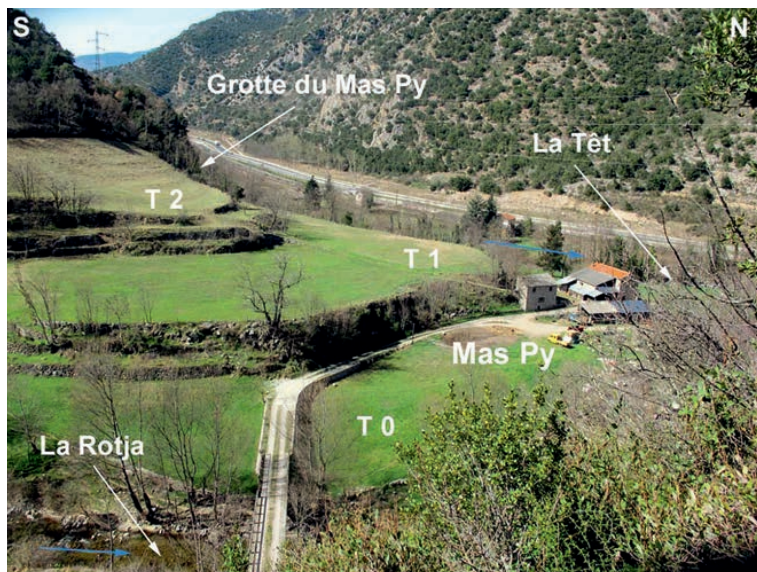


Photo 8 : Ce cliché présente trois niveaux de terrasses à l'amont des gorges de Villefranche, sur le secteur du Mas Py, à la confluence de la Rotja et de la Têt en rive droite de cette dernière. Cet étagement de terrasses est relativement bien marqué. Il s'agit de T0, le niveau d'alluvions actuelles à environ 450 m NGF. T0 est susceptible d'être à nouveau inondée, comme cela a été le cas lors de l'épisode de crue centennale en 1940. Ce niveau inondable est devenu une terre agricole après avoir dégagé vers la rivière les blocs imposants déposés par cette crue historique. Le toit de T1 se cale à environ 460 m NGF et celui de T2, non préservé, est tronqué par le versant. C'est légèrement en contrebas de celle-ci que se trouve la grotte du Mas Py en rive droite de la Têt. Cette cavité a probablement fonctionné en perte de la Rotja pour émerger dans la vallée de la Têt. *This photo shows three terrace levels downstream the Villefranche gorges, in the Mas de Py area, at the confluence of the Rotja and the Têt. This stepping of terraces is relatively well marked. It wedges T0, the existing alluvial level at about 450m NGF. Notice that T0 is liable to be flooded again, as this was the case during the centennial flood in 1940. This level which is liable to be flooded again, has become cultivated land after the massive blocks were carried by the historical flood. T1 roof was wedged at about 460m NGF and T2 roof, unpreserved, is truncated by the slopes. On the right bank, the Mas Py cave is located slightly below.*

des dépôts alluviaux sur le tronçon allant de Serdinya à Ria-Sirach, de l'amont vers l'aval, avec superposition des grands réseaux souterrains. Les principales caractéristiques de ces dépôts et des formes qu'ils construisent sont :

- une bonne distribution et une relative continuité du niveau de la basse terrasse T1 ;
- une faible présence de la moyenne terrasse du niveau T2 ;
- aucun jalon de T3 et T4 repéré dans la vallée au niveau des gorges [Calvet, 1996], mais T4 est présent immédiatement à la sortie (niveau de Sirach) ;
- la conservation d'un lambeau de la haute terrasse du niveau T5 (fort de Villefranche) ;
- l'absence de terrasses au-dessus du niveau T5.

Les notions de superposition et d'emboîtement d'unités alluviales ne sont pas abordées dans cette étude. L'analyse de la géométrie des terrasses demanderait une étude détaillée de chaque nappe ; ceci permettrait de caler plus finement les phases d'incision et d'aggradation, liées aux variations du niveau de base.

**Niveau T0** : il représente le niveau des alluvions actuelles et holocènes, constituées de matériaux grossiers (blocs, galets et graviers), ainsi que du matériel plus fin comme le sable. Granites, gneiss, quartz et schistes sont présents dans cette nappe alluviale. Notons qu'en aval des gorges, on trouve des blocs et galets de marbre du synclinal de Villefranche. Ce niveau est remanié au gré des crues. Il est situé à une altitude de 0 à 2 m au-dessus de la Têt, et sa répartition est évidemment continue sur le tronçon étudié.

**Niveau T1** : cette basse terrasse présente au moins deux paliers étagés de quelques mètres, dont les caractéristiques sédimentologiques et altérologiques sont identiques. Ces

niveaux ne sont jamais sapés par la Têt et sont souvent occupés par des cultures irriguées ou des friches. Les dépôts y sont en surface limoneux et fertiles. Les galets et blocs rencontrés sont majoritairement sains. Le village et la gare de Villefranche ont été bâtis sur cette nappe. Située entre 15 et 20 m au-dessus du lit de la Têt, elle s'étend sur l'ensemble du parcours du fleuve dans les gorges, avec néanmoins quelques discontinuités.

**Niveau T2** : cette moyenne terrasse est aussi constituée de matériaux grossiers, galets de granites, gneiss, quartz et schistes, colmatés par des éléments plus fins. L'altération des galets devient flagrante et les matériaux sains sont minoritaires [Calvet, 1996]. On localise cette terrasse en amont et en aval des gorges, et au niveau de la confluence de la Rotja et de la Têt, en rive droite au Mas Py (photo 8), et en rive gauche en face du mas, ainsi qu'au niveau du forage du puits des Racines. Cette nappe alluviale domine la Têt de 25 à 30 m environ. Elle est donc peu représentée dans les gorges.

**Niveau T3** : non observé dans le secteur des gorges de Villefranche.

**Niveau T4** : il fait partie des hautes terrasses alluviales. Les galets y sont tous très altérés, la part des fantômes dépasse 20 % et l'enrichissement superficiel en quartz et quartzites devient total sur une tranche d'ordre métrique [Calvet, 1996]. Cette nappe, localisée à l'E-S-E, de Ria forme une unité tronçonnée par la vallée du Mardi. On ne la trouve pas dans les gorges de Villefranche, mais en rive droite de la Têt, à l'extrémité nord du village de Sirach, sur la partie N-E du massif d'Ambula. Cette nappe alluviale domine la Têt d'environ 80 m et se raccorde latéralement à d'importants cônes de déjection issus du Canigou (figure 6).

**Niveau T5** : cette haute terrasse serait la plus ancienne de la série. Son altération est très profonde, la part des fantômes peut dépasser 50 % et les galets deviennent parfois pulvérulents [Calvet, 1996]. Le lambeau de terrasse situé à environ 540 m NGF à l'ouest du Fort Libéria en rive gauche de la Têt, sur le versant du massif du Coronat, est l'unique vestige de cette nappe alluviale observé dans les gorges de Villefranche, outre un minuscule affleurement à l'E du fort Libéria dans le sentier d'accès. Il est recouvert par de très épais dépôts de versant cimentés par du calcaire, qui l'ont préservé. La terrasse correspond au niveau altitudinal de la grotte du Faubourg, située plus en amont sur le massif. On distingue des sables en surface de cette terrasse, sur la marge de la nappe en position d'abri par rapport à l'axe fluvial [Calvet & al., 2015], ainsi que des gros blocs et des galets de gneiss et de granite, en surface et

remaniés dans les murs de terrasses cultivables. Cette nappe alluviale se situe à environ 110 m au-dessus de la Têt.

L'altitude relative des terrasses alluviales est une information permettant de tracer les profils longitudinaux des anciens lits de la Têt, et renseigne sur la chronologie relative des épisodes d'incision et d'aggradation.

**2) Analyse des profils Têt-terrasses-cavités : les grands réseaux sous T2**

Dans le cadre de l'étude des relations entre l'endokarst et les terrasses de la vallée, il convient de connaître la pente du cours d'eau, la position altimétrique du toit des terrasses dans leurs continuités, et la localisation altimétrique des paléodraines de l'endokarst, et non des entrées de grottes qui ne correspondent pas forcément aux altitudes des anciens écoulements souterrains. Les exemples du puits des Racines et de la grotte du Faubourg illustrent bien cette différence [Hez, 2012].

**• Le profil de la Têt dans le secteur des gorges de Villefranche**

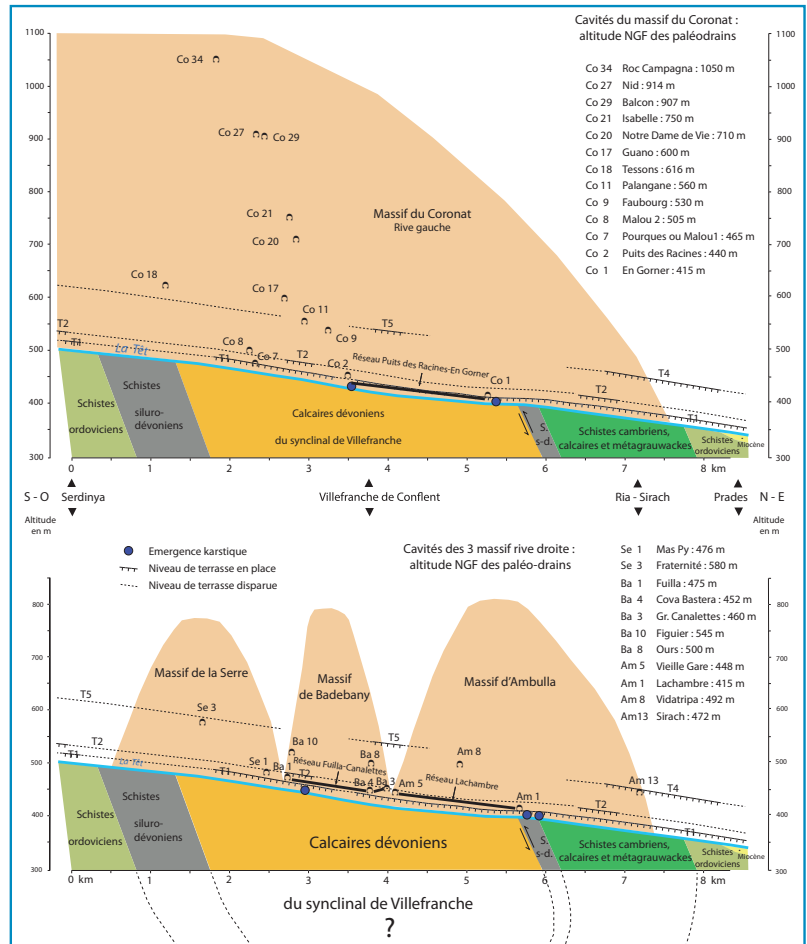
La pente moyenne du cours d'eau est de 1,68 % sur une distance de 9,3 km. Le profil du cours d'eau ne présente pas de rupture de pente, néanmoins quelques secteurs de rapides et de cascades sont observables tout le long du tronçon étudié. La zone encaissée de l'aval des gorges marque localement une zone plus plane.

Entre les points cotés 419 et 405 m, un barrage hydroélectrique génère une chute d'environ 4 mètres pour une retenue d'environ 250 m de long. Les fluctuations du niveau de cette retenue, dues à la vidange et au remplissage génèrent des variations du niveau de la zone noyée du réseau Lachambre, phénomène constaté dès les années 1980 par le Conflent Spéléo Club.

**• Les profils Têt-terrasses-cavités : enseignements et hypothèses**

Les profils des niveaux alluviaux présentés correspondent au toit estimé de la terrasse; celui-ci n'est pas toujours évident à déterminer. La terrasse fluviale est définie comme un replat qui représente un ancien niveau de la rivière ou du fleuve qui s'est enfoncé. Elle est caractérisée par une altitude relative par rapport au lit actuel du cours d'eau. Cette notion implique que la terrasse fluviale est ici une surface et non un volume.

La figure 7 présente une coupe longitudinale des nappes alluviales et des cavités, d'amont en aval de la vallée de la Têt. Cela permet de visualiser les niveaux de terrasses entre elles, et les relations avec les différents niveaux de karstification, pour tenter par la



suite une approche spatio-temporelle entre le karst et sa vallée.

Les **niveaux de terrasses** souvent discontinus dans les gorges, ne présentent pas de rupture de pente notable mais plutôt des profils linéaires qui constituent un étagement relativement parallèle au fond de vallée. Les nappes alluviales sont clairement discontinues à partir de T2, l'érosion agissant dans la vallée étroite a détruit une partie des terrasses.

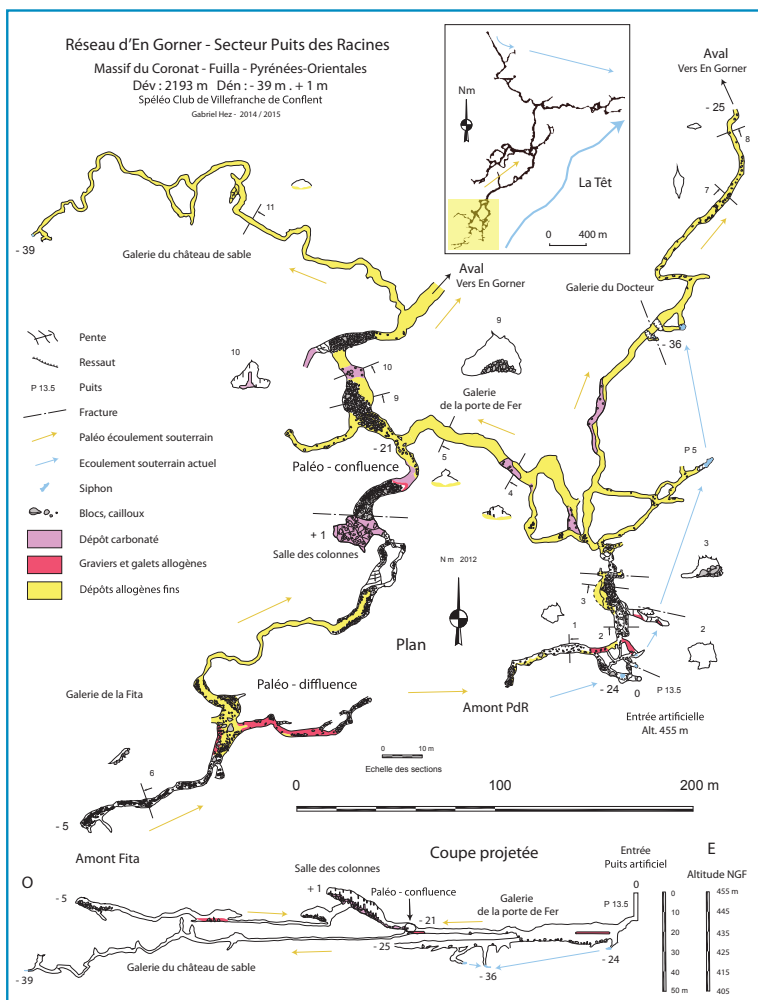
Les eaux du karst, en rive gauche, pour le réseau du Puits des Racines-En Gornier, et en rive droite pour le réseau Lachambre, émergent au niveau du lit actuel de la Têt T0, qui localise étroitement toutes les résurgences.

Le niveau T1 de basse terrasse, reste sous le niveau des palé-drains majeurs du réseau Lachambre; l'entrée du réseau de Fuilla est au niveau des alluvions T1 qui le colmatent; le système d'En Gornier se place immédiatement sous le plan de cette terrasse. Le niveau T2 offre une discontinuité claire. On peut l'observer sur le secteur de la confluence Têt-Rotja, en amont des gorges, et en aval à l'entrée du village de Ria. Son altitude relative (toit à +25 à +30 m) se place au-dessus des palé-drains majeurs des grands réseaux souterrains situés

Figure 7 : Présentation de l'étagement des palé-drains de l'endokarst du massif du Coronat situé en rive gauche, et des trois massifs karstiques situés en rive droite de la Têt, ainsi que le calage altitudinal des terrasses alluviales, deux rives confondues. On distingue la relation altitudinale des terrasses T1 et T2 avec les grands réseaux souterrains. *Presentation of the stepping of the Coronat massif endokarst paleodrain located on the left bank, and of the three karstic massifs located on the right bank of the Têt, as well as the altitudinal calibration of the alluvial terraces, for both banks. We can notice the altitudinal relation of the T1 and T2 terraces with the large underground network.*

Figure 8: La cartographie des principales galeries du secteur du puits des Racines met en évidence l'organisation des conduits souterrains, ainsi que les directions des paléo-écoulements enregistrés sur les parois des galeries. La coupe projetée cale le réseau par rapport au 0 de l'entrée. Une échelle d'altitude NGF, permet de situer les galeries à des altitudes absolues.

The cartography of the main galleries in the Puits des Racines area shows the underground conduit organization, as well as the paleoflows recorded on the gallery walls. The projected section adjusts the network regarding the zero meter at the entrance. An altitude NGF scale allows to locate the galleries at absolute elevations.



en rive droite et rive gauche de la Têt (réseau Lachambre, grotte de Mas Py, galeries supérieures d'en Gorner...). Le niveau T3, absent dans les gorges, pourrait uniquement être identifié dans des dépôts alluviaux observés dans la grotte de Malou 2 (Co 8) en rive gauche. C'est un tronçon de paléo-drain d'environ 70 m de développement, située à 505 m NGF et localisé en amont des gorges (figures 4 et 7). L'altitude relative de témoin endokarstique de cette hypothétique T3 se situe à + 43 m. En rive droite la Cova Bastera (Ba4) à 475 m NGF pourrait aussi jalonner un niveau T3 situé à + 56 m.

Le paléo-drain majeur de la grotte de Sirach se positionne légèrement en dessous de la terrasse T4, à 472 m NGF, à l'est du massif d'Ambulla. L'altitude relative de cette terrasse se situe à environ + 80 m. La grotte de l'Ours est une cavité d'environ 200 m de développement qui présente de beaux remplissages allogènes et des conduits phréatiques de grandes sections. Elle est située à 500 m NGF sur le massif de Badebany, au-dessus du réseau de Fuilla-Canalettes. Son altitude relative de

+ 81 m correspondrait au niveau de T4 absent dans les gorges. On pourrait aussi rapprocher du niveau T4 le réseau de Vidatripa dans le massif d'Ambulla, vers +90 m (figures 7 et 11).

Le paléo-drain de la grotte du Faubourg, situé à 530 m NGF, correspond exactement au niveau de la plus haute nappe T5 à une altitude relative de +110 m. Sur le massif de la Serre en rive droite, la grotte de la Fraternité, située à 580 m NGF pourrait aussi correspondre à ce niveau alluvial.

En ce qui concerne le karst de la rive gauche (figure 7), les terrasses sont absentes au-dessus de T5, alors que l'étagement de cavités subsiste jusqu'à 1358 m NGF avec la grotte de Roque Fumade (hors figure). En outre les niveaux endokarstiques reconnus, compris entre 600 et 1358 m NGF, abritent des dépôts alluviaux allogènes dans leurs conduits. La conservation de ces remplissages atteste d'anciens niveaux alluviaux de la Têt, qui ne se retrouvent pas sous forme de terrasses alluviales sur le versant du massif du Coronat. Le temps long et le recul des versants par l'érosion, expliquent en partie la disparition de ces nappes alluviales. L'endokarst de ce massif représente donc un potentiel incontestable concernant la connaissance des rythmes d'encaissement de la vallée de la Têt sur près de 1000 mètres de dénivelé. Des datations de matériels allogènes piégés dans l'endokarst au-delà du niveau T5, sont en cours dans le cadre de la thèse d'A. Sartégou (Université de Perpignan, direction : Marc Calvet et Didier Bourlés).

Il apparaît donc clairement que les trois grands réseaux souterrains du karst de Villefranche se placent sous le niveau de la nappe alluviale T2 et, pour En Gorner, sous le niveau de T1. L'altitude relative moyenne des paléo-drains de ces réseaux est de + 10 à + 20 m. Il reste délicat de définir clairement la relation altitudinale fine entre ces surfaces alluviales et les réseaux tant les questions de précisions altimétriques sont inframétriques. Néanmoins le cas du Puits des Racines (amont du réseau d'En Gorner) offre une opportunité d'analyser ce qui se passe sous les terrasses T2 et T1.

## B. Analyse du karst sous T1 : vers un modèle conceptuel

On tentera ici d'illustrer par une approche préliminaire les relations spatio-temporelles entre le karst et la vallée au droit du réseau du puits des Racines.

### 1) Le secteur amont des gorges: le réseau du Puits des Racines en rive gauche

Le secteur du puits des Racines peut être considéré comme la partie amont du réseau d'En Gorner (figure 8). Dans le cadre de cette

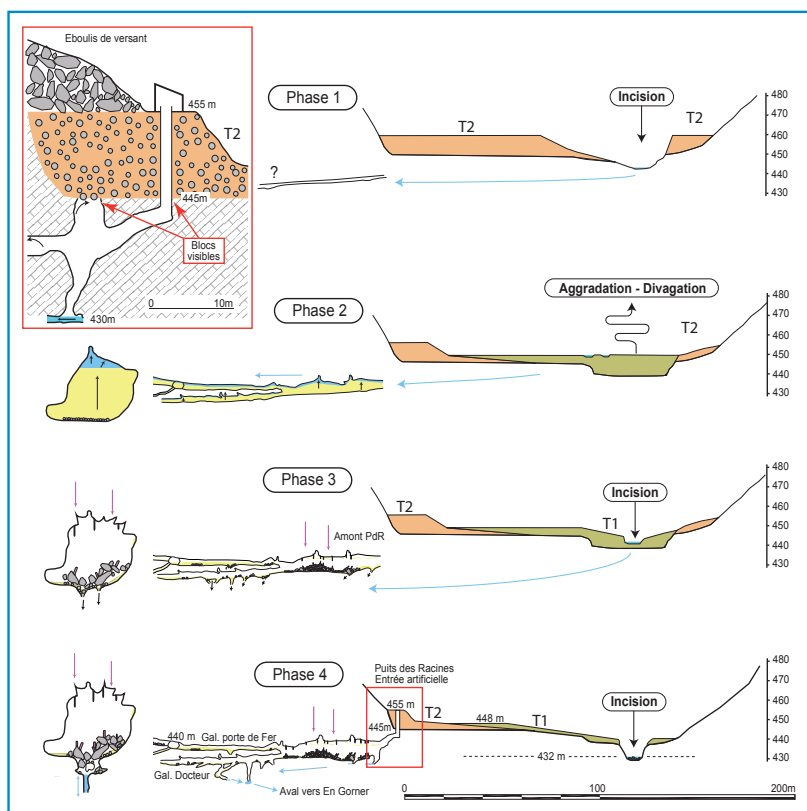


Figure 9 : Approche spatio-temporelle des relations karst/vallée entre le réseau du Puits des Racines et la vallée de la Têt. Cette reconstitution est présentée en quatre phases morphogéniques. *Spacio-temporal approach of the karst/valley connections between the Puits des Racines cave and the Têt valley. This reconstruction is shown in 4 morphogenetic phases.*

approche spatio-temporelle, le secteur du puits des Racines a été choisi pour sa proximité avec la Têt, qui conserve des terrasses alluviales proches des altitudes des paléo-drains de l'endokarst qui a piégé ce matériel alluvial.

Nous avons vu précédemment que le réseau puits des Racines-En Gornier se place sous les niveaux de terrasse T2 et T1. Les divers indicateurs morphogéniques conservés dans les galeries du puits des Racines (séquences alluviales et leur degré d'altération, marques de corrosion sur les parois, spéléothèmes...) sont les témoins de l'évolution du niveau de base de la vallée de la Têt. Il s'agit ici de caler les épisodes morphogéniques de l'endokarst avec ceux de la vallée de la Têt, par un alignement spatial (l'altitude) et par une chronologie relative présentée en quatre phases morphogéniques (figure 9). La découverte récente (Hez, travaux en cours) d'un segment de galerie supérieure (la galerie du Sablier) 10 m au-dessus du plancher de la galerie principale d'En Gornier, permet de séparer les épisodes contemporains des terrasses T2 et T1 dans ce réseau. Cette galerie haute est presque

entièrement colmatée par une séquence alluviale au degré d'altération caractéristique de T2. Par contre l'ensemble des matériaux caillouteux allogènes observés dans les galeries inférieures est peu ou pas altéré et typique de la terrasse T1. Le puits artificiel des Racines recoupe un lambeau de nappe T2 entre 455 et 445 m, soit la tranche altitudinale de la galerie haute du Sablier. La grande galerie à la paléo-confluence est à 434 m et son toit à 440 m, soit clairement sous le toit de la terrasse T1 (449-448 m au pied de la terrasse T1 (449-448 m au pied de la terrasse T1 des Racines)). Il est donc clair que pour l'essentiel le réseau actuellement connu d'En Gornier s'est développé pendant la mise en place du cycle incision/aggradation de la terrasse T1, soit pendant le dernier cycle climatique.

L'extrême amont du secteur étudié est la galerie de la Fita ; celle-ci se divise en deux au niveau de la paléo-différence où une galerie prend la direction nord-est, vers la salle des Colonnes, tandis que l'autre s'oriente vers l'est. Cette dernière, obstruée par des effondrements, se dirige vers l'amont du puits des Racines, dont la continuité est la galerie de la Porte de

Fer qui rejoint l'aval de la galerie de la Fita à la paléo-confluence cotée -21 m. Ensuite, une galerie de grande dimension s'oriente vers l'aval du réseau. La galerie du Château de Sable constitue une capture en rive gauche du drain principal qui atteint à son extrémité ouest la cote de -39 m. La galerie du Docteur s'oriente nord-est vers l'aval du réseau. Ce secteur permet d'avoir un visuel sur un actif à travers plusieurs regards depuis la zone captée du puits des Racines jusqu'à la galerie du Docteur. La circulation de cet actif prend la direction logique nord-est sur ce tronçon observé. Les études physico-chimiques des eaux superficielles de la Têt et des eaux souterraines du puits des Racines, effectuées en 1989 pour l'étude préliminaire du captage, confirment que l'eau souterraine ne provient pas de la Têt, mais bien du massif du Coronat. Des traces d'écoulement récentes en surface du remplissage suggèrent que lors des plus grandes crues historiques de la Têt le réseau a pu connaître épisodiquement un fonctionnement épiphréatique, au moins dans certains segments. La topographie présentée en figure 8 permet de mieux appréhender la figure 9 qui propose une reconstitution morphogénique par coupes de l'endokarst du secteur du puits des Racines en quatre épisodes, en relation avec la vallée de la Têt.

## 2) Approche spatio-temporelle karst/vallée : le cas du Puits des Racines en relation avec la vallée de la Têt

Cet essai de reconstitution a pu être réalisé : (i) à partir des données spéléométriques du secteur du puits des Racines [SCV et Hez, 2006 à 2014], (ii) avec des observations et photographies réalisées en 2014 et 2015 dans la cavité [Hez, 2014 et 2015], et (iii) à l'aide d'observations concernant les nappes alluviales, recueillies sur le terrain [Calvet, 1996]. Enfin, le rapport technique du forage du puits des Racines [Eau et développement, 1989] a permis de caler en altitude le niveau de T2 avec plus de précision. Des mesures altimétriques au GPSD complètent cette analyse.

Les quatre épisodes morphogéniques proposés illustrent la mise en place et le paléo-fonctionnement du secteur amont du réseau d'En Gornier : le puits des Racines. Cette zone d'étude représentée en coupe est calée en altitude avec la vallée de la Têt au niveau du Faubourg de Villefranche. La galerie de la Fita, située plus en amont, atteint la

Photo 9 : Encoche latérale dans la galerie de la Porte de fer, puits des Racines. Cette morphologie d'érosion marque la première incision notable de la Têt dans sa vallée (figure 9, phase 3). La flèche indique le sens du paléo-écoulement. Celui-ci est enregistré par des coups de gouge au-dessus et dans l'encoche. La ligne bleue horizontale indique le niveau du plan d'eau responsable de la formation cette encoche. Les dépôts à droite au premier plan, sont constitués de blocs d'effondrement légèrement calcifiés, ainsi que de fragments de plancher de calcite démantelés et conservant des sables fins. Ces indicateurs morphogéniques sont associés à la phase 4 (figure 9).

*Lateral notch in the porte de fer gallery. This erosion morphology indicates the first noticeable incision of the Têt in this valley. The arrow shows the paleo flow direction. This one is recorded by scallops above and in the notch. The horizontal blue line shows the water level responsible for this notch formation. The deposits on the right in the foreground are constituted of slightly calcified collapse blocks, as well as dismantled calcite floor fragments which contain fine sands. These morphogenic indicators are posterior to phase 4 (sketch 9).*



cote -5 (450 m NGF) et se trouve à environ 300 mètres de l'entrée artificielle du puits des Racines. La reconstitution est accompagnée à chaque phase par une section idéalisée de la galerie de la porte de fer.

- **Phase 0** : elle correspond aux différentes phases génétiques des conduits supérieurs en lien avec des niveaux de terrasses sus-jacent. Il a été possible de reconnaître certains de ces niveaux dans le réseau d'En Gornier (galerie haute du sablier), mais nous limitons ici la reconstitution aux conduits principaux du puits des Racines.

- **Phase 1** : l'incision de la vallée et notamment de la terrasse T2, est enregistrée dans le karst par le creusement de conduit mais dont la géométrie n'est pas clairement connue à ce jour. Une encoche latérale de rivière est identifiée en certains points du conduit et pourrait se rattacher à cette phase, mais sans certitude. Elle témoignerait d'un régime vadose à écoulement libre, formant de long « plan d'eau » associé à une pente faible du réseau souterrain (photo 9). La galerie du

Château de Sable se met probablement en place durant cette période d'incision, qui pourrait se placer dans un interstade du dernier cycle glaciaire.

- **Phase 2** : l'aggradation de la vallée de la Têt (probable mise en place de T1 ou seulement de son palier inférieur) est enregistrée dans le karst par une phase d'ennoiement des conduits. Un régime paragénétique assimilé à un écoulement lent favorable au dépôt de matériel fin se met en place. Les banquettes limites observables dans toutes les galeries attestent d'une aggradation importante allant jusqu'au sommet des plafonds (photo 10) [Renault, 1970]. La circulation de l'eau sur les dépôts alluviaux fins (sables, limons, argiles) permet la corrosion de la voûte *per ascensum*. Les morphologies d'érosion de plafond et les dépôts perchés observés dans la cavité confirment cette phase paragénétique (photo 11).

- **Phase 3** : une période d'incision de la vallée, trépanant T1, à titre d'hypothèse pendant la fin du dernier cycle glaciaire ou le début de l'Holocène, réinstalle un régime vadose qui va inciser et transporter une partie des dépôts fins de la phase précédente. L'infiltration de l'eau collectée par le massif du Coronat va engendrer le concrétionnement des



Photo 10 : Dans le puits des Racines, lambeau de banquette-limite située à 60 mètres en aval de la paléo-confluence (figure 8, section n° 10). On remarque au-dessus de ce dépôt la forme du conduit paragénétique creusé *per ascensum*. Cette galerie conserve les morphologies d'encoche de la phase 3 (figure 9), ainsi que les dépôts allogènes fins scellés par un plancher stalagmitique lui-même recouvert en partie par des blocs d'effondrement plus récents. *Fragment of bench-limit located at 60m downstream the paleo-confluence. Above this deposit you can notice a paragenetic conduit dug per ascensum. This gallery keeps the notch of phase3, as well as the small allogenic deposits sealed by a stalagmitic floor which is partly covered with more recent collapsed blocks.*

galeries, et notamment sur les dépôts fins. Des effondrements de plafond, dus au déséquilibre des voûtes par la vidange partielle des conduits, sont observables en divers points du réseau. La salle des colonnes est un exemple de ce phénomène post-paragénétique. L'effondrement du plafond de la salle des Colonnes a obstrué en partie le passage de la rivière souterraine, provoquant, par l'effet barrage, un écoulement plus lent en amont. Ceci a favorisé l'aggradation d'un matériel fin observé à l'amont de ce chaos dans la galerie de la Fita (figure 8). Une première génération de stalagmites vient alors calcifier et sceller ces dépôts gravitaires.

- **Phase 4** : l'incision de la vallée de la Têt se poursuit et est marquée dans le karst par l'abandon de la rivière souterraine dans les conduits. De nombreux soutirages, observables dans toutes les galeries du réseau, confirment cet abaissement du niveau de base de la Têt. L'écoulement endokarstique noyé privilégie le réseau de fractures et de joints de strate pour circuler lentement deux à trois mètres sous le niveau précédent. Cet épisode représente la situation actuelle du réseau du puits des Racines et de la vallée de la Têt au niveau du Faubourg de Villefranche. Notons qu'à ce stade, le lit actuel du fleuve se développe sur le bedrock constitué de calcaires dévoniens du synclinal de Villefranche. Les études physico-chimiques montrent que l'eau qui circule au niveau du puits des Racines ne provient pas de la Têt, mais des eaux d'infiltrations du massif du Coronat [Eau et développement, 1989].

La reconstitution proposée ici est valide en termes de calage altitudinal et d'emboîtement des objets entre eux. Seule la datation systématique des spéléothèmes permettrait de contrôler la validité de ce scénario, en précisant l'âge d'abandon des conduits par la rivière souterraine. Pour les dépôts alluviaux allogènes, leur datation est hors d'atteinte avec la méthode enfouissement actuelle utilisant les nucléides cosmogéniques  $^{26}\text{Al}$  et  $^{10}\text{Be}$  et suppose d'autres approches, en cours (OSL, couple  $^{14}\text{C}$ - $^{10}\text{Be}$ , RPE).

### 3) Un apport décisif à la compréhension karst / terrasse

Cette proposition de reconstitution, concernant la morphogenèse de cette partie du réseau d'En Gorner en relation avec l'évolution du niveau de base de la vallée de la Têt, amène à considérer le



Photo 11 : Situé dans la galerie de la Porte de fer, la morphologie de ce tronçon de conduit est caractéristique du régime paragénétique enregistré dans le Puits des Racines. Le plancher de calcite, nettement visible au premier plan, semble sceller des dépôts fins. Du remplissage sableux recouvre partiellement ce dépôt carbonaté. D'après des observations récentes, ces sables sont affectés par un remaniement tardif. Located in the porte de fer gallery, the morphology of this conduit section is characteristic of the paragenetic regime recorded in the Puits des Racines. The calcite floor which is clearly visible on the foreground, seals the small deposits. Sand filling partially covers this carbonated deposit.

karst comme un indicateur performant dans l'étude des périodes d'incision et d'aggradation de la vallée.

L'approche proposée ici par la chronologie relative permet de replacer les différents événements survenus dans la vallée grâce aux indicateurs endokarstiques tels que les dépôts allogènes, les morphologies d'érosion de parois et les dépôts carbonatés. L'aggradation massive enregistrée dans les galeries du puits des Racines serait contemporaine de l'accumulation de la nappe T1. En effet, le toit de T1 sup. se trouve à environ 449 m NGF dans le secteur du Faubourg de Villefranche pour des drains endokarstiques situés à une altitude d'environ 434 m NGF, comme l'a clairement montré une campagne de mesures GPS différentiel des toits de terrasses et des entrées de cavités. Or le toit de la terrasse T2, peu observable dans les gorges de Villefranche, est calé à 460 m NGF ; celle-ci est mise en évidence par le forage du captage qui traverse depuis son sommet environ 10 m d'une formation alluviale de blocs pluri-décimétriques (figure 9). L'altération flagrante des blocs de granite et de gneiss correspond à celle décrite pour la nappe alluviale T2 [Calvet, 1996]. Cette coupe de T2 permet de caler sa base à environ 445 m NGF, c'est-à-dire juste au-dessus du plafond des galeries du secteur, mais la nappe alluviale en question correspond exactement à la position

de la galerie supérieure du Sablier et à son matériel altéré. On observe notamment des blocs pluri-décimétriques posés sur le substratum, n'ayant pu entrer dans le karst du fait de leurs tailles imposantes.

Les quatre phases proposées (figure 9), correspondent à la mise en place puis à l'incision de T1. Ce travail de reconstitution pourrait être enrichi par une connaissance plus fine des modalités d'évolution des conduits à l'aval du système. Ce travail au droit des émergences reste à conduire. Il permettra de mieux intégrer le rôle des gradients hydraulique qui contrôle à la fois les pentes piézométriques mais aussi la compétence des eaux allogènes circulant dans les conduits.

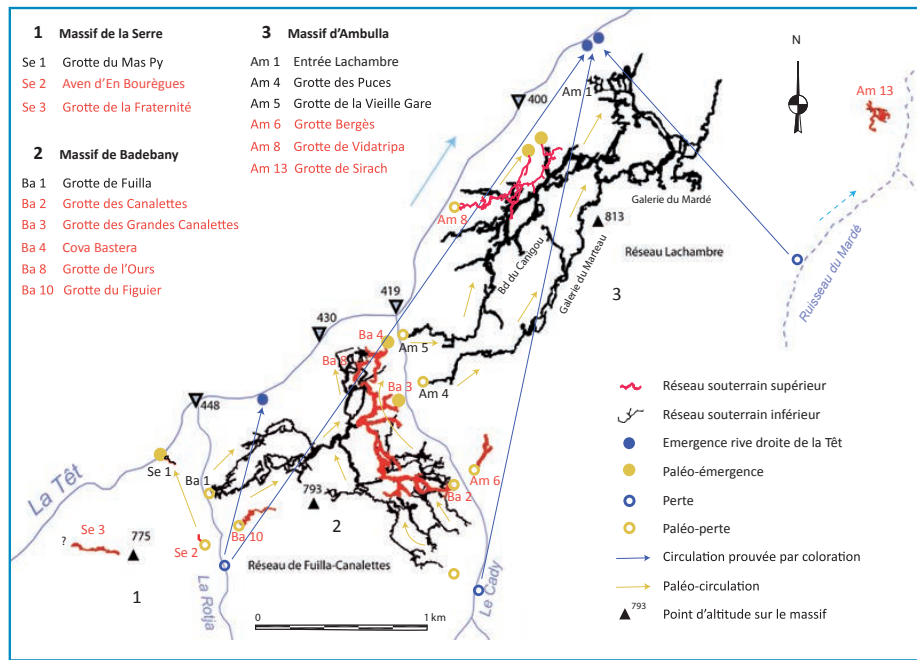
## III. Le remarquable karst étagé de Villefranche

Nous présentons ici le karst de la rive droite et le travail de datation consacré au karst étagé de la rive gauche. Nous exposons ensuite les résultats des datations cosmogéniques des remplissages endokarstiques de deux niveaux de karstification, pour proposer une reconstitution morphogénique de l'incision de la vallée de la Têt depuis le Pliocène.

### A. Le karst de la rive droite : l'implication de trois cours d'eau

Le karst de la rive droite de la Têt est composé de trois massifs : la Serre,

Figure 10: Carte de la mise en place des réseaux souterrains de la rive droite, intégrant les paléo-circulations des deux niveaux de karstification, ainsi que les circulations de la zone noyée, prouvées par coloration. *Map of the positioning of underground network on the right bank, integrating the paleo circulation of the two karstification levels, as well as the flooded area circulations, proved by tracing.*



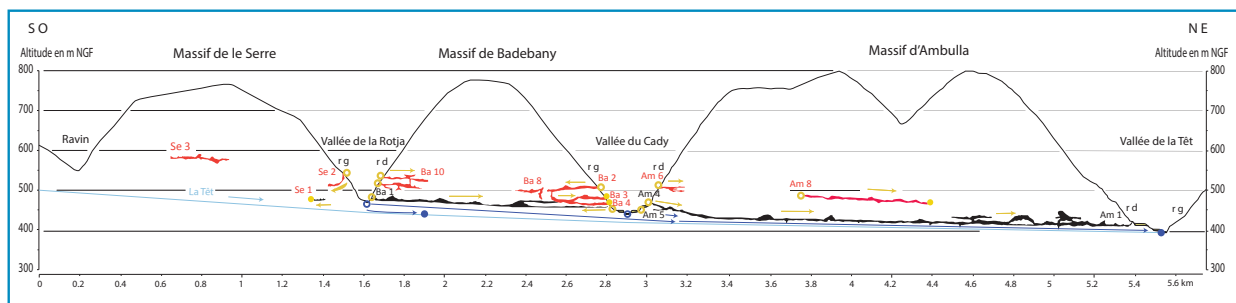
Badebany et le massif d'Ambulla (figure 7). C'est dans les deux derniers que se développent respectivement le réseau de Fuilla-Canalettes et le réseau Lachambre. L'ensemble compte près de 60 km de galeries subhorizontales. La mise en place de ce système karstique binaire est en grande partie le fait de captures successives des cours d'eau de la Rotja et du Cady. L'organisation spatiale des conduits souterrains (figure 10), ainsi que la morphologie des parois de l'endokarst nous informent quant à l'orientation des réseaux ainsi qu'au sens des paléo-circulations.

### 1) Un système étagé et structuré

Les éléments qui composent la structure de ce système karstique sont caractérisés par une zone d'alimentation sur le plateau, des pertes discrètes et localisées dans le lit de la Rotja et du Cady et des émergences au nord du système. Les drains du karst de la rive droite sont considérés comme les galeries actives du système. Ce niveau d'écoulement est saturé, et l'on peut observer la zone noyée (plusieurs dizaines de kilomètres d'extension

compte tenu de ce que l'on connaît des étages supérieurs) uniquement au niveau de certains puits qui constituent des regards sur la nappe. Une hauteur de mise en charge de quelques mètres est observable au niveau de ces puits ou de ces galeries d'accès. Les plongées tentées, aussi bien dans le réseau de Fuilla-Canalettes que dans le réseau Lachambre, n'ont pas permis aux spéléonautes de parcourir ce réseau noyé, du fait de l'exiguïté des conduits et de la turbidité de l'eau. Les paléo-pertes du système, en grande partie inventoriées sur la figure 10, sont distribuées dans la vallée de la Rotja, du Cady et de la Têt. Les paléodraines représentent presque la totalité du développement pénétrable du système karstique de la rive droite. Ces conduits subhorizontaux sont de morphologies et dimensions variables selon le contexte litho-structural et l'importance du paléo-drainage. En général, leurs états de conservation permettent une bonne lecture des morphologies d'érosion, et les dépôts alluviaux y sont relativement bien conservés (photo 12). Les dépôts carbonatés et gravitaires masquent régulièrement les indicateurs

Figure 11: Coupe des trois massifs de la rive droite. Les réseaux souterrains sont calés en altitude, et permettent d'avoir un aperçu de l'étagement des cavités dans ces massifs. Les circulations générales de la zone noyée, ainsi que les paléo-circulations des cavités sont indiquées. *Section of the 3 massifs on the right bank. The underground network are adjusted and allow us to have an outline of the cavity stepping in these massifs. The general flows in the flooded area, as well as the cavity paleocirculation*



morphogéniques. L'étagement des galeries du système, dû à l'évolution du niveau de base karstique, est perceptible sur une amplitude d'environ 100 m. Enfin, les paléo-émergences ne sont pas toutes localisables. Celle de la grotte du Mas Py située dans le massif de la Serre est clairement identifiable. Dans la vallée du Cady en rive gauche, les grottes des Grandes Canalettes et de la Cova Bastera peuvent être considérées comme des paléo-émergences (figure 10). En ce qui concerne le secteur aval du réseau Lachambre, les éboulis de versant, les écroulements de parois ou les aggradations de la vallée de la Têt les ont masquées.

## 2) Les conduits souterrains de la rive droite

La distribution des conduits souterrains révèle une densité plus importante de galeries dans les massifs de Badebany et d'Ambulla. En revanche, dans celui de la Serre, les explorations spéléologiques n'ont à ce jour pas permis de découvrir un réseau important. Un étagement de galeries est perceptible dans les trois massifs (figure 11). Il se développe entre 500 et 600 m d'altitude NGF pour l'étage supérieur. Le niveau inférieur, constitué de la majeure partie des paléo-drains situés entre 410 et 475 m NGF. L'évolution du niveau de base de la Têt ainsi que de ses affluents, dicte cet étagement de galeries. Bien que l'histoire de la mise en place de ces niveaux semble plus complexe à définir, du fait des probables fluctuations altitudinales des cours d'eau engendrées par leurs incisions et leurs aggradations, nous proposons ici la spéléogénèse du niveau supérieur et inférieur de ce système, en fonction des observations géomorphologiques réalisées dans le karst, et de la répartition altitudinale des conduits. Nous pourrions ainsi avoir une idée de l'origine et de la nature des paléo-écoulements. Ce cadre permettra d'identifier les anciennes captures et auto-captures de la Rotja, du Cady et de la Têt.

Les réseaux supérieurs se répartissent dans les trois massifs. Ils correspondent sans doute à différents niveaux de karstification qui ne pourront être différenciés dans cette étude. Néanmoins, chacune des cavités fournit des informations capitales sur leurs paléo-fonctionnements.

Dans la partie aval de la vallée de la Rotja, les deux principales paléo-captures identifiées se situent en rive gauche pour l'aven d'En Bourègues dans le massif de la Serre, et en rive droite au niveau de la grotte du Figuier pour le massif de Badebany. Ces anciennes captures sont relativement proches l'une de l'autre, et n'ont pas forcément fonctionné de manière synchrone. Au niveau inférieur, la grotte de Fuilla (figure 10) représente une



capture postérieure aux autres, associée à l'incision dans les calcaires dévoniens. Les indicateurs morphogéniques observés dans cette dernière cavité indiquent ce type de fonctionnement.

Dans la vallée du Cady en rive gauche, le réseau constitué des Canalettes, des Grandes Canalettes et de la Cova Bastera, constitue une ancienne auto-capture. Néanmoins, en ce qui concerne la Cova Bastera, un doute est légitime car cette paléo-émergence aurait pu être une ancienne source émergeant dans la vallée de la Têt. En rive droite du Cady, la grotte Bergès signale une ancienne capture du Cady dans le massif d'Ambulla. Au niveau inférieur de cette même vallée, en rive gauche, quatre galeries parallèles attestent du phénomène de capture et/ou d'auto-captures. La définition de leurs fonctionnements reste cependant à prouver. En rive droite, la grotte des Puces doit être l'amont de la galerie du Marteau, et la grotte de la Vieille Gare, celui du boulevard du Canigou. Ces deux paléo-drains principaux révèlent les paléo-écoulements majeurs du réseau Lachambre au niveau inférieur (figure 10). Plusieurs hypothèses peuvent être proposées quant à leur fonctionnement :

- 1. La grotte des Puces peut être liée à une auto-capture du Cady, ou plutôt la continuité des Grandes Canalettes en rive gauche, ce qui impliquerait le démantèlement d'un grand réseau par l'incision du Cady.
- 2. La grotte de la Vieille Gare a aussi pu être formée par une perte du Cady, ou la continuité de la Cova Bastera, ou encore une ancienne auto-capture de la Têt ayant creusé le boulevard du Canigou. L'étude pétrographique des sédiments piégés dans cette galerie pourrait permettre d'identifier le paléo-fonctionnement de cette cavité.

**Photo 12:** Le boulevard du Canigou dans le réseau Lachambre, conserve des morphologies d'érosion et des dépôts alluviaux sur l'ensemble de son développement. On distingue très nettement l'encoche de rivière en rive gauche, celle-ci a été en partie comblée par une aggradation postérieure à son creusement. Une phase d'incision a ensuite creusé le bedrock sur environ un mètre de haut, mettant en évidence, les deux régimes distincts de dépôt: un régime plus compétent, capable de transporter des galets, qui constituent la base de ce remplissage alluvial, et un régime d'écoulement lent mettant en place environ 35 cm de matériel plus fin. L'incision post-remplissage n'affecte pas celui déposé dans l'encoche de rivière. Donc les crues de cette phase d'incision étaient limitées. Elles ne pouvaient s'élever au-delà de ce niveau. Les pertes en amont ont forcément calibré le débit. Cliché S. Jaillet.

*The Canigou boulevard, in the La Chambre network keeps erosion morphologies and alluvial deposits on its whole development. We can see the river notch on the left bank very clearly, this one was partly filled up by an aggradation to its digging. Later an incision phase dug the bedrock for about a meter, showing the 2 distinct regimes of deposits: a more competent regime, able to carry pebbles, which are the base of this alluvial filling, and a slow flow regime depositing 35cm of smaller material. The post filling incision doesn't have an affect on the one left in the river notch. So the floods of this incision phase were limited. They could not rise above this level. The downstream losses have inevitably calibrated the flow.*

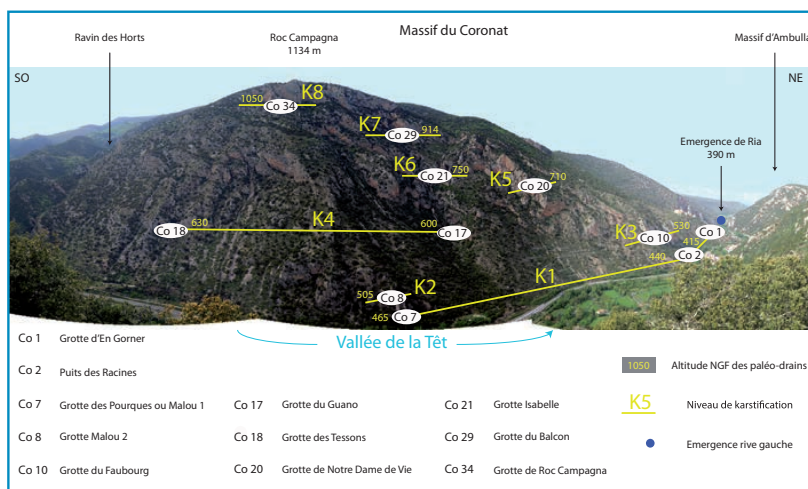


Figure 12: Vue panoramique d'une partie du massif du Coronat depuis le massif de la Serre à environ 750 m NGF. La prise de vue, située 400 mètres sous le niveau du Roc Campagna (1134 m NGF) ne permet pas d'avoir la vision de l'ensemble du massif du Mont Coronat (2172 m NGF). Le neuvième niveau de karstification révélé par la grotte de Roque Fumade (1358 m NGF) n'est donc pas mentionné sur cette illustration. Huit niveaux de karstification sont indiqués, ils correspondent aux étages de cavités présentant des morphologies d'érosion et conservant des dépôts alluviaux allogènes. Ces remplissages de granulométrie variable confirment les différents niveaux de stabilisation relative de la Têt durant l'incision de sa vallée. *Panoramic view of the Coronat massif from the Serre massif (at about 750m NGF). The shot which was taken 400m under the level of the Roc Campagna (1134m NGF) doesn't offer a general view of the Coronat massif. The 9th karstification level given by the Roque Fumade cave (1358m NGF) can't be seen on this illustration. 8 karstification levels are indicated. They correspond to the cavity stages showing erosion morphologies and keeping allogenic alluvial deposits. These varied granulometry fillings confirm the different relative stabilisation levels of the Têt during its valley incision.*

La grotte de l'Ours au niveau supérieur dans le massif de Badebany, présente des indicateurs morphogéniques qui attestent des sens de circulation d'ouest vers l'est, mais il est prématuré de s'avancer sur un ancien fonctionnement qui aurait pu être celui d'une paléo-capture de la Têt, et/ou du Cady.

En rive droite de la Têt dans le massif d'Ambulla, la grotte de Vidatripa (figure 10) qui n'est pas en relation directe avec le réseau Lachambre, représente le niveau de karstification de l'étage supérieur du massif. Cette cavité développe

2.710 m de galeries et se place en altitude absolue entre 468 et 492 m NGF [Borràs & GES-CSC, 2014] ; et en altitude relative par rapport à la Têt, entre 60 et 84 m. Elle est le témoin d'une ancienne auto-capture de la Têt. Les morphologies de parois de la zone d'entrée attestent d'une circulation en régime noyé.

Le fonctionnement hydrogéologique actuel du karst de la rive droite de la Têt a été étudié dans les années 1960 par le Groupe d'Etude et de Recherches Spéléologiques (GERS). Les colorations des pertes et des écoulements ont été



Photo 13: Site de prélèvement dans la grotte du Faubourg au niveau de la galerie des Crinoïdes (F2). *Sampling site in the Faubourg cave at the crinoïdes gallery (F2).*

réalisées avec de la fluorescéine. Les traçages indiquent tous le même point d'émergence en rive droite de la Têt, à environ 480 m NGF, à la base du massif d'Ambulla [Salvyre, 1979]. La vitesse moyenne des circulations enregistrées se situe autour de 30 m/h.

## B. Le karst étagé de la rive gauche: un modèle d'auto-captures successives de la Têt?

Après l'étude de la mise en place du karst de la rive droite, nous proposons une reconstitution morphogénique de l'encaissement de la Têt.

### 1) L'étagement de cavités dans le massif du Coronat: l'implication du « temps long »

Les huit niveaux de karstification représentés sur la figure 12, décrivent l'évolution du karst de la rive gauche en relation avec l'incision de la vallée. Cette mise en place de cavités résulte des rythmes d'abaissement et de stabilisation du niveau de base de la vallée. Il est probable que la Têt se soit perdue à plusieurs reprises et à des niveaux altitudinaux décroissants pour élaborer un tel étagement de cavités et ceci sur plusieurs millions d'années. La plupart des niveaux de karstification, excepté celui du puits des Racines-En Gorner (plus de 17 km de développement), ne présentent aucune cavité d'envergure connue à ce jour. Néanmoins, certains conservent des galeries de dimensions remarquables, comme l'unique galerie de la grotte de Notre-Dame de Vie, et la galerie de la grotte du Guano qui atteint une dizaine de mètres de large. Au contraire les grottes Isabelle et Malou 2 des niveaux respectifs K6 et K2, sont des cavités de petites sections (1 à 2 mètres de large). Ces différences d'envergure de cavités peuvent être en rapport avec les paléo-régimes variables dans le temps. L'endokarst conserve toutefois à chaque niveau de karstification, des matériels alluviaux allogènes.

Le temps long n'est pas « tendre » avec les massifs karstiques, et l'érosion (recul des versants), la néotectonique (interruption subite de galerie), la calcification et les dépôts gravitaires (colmatage de galerie), empêchent souvent d'explorer les suites probables de galeries souterraines. Il est évident qu'une grande partie de l'endokarst de la rive gauche de la Têt a disparu à présent, et qu'il ne reste que quelques tronçons de galeries à explorer.

Mais derrière les colmatages divers, le potentiel de découverte de nouvelles galeries existe. La spéléologie a permis de révéler cet étagement de cavités et permettra probablement d'en savoir plus sur les cavités étagées, en continuant la recherche et la désobstruction dans ce secteur.

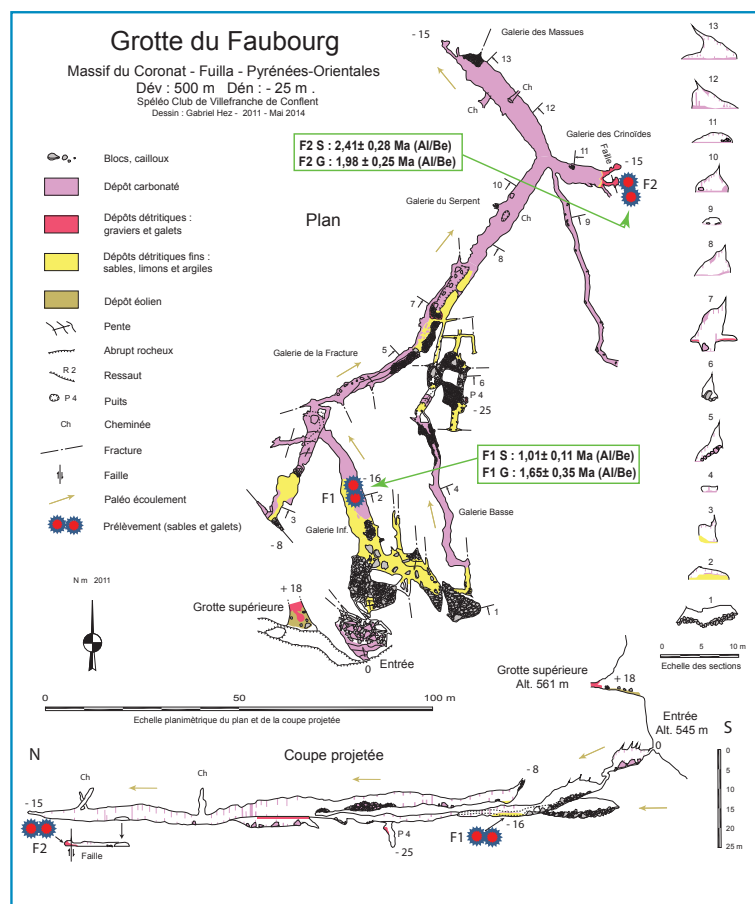
## 2) Enregistrement de l'incision de la vallée de la Têt par le karst étagé du massif du Coronat : résultats des datations par les nucléides cosmogéniques $^{10}\text{Be}$ et $^{26}\text{Al}$

Le travail de datations cosmogéniques des sédiments allogènes prélevés dans deux cavités de l'étagement du massif du Coronat, entre dans le cadre des recherches géomorphologiques actuellement menés, pour quantifier des vitesses d'incision de vallée dans l'orogène est-pyrénéen [Calvet *et al.*, 2013, 2014, 2015]. De même, un travail de datation est en cours (thèse A. Sartégou) sur les vallées de la Têt, de l'Aude et de l'Ariège. L'adaptation récente des méthodes de datation d'objets géomorphologiques de surface par les nucléides cosmogéniques pour déterminer, grâce au ratio  $^{10}\text{Be}$  et  $^{26}\text{Al}$ , l'âge d'enfouissement de certains dépôts endokarstiques détritiques, a permis de lever les incertitudes chronologiques subsistant dans les étages supérieurs des systèmes karstiques [Hobléa *et al.*, 2011]. La limite supérieure de la méthode U/Th (400 ka) est en effet dépassée pour des âges pliocènes et anté-pliocènes. Des datations de sédiments souterrains du méga-réseau de Mammoth Cave dans le Kentucky, ont montré que les galeries qui les conservent étaient antépliocènes [Granger *et al.*, 2001]. Dans le système des Siebenhengste en Suisse, la plus ancienne date obtenue ( $4,4 \pm 0,6$  Ma) propose une phase de karstification pliocène [Häuselmann & Granger, 2005]. Enfin, concernant les étages supérieurs du mont Granier, cette méthode a donné des bons résultats sur deux échantillons attestant d'un âge d'enfouissement pliocène de 4,3 et 3,4 Ma [Hobléa *et al.*, 2011]. Des prélèvements ont été réalisés en 2011 dans la grotte du Faubourg et dans celle de Notre-Dame de Vie, afin d'obtenir les dates d'enfouissement de sédiments allogènes piégés dans le karst.

Dans la grotte du Faubourg, quatre échantillons de sables (S) et de galets (G) ont été prélevés dans deux secteurs de la cavité (figure 13). Le premier site est celui de la galerie inférieure où les prélèvements (F1-S et F1-G) ont donné respectivement 1,01 et 1,65 Ma. Dans le second site, la galerie des Crinoïdes (photo 13), les échantillons (F2-G et F2-S), issus du même point de prélèvement, ont donné respectivement 1,98 et 2,41 Ma. Les marges d'erreur varient entre 0,1 et 0,35 Ma. On trouvera les éléments méthodologiques et les résultats de ces analyses dans (Calvet

*et al.*, 2015). Ces résultats placent le fonctionnement de cette cavité entre le fini Pliocène supérieur et le Pléistocène inférieur. Ces prélèvements se situent à + 97 m du niveau de la Têt (432 m NGF), à 529 m NGF, l'entrée de la cavité se trouvant à +110 m. Dans la grotte de Notre-Dame de Vie, quatre échantillons ont été prélevés au fond de la cavité, dans la même séquence sédimentaire : un lit sableux (NDV-S), un lit de galets (NDV-G), lequel a été rééchantillonné pour confirmer les premières mesures, en isolant les galets (NDV-Gbis) et leur matrice sableuse (NDV-Sbis). Les échantillons ont donné respectivement 5,77 Ma (NDV-S), 4,94 Ma (NDV-G), 4,58 Ma (NDV-Gbis) et 5,35 Ma (NDV-Sbis). Ces résultats, dont les marges d'erreur sont importantes et varient entre 0,59 et 1,67 Ma, placent la karstification de cet étage dans le Pliocène inférieur (Zancléen) ou dans le Miocène supérieur final. L'envolement de la cavité par la séquence fluviatile, galets à la base puis épais limons feuilletés au-dessus, ne peut correspondre qu'à l'événement eustatique transgressif majeur du Zancléen, la cavité ayant nécessairement fonctionné

Figure 13: Topographie de la grotte du Faubourg intégrant des informations géomorphologiques. Cette cavité située en rive gauche, conserve du matériel détritique provenant de la Têt. Les morphologies et les dépôts contenus dans cette grotte attestent d'un paléo-fonctionnement de perte (Hez 2013a). Les remplissages alluviaux endokarstiques se situent entre 530 m et 561 m NGF, soit à des altitudes relatives comprises entre 95 m et 126 m. Ce niveau est en relation altitudinal avec le lambeau de terrasse T5 conservé un peu plus en aval, en contrebas à l'ouest du Fort Libéria à 540 m NGF, en rive gauche. *Topography of the Faubourg cave integrating geomorphologic informations. This cavity, which is located on the left bank, retains detritic material coming from the Têt. The morphology and the deposits found in this cave are the proof of a paleofunctioning of a loss. The alluvial endokarstic fillings are located between 530m and 561m NGF, i.e. at relative altitudes between 95m and 126m. This level has an altitudinal connection with a fragment of terrace T5 kept a little further downstream, below west of Fort Liberia at 540m NGF, on the left bank.*



en régime vadose lors de la régression messinienne, entre 5,8 et 5,35 Ma. Ces prélèvements se situent à + 270 m du niveau de la Têt, à 710 m NGF. Les résultats des datations sont cohérents en fonction des altitudes de prélèvements. Ils confirment le processus d'encaissement du cours d'eau depuis le Pliocène en apportant les premières informations permettant d'estimer la vitesse d'incision

de la vallée de la Têt à environ 0,525 cm par siècle [Calvet et al., 2015].

Les datations des matériaux présents dans ces deux étages du karst de Villefranche, malgré leur intérêt scientifique, ne sont pas suffisantes pour une reconstitution chronologique de la mise en place des niveaux de cavités et de l'incision de la vallée depuis le Miocène. Il est nécessaire de recueillir et

d'échantillonner des sédiments à tous les niveaux de cet étage afin de mieux appréhender l'histoire géologique qui s'esquisse ici.

Des échantillons ont récemment été prélevés dans les grottes de Roque Fumade à 1 358 m NGF, du Roc Campagna à 1 040 m NGF, du Nid à 914 m NGF, du Balcon à 907 m NGF et du Guano à 600 m NGF, pour réaliser des datations (travaux en cours, thèse d'A. Sartégou). Néanmoins, la méthode de datation par les nucléides cosmogéniques  $^{26}\text{Al}$  et  $^{10}\text{Be}$  connaît des limites. Au-delà de 6 Ma, il faudra employer un autre couple de nucléides cosmogéniques,  $^{10}\text{Be}$  et  $^{21}\text{Ne}$ , pour les sédiments piégés dans les cavités au-dessus de l'étage de Notre-Dame de Vie [Sartégou et al., 2016]. L'apport de ces nouvelles informations sous forme d'archives naturelles contenues dans le karst de Villefranche, permettra de compléter les connaissances (i) sur la vitesse et le rythme de l'encaissement de cette vallée sur une période plus étendue et plus détaillée, (ii) sur les épisodes de stabilité relative du niveau de base mis en relation avec les phases de karstification, (iii) sur l'effet de la crise de salinité messinienne concernant le creusement de la vallée de la Têt, (iv) sur l'impact des variations climatiques du Plio-Quaternaire.

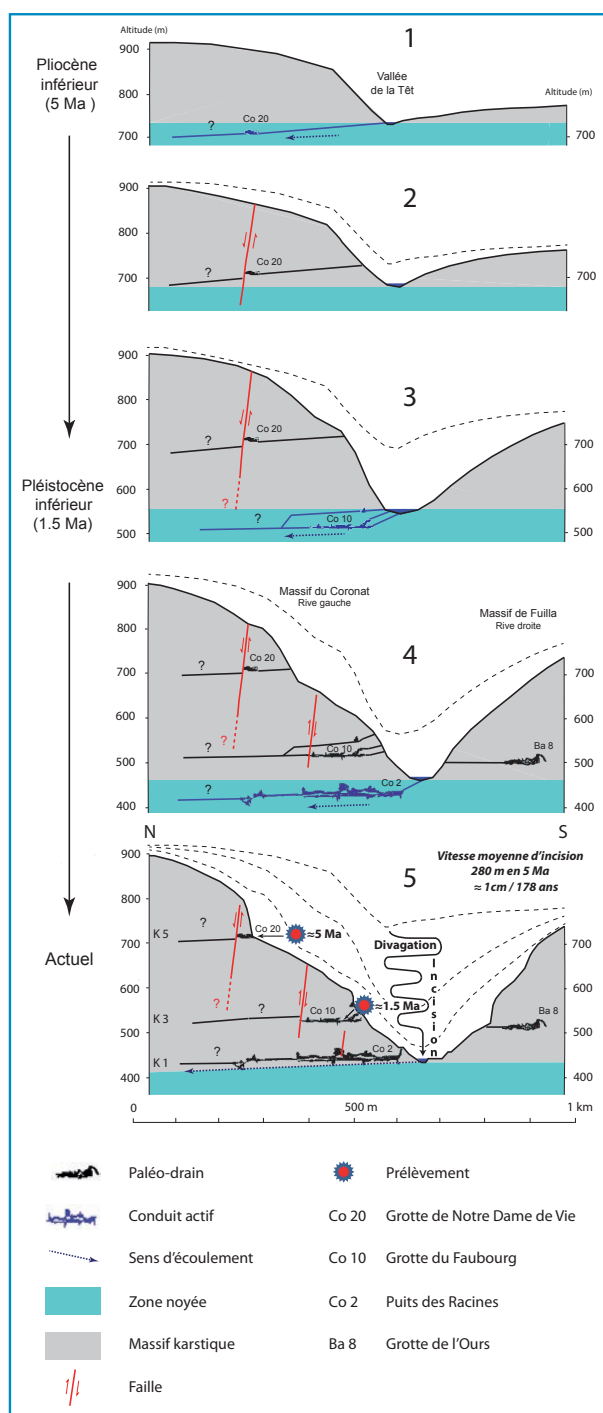
### C. Reconstitution morphogénique de l'encaissement de la Têt depuis le Pliocène

La reconstitution morphogénique de l'incision de la vallée de la Têt proposée ici s'organise en cinq étapes (figure 14). Ce scénario géomorphologique décrit l'abaissement progressif du niveau de base de la Têt du Pliocène inférieur (5 Ma) à l'Actuel. Les trois cavités de l'étagement du massif du Coronat marquent des niveaux de base relativement stables durant cette incision.

**Phase 1 :** Il y a environ 5 millions d'années, le cours de la Têt traversait et incisait déjà l'unité dévonienne du synclinal de Villefranche. Une partie de la Têt se perdait en rive gauche et s'écoulait vers le nord dans le massif du Coronat. La grotte de Notre-Dame de Vie matérialise aujourd'hui un court tronçon de ce drainage souterrain du Pliocène inférieur et conserve des dépôts alluviaux ainsi que des morphologies de paléo-circulations. Cette cavité représente le niveau K5.

**Phase 2 :** La vallée de la Têt poursuit son incision, abandonnant la ou les pertes pour s'infiltrer à différents niveaux

Figure 14 : Illustration en cinq phases de l'incision de la vallée de la Têt depuis le Pliocène. On note la mise en place des réseaux souterrains, ainsi que les épisodes tectoniques responsable de la fermeture de certaines cavités. Illustration in five phases of the Têt valley incision since Pliocene. Notice the setting of underground networks, as well as tectonic episodes responsible for the obstruction of certain cavities.



altitudinaux du versant (deux niveaux repérés: grotte de la Chapelle à 688 m NGF et grotte du Guano à 608 m NGF). Un épisode tectonique post-karstification ferme par décalage le paléo-drain.

**Phase 3 :** Au Pléistocène inférieur, des pertes s'organisent en rive gauche et convergent pour former un conduit actif fonctionnant en régime syngénétique, puis paragénétique, déposant une grande quantité de matériel détritique dans les conduits souterrains. La grotte du Faubourg témoigne de cette activité hydrogéologique passée. Cette cavité représente le niveau K3. La phase inclut manifestement plusieurs épisodes de longue durée, suggérés par la dispersion des âges dans les deux galeries de la cavité principale, mais aussi l'entrée supérieure colmatée par des galets, à 561 m NGF.

**Phase 4 :** La vallée de la Têt s'encaisse pour atteindre un niveau proche de l'actuel. Des pertes de la rivière creusent et alimentent un nouveau système karstique: l'amont du réseau d'En Gorner. Ses conduits qui se développent vers le sud-ouest, indiquent une zone de pertes plus en amont dans la vallée. Un nouvel épisode tectonique décale les galeries du fond de la grotte du Faubourg et marque le paysage souterrain des amonts de la grotte d'En Gorner.

**Phase 5 :** Actuellement la Têt coule à 430 m NGF au niveau du faubourg de Villefranche. L'amont de la grotte d'En Gorner, par le puits artificiel des Racines, possède des regards sur l'écoulement souterrain qui se dirige vers le nord et atteint une altitude proche de celle de la Têt. Aucune perte du fleuve n'a été mise en évidence à ce jour.

## Conclusion

Les études menées dans le cadre de ce travail ont permis de mettre en évidence les principales caractéristiques du karst de Villefranche, mais aussi d'apporter de nouvelles connaissances sur son environnement proche: la vallée de la Têt dans le secteur des gorges de Villefranche.

Le niveau de karstification situé entre 400 et 450 m NGF, révèle une concentration exceptionnelle de grands réseaux souterrains. En effet, trois grandes cavités (En Gorner, Lachambre et Fuilla-Canalettes), développant plusieurs dizaines de kilomètres de galeries à des niveaux altitudinaux proches, attestent d'une organisation complexe de l'endokarst, en rives gauche et droite de la Têt.

L'étude préliminaire des fonctionnements et de la mise en place de ces réseaux permet d'établir les faits suivants:

- Le karst de Villefranche est un karst binaire, comprenant un bassin d'alimentation non carbonaté (granites, gneiss et schistes), une alimentation diffuse directement dans les calcaires et de pertes diffuses dans les ravins du versant sud du massif du Coronat pour le karst de la rive gauche.

- Le réseau du puits des Racines-En Gorner renseigne sur une auto-capture de la Têt en rive gauche. À partir d'une lecture fine des indicateurs endokarstiques (morphologique et sédimentaire), il a été possible de mieux saisir les relations entre les terrasses T1 et T2 et les drains, notamment dans les phases d'aggradation ou d'incision

- La cartographie des terrasses alluviales de la Têt livre des informations importantes concernant leur distribution altimétrique, leur continuité, leurs discontinuités et l'absence de certaines nappes alluviales dans les gorges de Villefranche. T1 est très présente et se localise entre + 2 et + 10 m au-dessus de la Têt. T2 est peu visible. On l'observe en amont des gorges au niveau de la confluence Têt-Rotja, et au niveau du Puits des Racines (terrasse révélée à la suite des travaux de forage pour la réalisation d'un captage d'eau potable). On la situe entre + 25 et + 30 m. T3 est absente, mais pourrait correspondre au niveau de karstification de la grotte Malou 2 (K2), entre + 40 et + 45 m. T4 est aussi absente, mais pourrait être située à + 80 m au niveau de la Grotte de l'Ours à 500 m NGF dans le massif de Badebany en rive droite de la Têt. Enfin, la nappe alluviale T5, ou plutôt un lambeau de nappe est présent à + 110 m; elle correspond au niveau de karstification de la Grotte du Faubourg. Au-dessus, aucune nappe n'a été observée, alors que plusieurs étages de cavités conservent du matériel alluvial entre 600 et 1 358 m NGF.

- Les datations cosmogéniques réalisées sur des sédiments allogènes dans deux niveaux de karstification, permettent de placer le niveau + 290 m (K5) à 5 Ma (grotte de Notre-Dame de Vie) et celui de la grotte du Faubourg, à + 110 m (K3), entre 2,4 et 1,2 Ma. Par extrapolation, les cavités situées au-dessus pourraient être d'âge Miocène supérieur voire moyen. Le taux d'incision de la vallée est d'environ 55 m/Ma.

- Le niveau des paléo-drains des grands systèmes souterrains est en relation altimétrique avec les nappes alluviales T1 et T2. Ils se situent sous T2 et sous T1.

- L'étude des relations spatio-temporelles entre l'endokarst de l'amont du réseau d'En Gorner dans le secteur du Puits des Racines, informe des variations du niveau de base de la Têt enregistrées dans la cavité. La paragéne reconnue sous terre marquerait l'aggradation de la Têt (T1). L'incision des conduits et les nombreux phénomènes de soutirage confirmerait l'incision de la nappe T1, ainsi que la descente du niveau de base karstique.

L'étagement du karst de Villefranche révélé par la présence de nombreuses cavités subhorizontales réparties sur l'ensemble des quatre massifs calcaires, s'étage sur près de 1 000 m de dénivellation avec neuf niveaux de karstification identifiés dans le massif du Coronat. Une succession d'auto-captures de la Têt, commandées en altitude par la descente et la stabilisation relative des niveaux de base de la Têt, pourrait expliquer en partie l'étagement de cavités de la rive gauche. Ces étages, en fonction des connaissances spéléologiques actuelles, ne sont pas connectés entre eux par des conduits verticaux. En revanche, dans les massifs plus modestes de la rive droite, deux niveaux seulement sont enregistrés. La grotte du Figueur dans le massif de Badebany présente deux conduits étagés connectés par un puits. Certains autres conduits verticaux relient des galeries supérieures et inférieures du réseau de Fuilla-Canalettes. Pour le karst de la rive droite, l'étude de la mise en place de l'endokarst permet d'attribuer aux deux niveaux de karstification des fonctionnements de captures ou d'auto-captures de la Rotja, du Cady et de la Têt. Les 87 cavités du karst de Villefranche recensées actuellement [Hez, 2015] fournissent un grand nombre de témoignages d'une karstification importante et complexe, répartie sur un temps long. La conservation des galeries, des morphologies d'érosion et des remplissages représente de très nombreux indices pour les recherches géomorphologiques futures. L'inventaire préliminaire des cavités est une base spéléologique non négligeable qui permet de considérer l'ampleur des phénomènes endokarstiques de ce secteur.

L'étude des grands réseaux souterrains, comme ceux de la Pierre Saint

Martin dans les Pyrénées [Maire, 1990], de la Dent de Crolles dans les Préalpes [Audra, 1994], du plateau des Coulmes dans le Vercors [Delannoy, 1997], du Mont Granier en Savoie [Hobléa & al., 2011], du Rupt du Puits dans le Barrois [Jaillet, 2005], des Siebenhengste dans les Alpes suisses [Häuselmann, 2002], ou encore de Mammoth Cave dans le Kentucky aux USA [Palmer, 2004] ou du réseau de Saint Marcel d'Ardèche [Mocochain, 2007] est particulièrement riche d'enseignements. Ces grandes cavités, fournissent des informations capitales

non seulement sur leurs mises en place, leurs paléo-fonctionnements, leurs évolutions à différentes échelles temporelles, mais aussi sur la dynamique des vallées proches avec qui elles entretiennent des relations et par là sur toute l'évolution géomorphologique régionale. Le karst de Villefranche devient ainsi un point clé pour la reconstitution de la morphogénèse des Pyrénées orientales. Ses grands réseaux situés au niveau inférieur sont un modèle exceptionnel pour l'interprétation de l'ensemble de l'étagement. Leur analyse n'en est encore qu'aux prémices

et ils permettent d'envisager, du fait de l'excellente conservation des galeries et des remplissages, une étude encore plus approfondie de ce karst exceptionnel.

### Remerciements

Nous tenons à remercier Didier Rochotte (DREAL) et Jean-Louis Perez (CSC) pour les facilités lors des visites du réseau Lachambre. Philippe Audra et Benoît Losson ont apporté une relecture précise et constructive qui a permis une nette amélioration du manuscrit.

## Bibliographie

- AUDRA P., 1994** - *Karsts alpins. Genèse de grands réseaux souterrains. Exemples: le Tennengebirge (Autriche), l'île de Crémieu, la Chartreuse et le Vercors (France)*. Karstologia Mémoires n° 5. Th. doctorat de géographie, Université Joseph Fourier de Grenoble, 279 p.
- AUDRA P. and PALMER A.N., 2013** - The vertical dimension of karst: Controls of vertical cave patterns. *Geomorphology* vol. 6, p. 186-206.
- BORRAS J. Y GES-CSC, 2008** - *El Conflent Subterrani: Cova de Fullà-Canaletes*. Institut Català de Recerques en Ciències Socials (I.C.R.E.C.S.), Universitat de Perpinyà. Biblioteca de Catalunya Nord X Terra Nostra, 219 p.
- BORRAS J. et GES-CSC, 2014** - *Le Conflent souterrain: Grotte Lachambre*. Institut Català de Recerques en Ciències Socials (I.C.R.E.C.S.), Universitat de Perpinyà. Biblioteca de Catalunya Nord X Terra Nostra, 299 p.
- CALVET M., 1996** - *Morphogénèse d'une montagne méditerranéenne, les Pyrénées-Orientales*, Document du BRGM 255, Orléans, 3 t., pochette de cartes hors texte, 1177 p
- CALVET M. and GUNNELL Y., 2008** - Planar landforms as markers of denudation chronology: an inversion of East Pyrenean tectonics based on landscape and sedimentary basin analysis. In: Gallagher K., Jones S.J., Wainwright J. (eds), *Landscape Evolution: Denudation, Climate and Tectonics Over Different Time and Space Scales*, Geological Society, London, Special Publications, 296, 147-166.
- CALVET M., GUNNELL Y., HEZ G., BRAUCHER R., GUILLOU V., BOURLÈS D., DELMAS M. and SORRIAUX P., 2013** - Capturing the timing and rates of valley incision through cave dating in the Eastern Pyrenees: geodynamic implications. Poster for the 8<sup>th</sup> IAG Paris 2013.
- CALVET M., GUNNELL Y., BRAUCHER R., BOURLÈS D., BLARD P.H., SORRIAUX P., HEZ G., DELMAS M., BOURDET A. et SARTÉGOU A., 2014** - *Datations par les nucléides cosmogéniques de l'abandon de réseaux karstiques et rythmes de l'incision des vallées dans les Pyrénées: implications géodynamiques*. Poster présenté à la 24<sup>ème</sup> réunion des sciences de la terre. Pau, octobre 2014.
- CALVET M., GUNNELL Y., BRAUCHER R., HEZ G., BOURLÈS D., GUILLOU V., DELMAS M. and ASTER TEAM, 2015** - Cave levels as proxies for measuring post-orogenic uplift: Evidence from cosmogenic dating of alluvium-filled caves in the French Pyrenees. *Geomorphology* 246, p. 617-633.
- CAMUS H., 1997** - Formation des réseaux karstiques et creusement des vallées: l'exemple du Larzac méridional, Hérault, France. *Karstologia* n° 29, p.23-42.
- CAMUS H., 2003** - *Vallées et réseaux karstiques de la bordure carbonatée sud-Cévenole: Relations avec la surrection, le volcanisme et les paléoclimats*. Th. doctorat en Géographie. Univ. M. de Montaigne, Bordeaux 3, 716 p.
- CLAUZON, C., 1982** - Le canyon messinien du Rhône: une preuve décisive du "desiccated deep-basin model", *Bull. Soc. Géol.*, France, 7, 24, n° 3, p. 597-610.
- CLAUZON G., AGUILAR J.P. et MICHAUX J., 1987** - Le bassin pliocène du Roussillon (Pyrénées-Orientales, France): exemple d'évolution géodynamique d'une ria méditerranéenne consécutive à la crise de salinité messinienne. *Comptes-rendus de l'Académie des Sciences*, Paris, série II, 304, 585-590.
- DELANNOY J.-J., 2007** - *Recherches géomorphologiques sur les massifs karstiques du Vercors et de la transversale de Ronda (Andalousie): Les apports morphogéniques du karst*. Th. doctorat d'État, Univ. Joseph-Fourier, Grenoble 1, Institut de Géographie Alpine, 706 p.
- EAU ET DÉVELOPPEMENT, 1989** - *Recherches sur le système hydrogéologique du Puits des Racines*. Rapport d'étude pour la commune de Villefranche de Conflent, 22 p.
- GRANGER D., FABEL E.D. AND PALMER A.N., 2001** - Pliocene-Pleistocene incision of the Green River, Kentucky, determined from radioactive decay of cosmogenic <sup>26</sup>Al and <sup>10</sup>Be in Mammoth Cave sediments. *Geological Society of America Bulletin*, July, 2001, v. 113, no. 7, p. 825-836.
- GUITARD G., LAUMONIER A., AUTRAN A., BANDET Y. et BERGER G. M., 1998** - *Notice explicative de la carte géologique de Prades 1095 à 1/50 000*. BRGM - Service Géologique National, Ministère de l'Économie, des Finances et de l'Industrie. Editions du BRGM, 198 p.
- HAUSELMANN P., 2002** - *Cave Genesis and its Relationship to Surface Processes: Investigations in the Siebenhengste Region (BE, Switzerland)*. PhD thesis, Siebenhengste-Hohgant, nummer 6, 168 p.
- HAUSELMANN P. AND GRANGER D., 2005** - Dating of caves by cosmogenic nuclides: Method, possibilities, and the Siebenhengste example. *Acta carstologica*, Ljubljana 2005, pp. 44 à 50.
- HEZ G., 2006** - *Rapport topographique du Puits des Racines*. Spéléo Club de Villefranche de Conflent, 13 p.
- HEZ G., 2012** - *Approche géomorphologique: Observations et cartographie de la grotte du Faubourg dans les Pyrénées-Orientales*. Master 1 de géographie. Univ. Savoie, EDYTEM, 68 p + carte géomorphologique hors texte.
- HEZ G., 2013A** - La grotte du Faubourg dans les Pyrénées-Orientales. *Spelunca* n° 129, pp. 9 à 18.
- HEZ G., 2013B** - L'ÉTAGEMENT DES CAVITÉS DANS LE MASSIF DU CORONAT, KARST DE VILLEFRANCHE DE CONFLENT, PYRÉNÉES-ORIENTALES. *Actes de la 23<sup>ème</sup> Rencontre d'Octobre*. Le Châtelard, p. 67-74.
- HEZ G., 2015** - *Un remarquable enregistreur de l'incision de la vallée de la Têt: Le karst étagé des gorges de Villefranche de Conflent*. Pyrénées-Orientales, France. Master 2 de recherche en géographie. Univ. Savoie EDYTEM, 109 p.
- HOBLÉA F., 1992** - Un exemple d'interruption subite de grande galerie: La galerie Roger Thonet (Balme à Collomb, Mont Granier, Chartreuse, France). *Actes de la 2<sup>ème</sup> Rencontre d'Octobre*, Chambéry 1992, p. 41-49.
- HOBLÉA F., HAUSELMANN P. and KUBIK P., 2011** - Cosmogenic nuclide dating of cave deposits of Mount Granier (Hauts de Chartreuse Nature Reserve, France): morphogenic and palaeogeographical implications. *Geomorphologie: relief, processus et environnement* n° 4, p. 395-406.
- JAILLET S., PONS-BRANCHU E., BRULHET J. and HAMELIN B., 2004** - Karstification as geomorphological evidence of river incision: the karst of Cousance and the Marne valley (eastern Paris Basin). *Terra Nova*, vol. 16, 4, p. 167-172.
- JAILLET S., 2005** - *Le Barrois et son karst couvert*. Structure, Fonctionnement, Évolution. *Karstologia Mémoires* n° 12, 352 p.
- KRANČJ A., 1989** - Recent Fluvial Cave Sediments, Their Origin and Role in Speleogenesis, SAZU, Ljubljana, ZRC, 167 p.
- LOSSON B., 2004** - *Karstification et capture de la Moselle (Lorraine, France): Vers une identification des interactions*. Mosella tome 29, n° 1-2, 491 p.
- MAIRE R., 1990** - *La Haute-Montagne calcaire. Karsts, cavités, remplissages, Quaternaire, paléoclimats*. Thèse d'état, Karstologia mémoires n° 3, 730 p.
- MANGIN A., 1982** - L'approche systématique, conséquences conceptuelles et méthodologiques. *Actas de la réunion monográfica sobre el Karst, Larra*, p. 141-157.
- MOCOCHAIN, L., 2007** - *Les manifestations géodynamiques - externes et internes - de la crise de salinité messinienne sur une plate-forme carbonatée péri-méditerranéenne: le karst de la Basse-Ardèche (Moyenne vallée du Rhône; France)*. Th. de Doctorat, Univ. Aix-Marseille-CEREGE, 192 p.
- NEHME C., 2013** - *Apport de l'endokarst dans la reconstitution des paléogéographies et des environnements passés du Mont Liban: Applications aux vallées de Nahr Antelias et de Nahr El-Kalb*. Th. de doctorat, Univ Saint-Joseph de Beyrouth-Univ. Savoie, 439 p. + cartes hors texte.
- PALMER A. N., 1987** - Cave levels and their interpretation. *The NSS Bulletin*, December 1987, p. 50-66.
- PALMER A. N., 2000** - Hydrogeologic control of cave patterns. Speleogenesis, evolution of karst aquifers. *The NSS Bulletin*, January 2000, p. 77-90.
- PALMER A. N., 2004** - Mammoth Cave region, United States. *Encyclopedia of caves and karst science*, John Gunn ed., 2004, p. 495-499.
- PALMER A. N., 2007** - *Cave Geology*. Dayton, USA, 3<sup>ème</sup> édition 2012, 454 p.
- QUINIF Y., 1989** - La notion d'étages de grottes dans le karst belge. *Karstologia* n° 13, p. 41-49.
- RENAULT P., 1970** - *La formation des cavernes*, Que sais-je ? n° 1400, 127 p.
- SALVAYRE H., 1979** - *Spéléologie et hydrogéologie des massifs calcaires des Pyrénées-Orientales*. Conflent, Prades, 249 p.
- SALVAYRE H., 1981** - *Compte-rendu des observations hydrogéologiques réalisées après les plongées effectuées en 1979 dans le siphon de la grotte d'En Gornier*. GEK, Perpignan, 6 p.
- SALVAYRE H., 1989** - Les karsts des Pyrénées-Orientales, caractères hydrogéologiques et spéléologiques généraux. *Karstologia* n° 13, p. 1-10.
- SARTEGOU A., BLARD P.H., BRAUCHER R., BOURLÈS D.L., CALVET M., ZIMMERMANN L., TIBARI B., HEZ G., GUNNELL Y., AUMAÏTRE G. and KEDDAKOUCHE K., 2016** - Morphogenetic evolution of the Têt river valley (eastern Pyrenees) using <sup>10</sup>Be/<sup>21</sup>Ne cosmogenic burial dating. *Geophysical Research Abstracts* Vol. 18, EGU2016-8385, 2016, EGU General Assembly 2016.