



HAL
open science

Burial ages, ghost-rocks and karst network structure. Insights from the Vis canyon (Southern France)

Oswald Malcles, Philippe Vernant, Jean Chery, Jean-François Ritz, Gaël Cazes, David Fink

► **To cite this version:**

Oswald Malcles, Philippe Vernant, Jean Chery, Jean-François Ritz, Gaël Cazes, et al.. Burial ages, ghost-rocks and karst network structure. Insights from the Vis canyon (Southern France). *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 2020, 26 (4), pp.255-264. 10.4000/geomorphologie.15043 . hal-03393347

HAL Id: hal-03393347

<https://hal.science/hal-03393347v1>

Submitted on 21 Oct 2021

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.



Géomorphologie : relief, processus, environnement

vol. 26 - n° 4 | 2020

numéro spécial "géomorphologie et environnements karstiques"

Âges d'enfouissement, fantômes de roches et structuration karstique, cas de la vallée de la Vis (Sud de la France)

Burial ages, ghost-rocks and karst network structure. Insights from the Vis canyon (Southern France)

Oswald Malcles, Philippe Vernant, Jean Chéry, Jean-François Ritz, Gaël Cazes et David Fink



Édition électronique

URL : <https://journals.openedition.org/geomorphologie/15043>

DOI : 10.4000/geomorphologie.15043

ISSN : 1957-777X

Éditeur

Groupe français de géomorphologie

Édition imprimée

Date de publication : 15 décembre 2020

Pagination : 255-264

ISBN : 978-2-913282-89-6

ISSN : 1266-5304

Ce document vous est offert par Centre national de la recherche scientifique (CNRS)



Référence électronique

Oswald Malcles, Philippe Vernant, Jean Chéry, Jean-François Ritz, Gaël Cazes et David Fink, « Âges d'enfouissement, fantômes de roches et structuration karstique, cas de la vallée de la Vis (Sud de la France) », *Géomorphologie : relief, processus, environnement* [En ligne], vol. 26 - n° 4 | 2020, mis en ligne le 02 décembre 2020, consulté le 21 octobre 2021. URL : <http://journals.openedition.org/geomorphologie/15043> ; DOI : <https://doi.org/10.4000/geomorphologie.15043>



Âges d'enfouissement, fantômes de roches et structuration karstique, cas de la vallée de la Vis (Sud de la France)

Burial ages, ghost-rocks and karst network structure. Insights from the Vis canyon (Southern France)

Oswald Malcles ^{a*}, Philippe Vernant ^a, Jean Chéry ^a, Jean-François Ritz ^a, Gaël Cazes ^b, David Fink ^c

^aGéosciences Montpellier - UMR 5243 CNRS, Université de Montpellier, Campus Triolet cc 060, Place Eugène Bataillon, 34095 Montpellier Cedex05, France

^bSchool of Earth, Atmospheric and Life Sciences, University Of Wollongong, Northfields Ave Wollongong, NSW 2522, Australie

^cANSTO-Sydney, New Illawarra Road, Lucas Heights, NSW 2234, Australie

RÉSUMÉ

De nouveaux âges d'enfouissement par mesure des rapports isotopiques $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$ au sein de trois cavités proches du canyon de la Vis (sud de la France, limite sud-est des Grands-Causse) remettent en question le modèle de karstogenèse classiquement utilisé pour expliquer la structuration des réseaux. En effet, les niveaux subhorizontaux de galeries souterraines sont généralement utilisés comme marqueurs de la position du niveau de base régional (*i.e.*, rivière). Si la relation âge d'enfouissement et hauteur relative au niveau de base régional attendue en utilisant le modèle classique *per descensum* pour les grottes des Scorpions ($1,2 \pm 0,4$ Ma, +105 m relative au niveau de base -r.n.b.-) et de Bergougnous ($1,2 \pm 0,3$ Ma, +117 m r.n.b.) est en accord avec la quantification du taux moyen d'incision régional (83 ± 35 m/Ma), elle ne permet pas d'expliquer l'âge de $0,94 \pm 0,07$ Ma obtenu pour les remplissages des niveaux horizontaux du Rocas situés bien plus haut en altitude (+317 m r.n.b.). Les deux premières cavités s'ouvrent directement dans les gorges, alors que la troisième s'ouvre sur le plateau à moins de 4 km des gorges. C'est à notre connaissance la première fois que des données quantitatives étayent la proposition que le modèle de karstogenèse régional contrôlé par la position du niveau de base n'est pas universel. Ces datations permettent de proposer que la fantômisaiton joue un rôle primordial en contrôlant la localisation des niveaux sub-horizontaux. Ce processus interne au karst relègue le rôle de la position du niveau de base régional à celui d'un simple déclenchement externe de l'évidement des produits d'altération générés par la fantômisaiton.

Mots-clés : Larzac, karstification, âges d'enfouissement $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$, fantômisaiton, réseaux karstiques.

ABSTRACT

*New burial ages of cave deposits, based on the $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$ cosmogenic isotope ratio technique, from three caves in the Vis Valley, located in the south-east perimeter of the "Grands-Causse" in southern France are challenging the validity of classic karstic evolution models to explain the structure and evolution of the karstic network in the region. Generally speaking, the formation of horizontal galleries at different elevations above the canyon floor is commonly used as time-markers of former regional base level positions. The burial ages obtained for the Bergougnous cave (1.2 ± 0.3 Ma, +117 m above base level -a.b.l.-) and the Scorpions cave (1.2 ± 0.4 Ma, +105 m a.b.l.) are in agreement with the regional river-incision rate (83 ± 35 m.Ma⁻¹) and conform to a classical *per descensum* evolution of the karst network. However, the emplacement of alluvium deposits within the Rocas cave at 0.94 ± 0.07 Ma is not consistent with a regular *per descensum* model. The Rocas cave is 317 m a.b.l. but its entrance is located on the plateau about 4 kilometres from the Vis canyon crest whereas, in contrast, the two caves listed above open directly onto the wall of the Vis canyon. To our knowledge, this is the first presentation of quantitative data which supports the observation that karstic horizontal levels are not always directly controlled by the regional base level position. We support our findings with absolute ages, which for the first time, demonstrates the primary importance of the ghost-rock process on the location of horizontal levels. Base level location is then a secondary parameter, mainly involved in a triggering event for ghost-rock erosion.*

Keywords: Larzac, karstification, Terrestrial Cosmogenic Nuclide, ghost rock, cave system.

INFORMATION SUR L'ARTICLE

Reçu le 11 mai 2020

Reçu sous sa forme révisée le 11 août 2020

Définitivement accepté le 4 novembre 2020

*Auteur correspondant. Tél : +33 04 67 14 46 90 ;

Courriels : oswald.malcles@umontpellier.fr (O. Malcles)

philippe.vernant@umontpellier.fr (P. Vernant)

jean.chery@umontpellier.fr (J. Chéry)

jean-francois.ritz@gm.univ-montp2.fr (J.-F. Ritz)

gael.cazes@gmail.com (G. Cazes)

fink@ansto.gov.au (D. Fink)

1. Introduction

La quantification du creusement des vallées est un élément principal de la compréhension de la formation des paysages. Outre la connaissance directe sur la morphogenèse et sa dynamique, cette approche permet d'apporter d'autres éléments de compréhension

tectonique et géodynamique ou encore climatique. Dans ce cadre-là, les systèmes karstiques présentent, à contrario des systèmes fluviaux, une capacité unique de préservation des informations sur une grande échelle de temps (Martin, 2000 ; Bruxelles, 2001 ; Calvet et Lemartinel, 2003 ; Audra et al., 2007 ; Ford and Williams, 2007 ; White, 2007 ; Vanara et al., 2009 ; Husson, 2014). C'est par exemple

le cas du piégeage de sédiments allochtones au sein de cavités dont on peut retrouver l'âge d'abandon au sein du karst grâce à différentes techniques (Granger et al., 1997 ; Tassy et al., 2013 ; Malcles et al., 2020). La datation de ces remplissages endokarstiques est rendue possible par l'emploi, par exemple, des isotopes cosmogéniques, qui permettent d'obtenir un âge absolu de piégeage au sein du karst. L'approche la plus courante pour obtenir cet âge d'enfouissement est obtenue par la mesure du rapport entre le ^{26}Al et le ^{10}Be au sein de galets de quartz. Ce couple d'isotopes permet une datation de l'enfouissement allant de *ca.* 200 000 ans à *ca.* 6 000 000 ans (Stock et al., 2005 ; Granger et al., 2013 ; Lebatard et Boulès, 2015). Généralement, dans toutes les études régionales, les âges obtenus sont interprétés à la lumière du modèle de karstogenèse classique dans lequel la formation des réseaux horizontaux, les dépôts au sein de ces réseaux et la position relative de la rivière (*i.e.*, le niveau de base régional) sont directement liés et peuvent être considérés au premier ordre comme étant à des altitudes quasi-identiques (Granger et al., 1995 ; Moccochain, 2007 ; Calvet et al., 2015 ; Harmand et al., 2017). La variation d'altitude de ces marqueurs au cours du temps peut-être un abaissement (*per descensum*) ou une remontée (*per ascensum*) du niveau de base, mais il s'agit bien dans les deux cas de la position de la rivière qui contrôle la dynamique régionale, la localisation des marqueurs géomorphologiques en surfaces et la structuration des réseaux souterrains (*e.g.*, niveaux subhorizontaux).

Nous proposons dans cette étude une application de la datation par couple $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$ dans la vallée de la Vis (Hérault, France), abritant le célèbre cirque de Navacelles. L'application du modèle de karstogenèse classique permet grâce à deux cavités directement connectées au canyon actuel de quantifier le taux d'incision de la Vis. Ce modèle échoue cependant à expliquer l'âge des remplissages d'une section sub-horizontale d'un troisième réseau pourtant en lien hydrologique direct avec cette vallée.

Ce résultat inattendu nous amène à réévaluer la pertinence du modèle de karstogenèse classique, invoquant la position et la stabilité temporelle du niveau de base comme contrôle de la formation des niveaux horizontaux des réseaux karstiques. Nous proposons que dans notre région d'étude, la pré-structuration à grande échelle des réseaux karstiques soit principalement générée par des phénomènes de fantômisations, et que la formation du karst par évidement des produits d'altération du primokarst soit contrôlée par l'interaction entre le niveau de base régional avec un processus de déblaiement d'un karst pré-structuré par l'altération.

2. Le modèle de karstogenèse classique

Le modèle classiquement utilisé pour interpréter les liens entre remplissages endokarstiques, creusement des vallées et formation des cavités est celui de la formation *per descensum* avec contrôle direct des niveaux karstiques sub-horizontaux par le niveau de base régional (Martel, 1894 ; Granger et al., 1997 ; Harmand et al., 2017). Dans cette conception de la morphogenèse, le facteur principal est la position du niveau de base. Lors de l'abaissement de ce dernier, le réseau hydrologique va s'inciser entraînant le creusement des vallées. Au sein du karst, ces périodes de creusement seraient également visibles par le développement des drains verticaux. Les galeries horizontales quant à elles sont expliquées par la présence de périodes de stabilité relative du niveau de base (taux d'incision

temporairement faibles) ayant pour conséquence la création de niveaux de surfaces d'abrasion et de dépôts de terrasse en surface (Audra et al., 2001 ; Harmand et al., 2017). Il y aurait donc un lien direct entre morphologies de surface et étagement des réseaux karstiques ainsi qu'une chronologie relative aisément accessible : les niveaux les plus hauts étant les plus anciens (fig. 1), les terrasses en surface et les réseaux karstiques horizontaux de même altitude ayant le même âge.

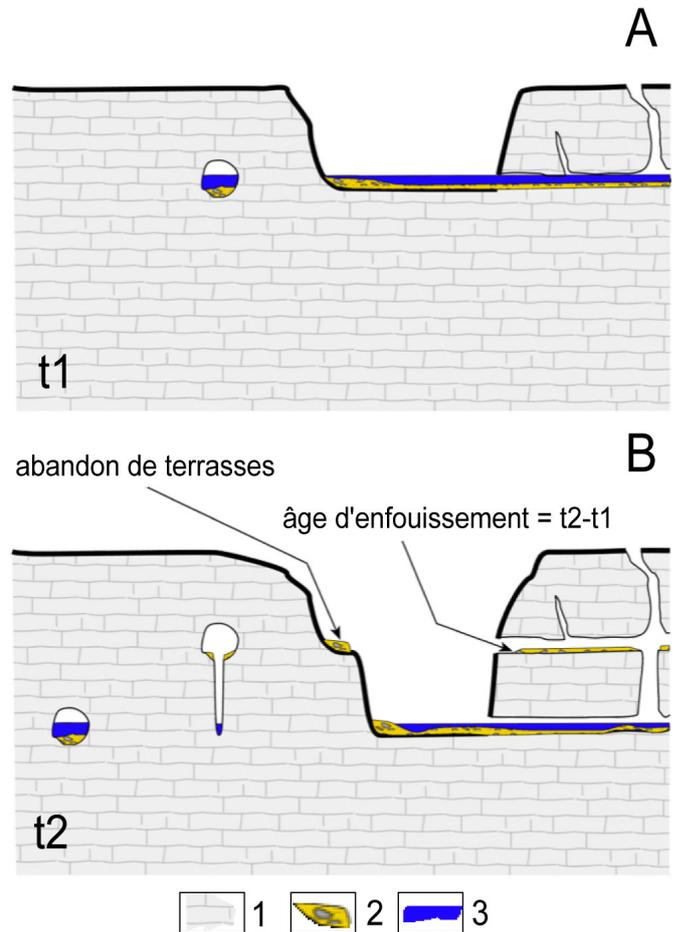


Fig. 1 - Modèle classiquement utilisé pour expliquer la formation/étagement des réseaux karstiques et les relations entre les âges des remplissages endokarstiques et les dépôts de surface tels que les terrasses alluviales.

A : Mise en place de galets alluviaux à une période t1. B : Enfouissement et abandon des dépôts alluviaux à une période t2 dus à l'incision fluviale. 1. Massif calcaire et réseaux karstiques encaissés ; 2. Dépôts alluviaux allochtones ; 3. Circulation hydrologique active.

Fig. 1 - Classic model used to explain the karstic network formation/ layering and the link between karstic infilling and surface deposits (e.g., alluvial terraces).

A: Fluvial deposits accumulated during period t1. The B: Tiered horizontal cave system at period t2 due to the river incision. 1. Bedrock (limestone) and karstic network; 2. Allochthonous alluvial deposits; 3. Active hydrological flow.

Un modèle modifié, appelé *per ascensum* propose quant à lui une dynamique de fonctionnement par aggradation des vallées. Dans ce cas, il est attendu des dépôts d'âges plus récent au niveau des galeries supérieures qu'inférieures (Moccochain et al., 2007 ; Tassy et al., 2013). Mais dans ce modèle encore, il s'agit bien de la localisation dans le temps du niveau de base qui contrôle la

formation et l'évolution de l'endokarst. Si certains raffinements ou complexités peuvent-être apportés à ce modèle selon les considérations locales (lithologie, climat, etc.), toutes ces dynamiques reposent sur un point clé : l'évolution temporelle de la position du niveau de base des vallées contrôle la formation des réseaux karstiques établissant un lien direct entre morphologies de surfaces (e.g., terrasses alluviales) et souterraines (e.g., galeries, puits). Les régions à forte karstification sont expliquées comme ayant enregistré de nombreuses phases (jusqu'à plus de 10 phases de karstification pour les grottes de Jenolan en Australie) (Armstrong et Osborne, 2014). Harmand et al. (2017) ont proposé une synthèse de ces modèles contrôlés par l'évolution du niveau de base.

3. Contexte et mesure des âges d'enfouissement

3.1. La vallée de la Vis

La vallée de la Vis est située dans le sud de la France au sein de la région des Grands-Causse. Le canyon de la Vis (fig. 2) s'incise dans des formations tabulaires d'âge secondaire, principalement jurassique. Le canyon de la Vis sépare le Causse du Larzac au Sud et à l'Ouest du Causse de Blandas au nord-est par une incision de l'ordre de 300 m recoupant des morphologies héritées, telle par exemple que le poljé de Saint-Maurice (fig. 3).

L'évolution locale et régionale a donné lieu à de nombreuses études contradictoires depuis plus d'un siècle (Martel, 1894 ;

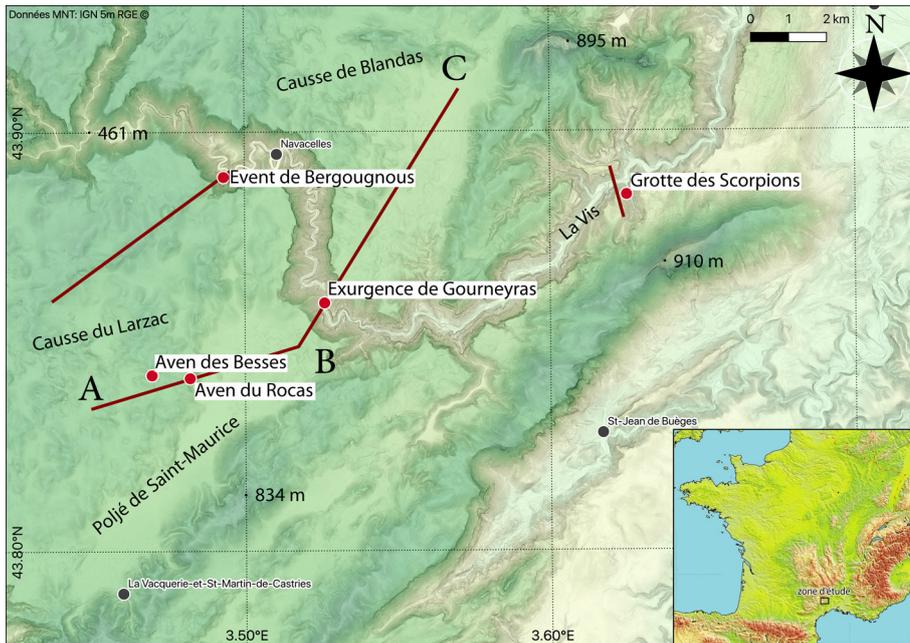


Fig. 2 - Carte de localisation de la zone d'étude situant les cavités et les profils analysés dans le texte.

Fig. 2 - Location map of the study area situating the cave and the profiles analysed in the text.

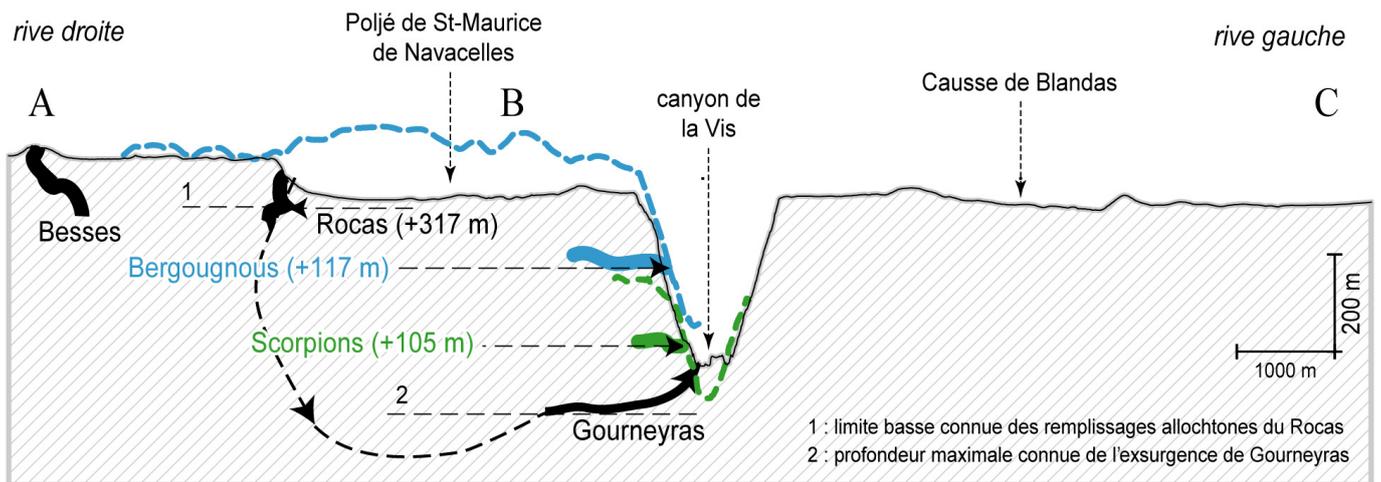


Fig. 3 - Coupe le long du profil topographique A-B-C.

Le profil principal (A-B-C) passe par les avens des Besses et du Rocas et l'exurgence de Gourneyras (voir Figure 2). Les profils topographiques en amont et en aval sont en pointillés bleus pour l'évent de Bergougnous et en vert pour la grotte des Scorpions. Les hauteurs sont données par rapport au niveau de base local (fond de la vallée sur chaque coupe relative à la cavité). La géométrie des réseaux karstiques est schématisée, une figuration réaliste n'étant pas possible au vu de l'échelle de la coupe.

Fig. 3 - Section along the topographic profile A-B-C.

The main profile A-B-C encompass the Besses, the Rocas and the Bergougnous cave systems (see Figure 2). Upstream and downstream profiles are in dashed line (blue for the Bergougnous cave and green for the Scorpions cave). Heights are provided relatively to the local base level (the river bed, according to each profile). Due to the scale of the profiles, the geometry of the karstic network is simplified

Corbel, 1954 ; Ambert, 1982, 1984 ; Camus, 1997, 2003 ; Bruxelles, 2001 ; Séranne et al., 2002 ; Husson, 2014), ayant comme point d'achoppement principal la contrainte temporelle, principalement par manque de datations absolues. Récemment, Malcles et al. (2020) ont estimé un taux d'incision régional de 83 ± 35 m/Ma, à partir d'une analyse combinant des mesures de paléomagnétisme et d'âges d'enfouissement ($^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$) sur deux bassins versants voisins de celui de la Vis (Rieutord et Buèges). Ce taux suggère un creusement des gorges de la Vis s'effectuant principalement au cours des 4 derniers millions d'années. Dans notre étude, les remplissages de trois cavités liées à la dynamique hydrologique de la Vis ont été datés ($^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$), ce qui permet de tester la robustesse de la détermination du taux d'incision régional proposé précédemment. En utilisant le modèle classique de karstogenèse *per descensum*, il est facile à partir du taux d'incision régional de déduire l'époque à laquelle ces cavités se trouvaient au niveau de la rivière. Leurs altitudes relatives au niveau de base défini par le lit actuel de rivière de la Vis, combinées au taux d'incision régional de 83 ± 35 m/Ma (Malcles et al., 2020) donnent des âges théoriques de mise en place des remplissages de $1,3 \pm 0,6$; $1,4 \pm 0,6$ et $3,8 \pm 1,6$ Ma pour les cavités du Scorpion, de Bergougous et du Rocas, respectivement.

La grotte du scorpion (fig. 3) dont les relevés topographiques sont disponibles sur la base de données karst3D (KARST3D, 2019), s'ouvre dans une vallée périphérique de la Vis à ca. 100 m au-dessus du lit local de la Vis définissant le niveau de base (noté ci-après r.n.b. pour relatif au niveau de base). Cette cavité présente un niveau sub-horizontale avec une morphologie en arc de cercle évoquant une ancienne boucle karstique de la Vis. Cette hypothèse est renforcée par la présence de remplissages allochtones présentant un cortège pétrographique typiquement cévenol (*i.e.*, principalement composé de quartz et de schistes) avec des galets atteignant parfois plusieurs centimètres de longueur (fig. 4A). Plus en amont, l'évent de Bergougous (fig. 3) dont les relevés topographiques sont aussi disponibles sur la base de données karst3D (KARST3D, 2019), s'ouvre à + 110 m r.n.b. et correspond à un drain horizontal sub-linéaire. Les remplissages prélevés présentent une pétrographie à composante plus quartzreuse (fig. 4B) et sont scellés par un plancher stalagmitique. Cette observation laisse supposer une faible remobilisation des sédiments sur le site de prélèvement malgré la présence d'une légère circulation d'eau au sein de la galerie. La troisième cavité étudiée est celle du Rocas s'ouvre à 595 m d'altitude (+317 m r.n.b.) (fig. 3). Cette cavité se développe principalement de manière verticale à l'exception des premiers ca. 30 m où un niveau sub-horizontale est identifiable, avec en son sein la présence de remplissages quartzeux. Contrairement aux deux remplissages précédents, les sédiments prélevés au Rocas sont presque exclusivement des éléments de quartz très roulés, de taille sub-centimétrique de couleur blanc à jaune, légèrement rubéfiés. Ils sont la plupart du temps retrouvés en placages indurés sur les parois (fig. 4C). Ils sont définis comme étant des albarons (Bruxelles et Camus, 2010), issus de l'altération intense des reliefs cristallins en amont à une époque où les vallées n'étaient pas creusées. Leur présence ayant été signalée jusqu'à une hauteur d'environ 740 m NGF par Gèze et al. (1985), des auteurs soupçonnent la présence d'une importante couverture sédimentaire à la surface des causses au paléogène (Bruxelles, 2001) voir néogène depuis démantelée en partie par le soutirage karstique. Les remplissages sélectionnés dans

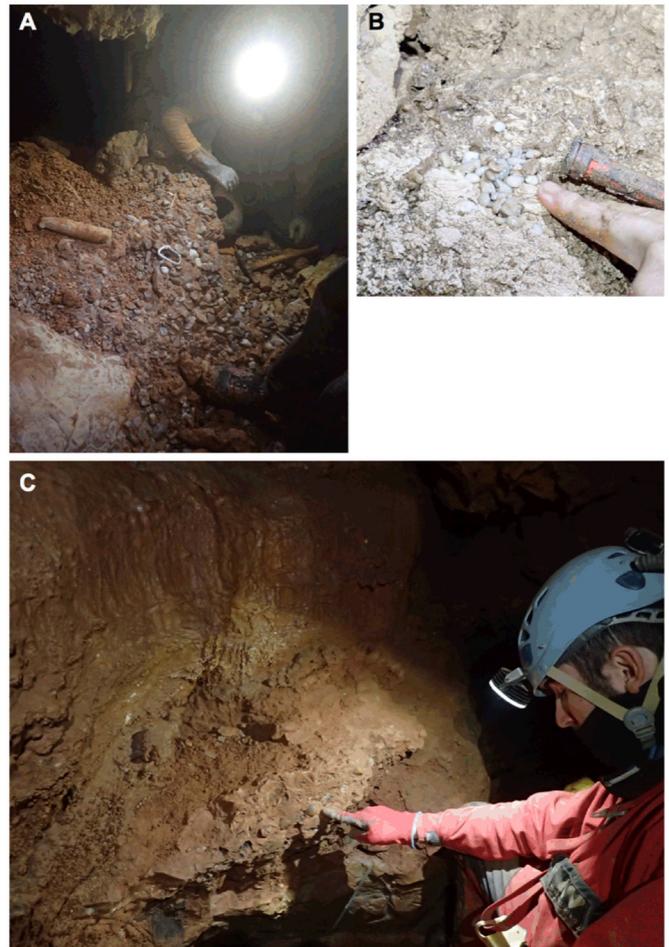


Fig. 4 - Exemple de sédiments riches en quartz prélevés dans la cavité des Scorpions (A), de Bergougous (B) et du Rocas (C) pour déterminer des âges d'enfouissement.

Fig. 4 - Quartz pebbles selected in the Scorpions (A), Bergougous (B) and Rocas (C) cavities to determine burial ages.

ces trois cavités sont localisés dans des galeries horizontales situées à plus de 30 m sous la surface, afin d'éviter une possible production secondaire d'isotopes cosmogéniques ^{26}Al et de ^{10}Be notamment du fait de la composante muonique.

3.2. Datation isotopes cosmogéniques

La détermination d'âges d'enfouissement par mesure des concentrations des isotopes ^{26}Al et ^{10}Be au sein de galets quartzeux est aujourd'hui régulièrement réalisée et la méthodologie est largement validée (Granger and Muzikar, 2001 ; Dunai, 2010 ; Lebatard et Bourlès, 2015). Une fois prélevés dans la cavité, les échantillons sont mécaniquement et chimiquement purifiés en laboratoire afin d'obtenir du quartz pur (*e.g.*, séparation magnétique, attaques acides, etc). Le quartz pur, est entièrement dissous dans une solution d'acide fluorhydrique (HF) concentré à laquelle on ajoute un entraîneur (^9Be de concentration connue). L'échantillon est ensuite passé par plusieurs phases de précipitation par pH sélectif et une succession de colonnes échangeuses d'ions pour se débarrasser de tous les éléments autres que le ^{10}Be et le ^{26}Al . Une fois le ^{26}Al et le ^{10}Be obtenus, ils sont oxydés à 800°C durant 12 heures et ensuite mélangés à un oxyde métallique avant une

mesure à l'AMS (*Accelerator Mass Spectrometry*). La préparation chimique a été réalisée à ANSTO (*Australian Nuclear Science and Technology Organisation*) (Child et al., 2000) et les mesures effectuées sur SIRIUS (également à l'ANSTO) (Wilcken et al., 2017 ; Wilcken et al., 2019). Pour les trois cavités, les remplissages présentaient des éléments quartzeux de taille centimétrique, la préparation d'amalgames de plus de 50 éléments a été réalisée. La cavité des Scorpions présentait aussi des galets d'un diamètre pluri-

centimétrique. Ils ont été prélevés et mesurés individuellement pour obtenir un âge d'enfouissement par isochrone (Balco and Rovey, 2008 ; Dunai, 2010).

Suite à des problèmes lors des préparations chimiques, la détermination de l'âge d'enfouissement par amalgame pour la grotte des Scorpions ainsi que celle d'un âge individuel de galet ont échoué. De ce fait, l'âge proposé pour les Scorpions est une moyenne des quatre âges individuels obtenus car l'utilisation de la

Tableau 1 : Résultats analytiques et paramètres utiles pour l'obtention des âges d'enfouissement.

Table 1: Analytical results and used parameters to compute the burial ages.

Code	Lat (°)	Lon (°)	Alt (m)	ΔH (m)	^{10}Be (atm.g ⁻¹)	$\sigma^{10}\text{Be}$ (atm.g ⁻¹)	^{26}Al (atm.g ⁻¹)	$\sigma^{26}\text{Al}$ (atm.g ⁻¹)	Ratio $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$ et incertitude	Age (Ma)	Inc. Age (Ma)
BER	43,889	3,493	426	117	2,043e ⁻⁵	1,84e ⁻⁴	7,57e ⁻⁵	8,5e ⁻⁴	3,7 (0,2)	1,2	0,3
ROC	43,841	3,482	552	317	4,203e ⁻⁵	8,83e ⁻³	1,66e ⁻⁶	4,06e ⁻⁴	4 (0,2)	0,9	0,07
SCO1	43,885	3,625	275	105	6,12e ⁻⁴	2,69e ⁻³	2,59e ⁻⁵	1,32e ⁻⁴	4,2 (0,2)	1,15	0,18
SCO2	43,885	3,625	275	105	1,0e ⁻⁵	4,49e ⁻³	4,24e ⁻⁵	2,11e ⁻⁴	4,2 (0,2)	1,1	0,18
SCO3	43,885	3,625	275	105	8,498e ⁻⁴	3,82e ⁻³	3,27e ⁻⁵	1,71e ⁻⁴	3,9 (0,2)	1,3	0,18
SCO4	43,885	3,625	275	105	6,492e ⁻⁴	3,01e ⁻³	2,44e ⁻⁵	1,39e ⁻⁴	3,8 (0,2)	1,4	0,2

Code cavité : BER = évent de Bergougnous ; ROC = Aven-grotte du Rocas et SCO = grotte des Scorpions. Les quatre premières valeurs sont les coordonnées géographiques (degrés décimaux), l'altitude (NGF en m) et la hauteur relative à la Vis (au point le plus proche, en m). Les concentrations (atomes.g⁻¹ de quartz) en ^{10}Be et ^{26}Al sont issues des mesures de l'AMS des rapports $^{10}\text{Be}/^{27}\text{Al}$ et $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$, corrigés du bruit de fond (blancs issus des préparations chimiques) et normalisés respectivement aux standards KN-5-4 et KN-4-2. L'incertitude sur la concentration est basée sur l'incertitude analytique (comptage) sur le détecteur de l'AMS, 1 % d'incertitude sur la concentration de l'entraîneur ^9Be (4 % sur la concentration ^{27}Al) et d'une erreur de 3 % de la reproductibilité, à partir de mesures régulières des standards. L'âge d'enfouissement (minimum) suppose l'absence de production secondaire et l'incertitude associée est issue d'une propagation des incertitudes en quadrature (racine carrée de la somme des carrés). Les taux de productions en ^{10}Be utilisés sont de 5,03 ; 0,14 et 0,027 atm.g.an⁻¹ pour les composantes neutroniques, muoniques rapides et lentes. Le rapport du taux de production entre ^{26}Al et ^{10}Be est de 6,75 et les productions muoniques rapide et lentes sont respectivement de 0,72 ; 0,18 atm.g.an⁻¹. Taux obtenus par mise à l'échelle selon Stone (2000) des taux de production $^{10}\text{Be}_{\text{SLHL}}$ de 4,49, 0,12 et 0,027 pour les composantes neutronique et muoniques (rapide et lentes) respectivement.

Cavity code are: BER for the Bergougnous cave; ROC for the Rocas cave and SCO for the Scorpions cave. The first four values are the geographic coordinates (decimal degree), elevation (NGF in m) and the elevation relative to the nearest Vis river bed (in m). Concentration from the AMS (atoms. g⁻¹ of quartz) for ^{10}Be and ^{26}Al are corrected from the background (full chem blanks) and normalised relative to KN-5-4 and KN-4-2 respectively. Concentration errors are based on the analytical (count) error from AMS detector, 1% error for the ^9Be carrier (4% for the ^{27}Al) and of a 3% error for measurement reproductibility. The burial age (minimum) suppose the absence of secondary production. Relative uncertainties are propagated in quadrature (Square root of the squared sum). Used production rate for ^{10}Be are 5.03, 0.14 and 0.027 atm. g. an⁻¹ for neutronic and muonic (fast and slow) contributions respectively. Production ratio between ^{26}Al and ^{10}Be are set at 6.75. Scaling factor according to Stone, 2000 with $^{10}\text{Be}_{\text{SLHL}}$ of 4.49, 0.12 and 0.027 for the neutronic, fast and slow muonic contribution respectively.

méthode par isochrone est mal contrainte avec seulement quatre points. L'âge moyen obtenu est de $1,2 \pm 0,4$ Ma. Les résultats obtenus sont présentés dans le Tableau 1 et la Figure 4. Les âges d'enfouissement pour les remplissages de la grotte des Scorpions, de l'évent Bergougnous et de l'aven-grotte du Rocas sont respectivement de $1,2 \pm 0,4$ Ma, $1,2 \pm 0,3$ Ma, et de $0,9 \pm 0,07$ Ma.

4. Implications sur les relations entre karstogenèse et incision des vallées

4.1. Cavités ouvertes sur la vallée de la Vis, taux et modèles d'incision

Les âges obtenus à l'évent de Bergougnous ($1,2 \pm 0,23$ Ma ; + 117 ± 10 m r.n.b.) et à la grotte des Scorpions ($1,2 \pm 0,4$ Ma, + 105 ± 10 m r.n.b.) (fig. 4) permettent de calculer des taux d'incision cohérents entre eux (*i.e.*, 94 ± 28 m/Ma, et 85 ± 27 m/Ma, pour l'évent de Bergougnous et la grotte du Scorpion respectivement). Si la moyenne de ces deux taux (90 ± 39 m/Ma) est légèrement supérieure à celui proposé (83 ± 35 m/Ma) comme valeur régionale moyenne par Malcles et al., (2020), les deux restent cependant en accord avec ce dernier aux incertitudes près.

4.2. Taux d'incision dérivés du modèle classique anormalement élevé pour l'aven-grotte du Rocas

En supposant un taux d'incision constant dans le temps, l'application du taux d'incision déduit précédemment pour la vallée de la Vis de 90 ± 39 m/Ma permet de prédire un âge théorique de mise en place des sédiments au sein de l'aven du Rocas. La différence d'altitude entre les prélèvements du Rocas et la vallée de la Vis est de 317 m. Cependant la cavité est éloignée de la vallée de 3,9 km, si l'on utilise le gradient de pente du profil longitudinal de la Vis (6,4 ‰) comme proxy pour estimer l'altitude du niveau de base sous la cavité, la différence d'altitude doit être corrigée de 25 m et devient alors 291 m, soit un âge de $3,5 \pm 1,5$ Ma. Or, l'âge obtenu pour les remplissages du Rocas est de $0,94 \pm 0,07$ Ma (fig. 4), ce qui est en contradiction avec le modèle classique évoqué précédemment. Les sédiments du Rocas, positionnés à plus de 150 m en contre-haut de ceux de Bergougnous ou des Scorpions révèlent un âge similaire (fig. 4). Pourtant sous la zone de prélèvement du Rocas, un enchainement de puits et de courts méandres permet de descendre 100 m plus bas. Les parois de la cavité sont vierges de toute trace d'alluvions contrairement à la partie supérieure où l'on en observe régulièrement en placages indurés. Il est donc probable que cette partie inférieure n'existait pas lors de la mise en place des

dépôts. D'autre part, le traçage à la fluorescéine d'un écoulement intermittent au fond de l'aven du Rocas est ressorti 4 jours plus tard au niveau d'une exsurgence située à quelques mètres du cours de la Vis, la cavité est donc bien hydrologiquement connectée avec le niveau de base régional. La datation des alluvions collectées dans la cavité du Rocas remet donc en cause le modèle classique d'évolution des réseaux de la région.

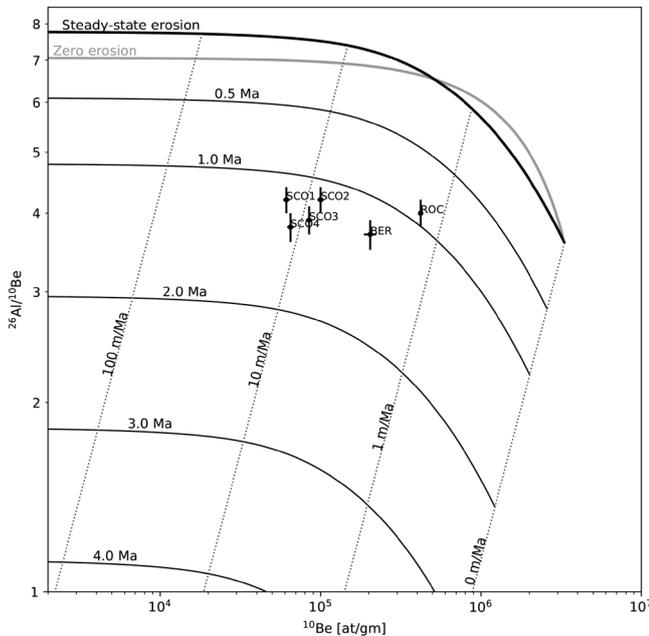


Figure 5 : Diagramme de rapports de concentration ^{10}Be et rapport isotopique $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$ couramment appelé « banana-plot ».

Les courbes en noir représentent l'évolution d'un sédiment issu d'une surface en érosion continue pour divers âges d'enfouissements (0 à 4 Ma). Les trait en pointillés représentent le trajet suivi en fonction du temps pour divers taux d'érosion initial. Sont représentés les échantillons du Rocas (ROC), de Bergougous (BER) et des Scorpions (SCO) avec leurs incertitudes respectives (croix noires).

Figure 5: Scatter plot of ^{10}Be and isotope ratio $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$ commonly called « banana-plot ».

The curves in black represent the evolution of a sediment from a surface in continuous erosion for various burial ages (0 to 4 Ma). The dotted lines represent the path followed as a function of time for different initial erosion rates. The samples of Rocas (ROC), Bergougous (BER) and scorpion (SCO) are shown with associated uncertainties (Crosses).

5. Karstification par fantômisation

5.1. Processus de pré-structuration par fantômisation

Parmi les modèles proposés dans la synthèse de Harmand et al. (2017), deux ne considèrent pas un contrôle direct du niveau de base dans la dynamique des karsts. Le premier étant les karsts hypogènes, présentant des morphologies, des cristallisations, etc., particulières, et ne pouvant *a priori* pas être applicable dans la majorité des cas. Le second est celui incluant une dissolution et une altération *in situ* appelées fantômisation des roches. Ce rôle de la fantômisation a initialement été vu comme rare ou anecdotique, présent uniquement sur des échelles spatiales peu étendues, tel qu'un front de taille d'une carrière (Quinif, 2018). Une application à plus grande échelle spatiale commence à être proposée (Quinif et

Bruxelles, 2011 ; Barriquand et al., 2014 ; Dandurand et al., 2019). Nous nous positionnons dans ce cadre d'un rôle plus régional de la fantômisation dans la formation des karsts et nous proposons également une remise en perspective de l'aspect temporel de ce rôle sur l'évolution des réseaux karstiques à l'échelle d'un massif. Nous rappelons tout d'abord brièvement ce qu'est le phénomène de fantômisation avant de présenter son application à grande échelle spatiale et temporelle.

La karstification par fantômisation repose sur trois phases « successives ». Premièrement, durant un temps long (proposé comme allant de 10^5 à 10^7 ans), il y a circulation extrêmement lente de fluide dissolvant la roche en régime noyé ou saturé. Ce très faible débit, va permettre l'export des éléments les plus facilement solubles. Cette phase nécessite, outre la présence d'un très faible transfert de fluide, la présence d'une perméabilité et d'une porosité suffisante. Cette porosité semble facilement obtenue par des structures syn-sédimentaires (e.g., porosité primaire dans certaines couches) ou des processus postérieurs au dépôt (porosités secondaires, déformation tectonique, etc.). Ces zones de « faiblesses » vont localiser la circulation des fluides, entraînant la formation du primokarst (Rodet, 2014). Ce primokarst, est une pré-structuration des réseaux qui restent cependant remplis des éléments insolubles et où la lithologie est toujours visible dans l'altérite toujours en place. Ce réseau potentiel reste en dormance tant qu'il n'est pas recoupé par une incision permettant alors un flux suffisamment important pour transporter l'altérite, et vider le primokarst pour le transformer en karst. Ce peut être le cas lors du creusement d'une vallée périphérique, où il peut y avoir intersection de la surface libre et d'un réseau fantôme. Si tel est le cas, l'altérite va alors rapidement être compactée (suppression de la pression hydrostatique au sein de l'altérite), érodée et exportée par la soudaine augmentation de la charge hydraulique et le passage d'une dynamique de transfert de fluides lente en domaine saturé à une dynamique hydraulique en domaine vadose (Quinif, 2010 ; Dubois et al., 2011 ; Dubois et al., 2014). Cette pré structuration peut être verticale avec des racines d'altération (Dubois et al., 2014 ; Rodet, 2014) rejoignant un niveau plus ou moins horizontal d'altération. Si ce modèle semble indiscutable dans certains cas d'études bien précis, à l'échelle de l'affleurement (front de taille d'une carrière, etc, Dupont et al., 2018 Quinif, 2018 ; Dubois et Quinif, 2019), suspecté dans d'autres cas (Quinif et Bruxelles, 2011 ; Barriquand et al., 2014) et invoqué pour les karsts profonds de type Vauclusien (Dandurand et al, 2019), il manque de contraintes d'âges absolus illustrant l'impact de cette pré-structuration sur la dynamique du creusement des réseaux karstiques.

5.2. Structuration régionale du karst par fantômisation

Dans le but d'expliquer la mise en place sub-synchrone de sédiments dans des réseaux séparés verticalement de plusieurs centaines de mètres en bordure de la vallée de la Vis, nous invoquons une pré-structuration initiale du réseau (tant les drainages verticaux que les galeries horizontales) suivie de sa troncation et de son évidement par l'incision des vallées.

Il y a environ 1 Ma, les cavités des Scorpions et de Bergougous sont à l'altitude du lit de la Vis et fonctionnent en perte ou en boucle. Les sédiments cévenols y sont alors piégés (fig. 6). Proviennent-ils de

réseaux fantômés et évidés lors de leur recoupement par la vallée de la Vis ? Il est difficile de répondre à cette question. Toutefois, à cette époque mais 200 m plus haut, l'écoulement de surface dans le poljé de St Maurice de Navacelles est a priori toujours possible. Une partie des stocks sédimentaires du poljé peuvent être remobilisés et injectés dans la partie supérieure du Rocas. A cette époque, le réseau supérieur du Rocas a été recoupé permettant l'évacuation des altérites et le remplissage par des sédiments allochtones. Dans les parties plus profondes le transfert restait lent et continuait de former les racines d'altération rejoignant un niveau de fantômisation plus profond (fig. 6). L'altérite des réseaux supérieurs s'évacuant, un potentiel de suffosion (*i.e.*, l'entraînement hydraulique de matériaux fins pouvant générer des cavités ou conduits souterrains) suffisant pour soutirer les albarons à la surface des causses est créé, et induit la mise en place des remplissages supérieurs du Rocas. Ultérieurement, lorsque la Vis recoupe un nouveau réseau fantômé à une altitude inférieure -cette fois-ci relié à la partie inférieure du Rocas- cette partie inférieure est évidée une fois que la vague d'évidement régressif l'atteint. Les entrées du réseau de l'aven du Rocas se trouvant maintenant sur une colline en surface du Causse, le réseau n'absorbe plus de sédiments et aucune trace de remobilisation endokarstique n'est visible. Il est intéressant de noter que les méandres de la partie inférieure du Rocas présentent

des structures décrites par Dubois et al. (2014) comme marqueurs spécifiques des processus de fantômisation (*e.g.*, formes pariétales).

Le Rocas est hydrologiquement relié (traçage à la fluorescéine) à la vallée de la Vis en passant par l'exsurgence de Gourneyras dont la formation peut sembler à première vue énigmatique puisque le point bas atteint par les plongeurs se situe à -105 m r.n.b.. La géométrie du réseau joignant le fond de l'aven du Rocas ou celui de l'aven des Besses à l'exsurgence de Gourneyras reste inconnue. Néanmoins, la formation du conduit de Gourneyras peut s'expliquer de manière satisfaisante dans le cas d'une pré-structuration par fantômisation. En effet, le lien Gourneyras-Rocas/Besses étant avéré, il existe une charge hydraulique d'au moins 300 m. L'évidement de Gourneyras jusqu'à -100 m peut être expliqué par un fonctionnement en siphon, et ce, uniquement lorsqu'il y a connexion entre la vallée et la zone d'alimentation des avens du Rocas et des Besses. L'autre explication pour la profondeur de l'exsurgence de Gourneyras fait appel à une chute majeure du niveau de base, donc vraisemblablement l'épisode Messinien. Cependant, compte tenu de nos résultats, le Rocas n'était pas connecté à un réseau inférieur au Messinien puisque cet épisode se termine il y a un peu plus de 5 Ma, et qu'à cette époque la partie inférieure de l'aven n'était pas évidée. La formation du réseau connecté à l'exsurgence de Gourneyras serait donc liée à un processus de déblaiement d'une altérite anciennement créée, à l'instar de ce qui est proposé par exemple pour l'émergence de la Touvre près d'Angoulême (Dandurand et al., 2019) il y a 1 Ma au maximum. A l'appui de cette interprétation, on trouve plusieurs exsurgences dans la région des Grands-Causse non reliées au versant méditerranéen, dont les niveaux les plus bas connus sont situées largement sous le niveau de base actuel (par exemple le Durzon) qui pourraient résulter aussi de ces processus.

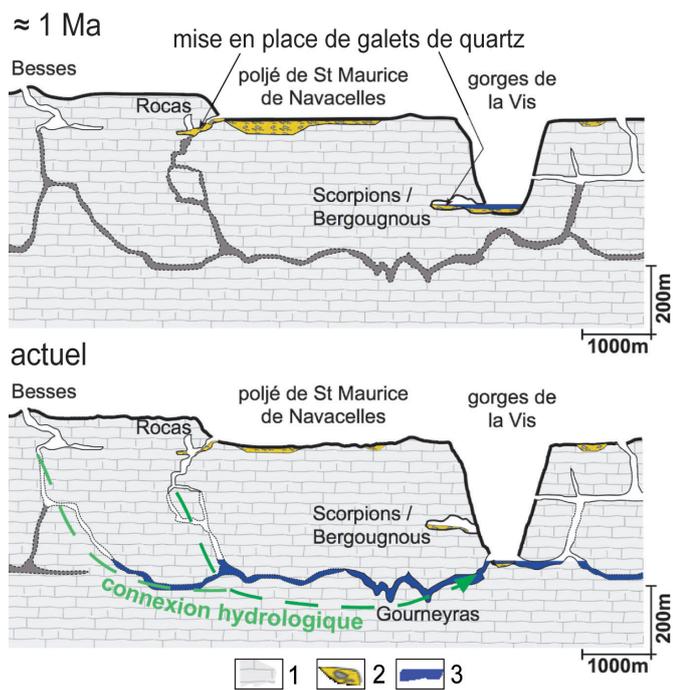


Fig. 6 - Modèle proposé pour expliquer les âges d'enfouissements obtenus dans cette étude.

Dans ce modèle la pré-structuration du réseau par fantômisation joue un rôle important. Ce n'est que lorsque la vallée recoupe un réseau fantômé que les processus d'érosion de l'altérite liés à un fort gradient hydraulique peuvent être mis en place et ainsi créer un nouveau réseau court-circuitant alors les écoulements de surface. 1. Massif calcaire et réseaux karstiques encaissés ; 2. Dépôts alluviaux allochtones ; 3. Circulation hydrologique active.

Fig. 6 - Proposed model explaining the burial ages presented in this study.
 In this model, the initial structuration of the cave network by the mean of ghost-rock formation is dominant. It is only when the valley cut through a ghost-network that the erosion of the ghost rocks can occur thanks to the newly created strong hydraulic head leading to the formation of an endokarstic water circulation and the abandon of the surface circulations. 1. Bedrock (limestone) and karstic network; 2. Allochthonous alluvial deposits; 3. Active hydrological flow.

6. Discussion

Si le modèle classique (« *per descensum* ») rend compte de manière plutôt satisfaisante des âges obtenus aux Scorpions et à Bergougous, deux cavités s'ouvrant directement sur la vallée, il échoue à expliquer la création, la dynamique de remplissage et la morphologie de la partie inférieure de l'aven du Rocas. Pour expliquer celles-ci, il est nécessaire de faire appel à une pré-structuration par fantômisation.

Notre étude présente certaines limites notables et, certains points précis doivent faire l'objet de plus amples investigations pour confirmer ou infirmer l'application à l'échelle régionale de notre modèle. Premièrement, nos conclusions sont issues de seulement trois sites d'études. Il est nécessaire de dater d'autres remplissages piégés dans des cavités situées à l'intérieur du plateau pour confirmer cette interprétation. Deuxièmement, une application à d'autres zones géographiques devrait confirmer ou infirmer la généralité du modèle. Il serait également intéressant d'effectuer une étude pétrologique et pétrographique détaillée de chacun de ces remplissages en vue de mieux contraindre les sources de ses sédiments.

Enfin, le modèle de karstogenèse classique reste utilisable pour expliquer certaines observations moyennant quelques hypothèses. Si l'on considère le niveau de base au sein du karst comme ayant une pente moyenne suffisamment forte pour relier le réseau à +350 m du Rocas avec ceux à ~ +100 m (Bergougous, Scorpions) alors il est possible de garder l'explication de fonctionnement classique *per descensum*. Mais dans ce cas, la pente nécessaire

approche les 6 % (valeur typique pour un écoulement torrentiel peu compatible avec un enregistrement sédimentaire) et, le terme même de « niveau horizontal » formé durant une période de stabilité perd sa justification. L'obtention d'âges d'enfouissement sur des échantillons à diverses altitudes entre la vallée et le centre du plateau, couplée à un modèle 3D plus complet des réseaux permettra de mieux comprendre l'applicabilité des deux modèles.

7. Conclusion

Les datations sédimentaires issues de trois cavités en lien hydrologique avec la vallée de la Vis font émerger une vision plus complexe de la structuration des réseaux karstiques que celle classiquement proposée dans les études à visée morphogénétique. Suivant l'idée initiale proposée dans les années 1990, certains réseaux karstiques seraient pré-structurés par les épisodes de fantômisations, créant un primokarst à grande échelle formés de pseudo-conduits fortement poreux. Le creusement des vallées n'entraîne alors qu'une vidange de l'altérite des primokarsts recoupés, autorisant le piégeage de sédiments à ce moment-là. Les sédiments des karsts formés dans les vallées révèlent un âge d'enfouissement qui permet de quantifier la vitesse d'incision de la vallée, et non pas du massif. En ce qui concerne les karsts situés à plusieurs kilomètres des vallées, l'âge d'enfouissement concerne un niveau de base très local associé à la mise en place du réseau karstique par évidement de l'altérite et connexion des primokarsts. La maturité de ce réseau semble marquée par la création d'exurgences plus ou moins profondes, témoins de l'évidement conséquent de ces réseaux et la fossilisation des drains de surface au profit de la circulation souterraine. Les morphologies endokarstiques seraient alors bien distinctes des zones voisines des vallées, et seraient marquées par une évolution croissante des marqueurs d'hydrodynamisme et l'effacement progressif des traces de fantômisations. Ainsi, la quantification des âges d'enfouissement des sédiments karstiques est une clé essentielle de la compréhension du lien entre les morphologies de surface et l'organisation des réseaux karstiques.

Remerciements

Nous tenons à remercier Michel Magne pour l'accès aux avens du Rocas et des Besses, Yann Guessard pour l'aide apportée lors des campagnes d'échantillonnages, Charles Mifsud et Steve Kotevski pour leur aide à la préparation des échantillons ainsi que les contributeurs de la base de données karst-3D qui ont bien voulu mettre à disposition leurs données de topographie. Nous remercions également les relecteurs Alain Devos et Yves Quinif pour leurs commentaires et suggestions qui ont amélioré ce travail.

Références

- Ambert P. (1982) - Les reliefs pléistocènes anté-volcaniques du Languedoc central. Bulletin de l'Association des Géographes Français, 485-486, 83-89.
[DOI: 10.3406/bagf.1982.5316](https://doi.org/10.3406/bagf.1982.5316)
- Armstrong R., Osborne L. (2014) - Understanding the Origin and Evolution of Jenolan Caves: The Next Steps. Proceedings of the Linnean Society of New South Wales, 136, 77-97.
- Audra P., Camus H., Rochette P. (2001) - Le karst des plateaux de la moyenne vallée de l'Ardèche : datation par paléomagnétisme des phases d'évolution plio-quadernaires (aven de la Combe Rajeau). Bulletin de la Société Géologique de France, 172 (1), 121-129.
- Audra P., Bini A., Gabrovsek F., Häuselmann P., Hobléa F., Jeannin P.-Y., Kunaver J., Monbaron, M., Šušteršič F., Tognini P., Trimmel H., Wildberger A. (2007) - Cave and karst evolution in the Alps and their relation to paleoclimate and paleotopography. Acta Carsologica, 36, 53-67.
[DOI: 10.3986/ac.v36i1.208](https://doi.org/10.3986/ac.v36i1.208)
- Balco G., Rovey C. (2008) - An isochron method for cosmogenic-nuclide dating of buried soils. American Journal of Science, 308, 174-195.
[DOI: 10.2475/10.2008.02](https://doi.org/10.2475/10.2008.02)
- Barriquand L., Quinif Y., Baele J.-M., Dechamps S., Guillot L., Papier S. (2014) - La karstification par fantômisations : le cas du Mâconnais. Actes de la 24e Rencontre d'Octobre, 99-115.
- Bruxelles L. (2001) - Dépôts et altérites des plateaux du Larzac central : causses de l'Hospitalet et de Campestre (Aveyron, Gard, Hérault) Evolution morphogénétique, conséquences géologiques et implications pour l'aménagement. Thèse de Provence, Université d'Aix-Marseille I, 266 p.
- Bruxelles L., Camus H. (2010) - Géodynamique et évolution géomorphologique des Grands Causses. In Audra PH. (coord.) : Grottes et karsts de France, Karstologia Mémoires - Association Française de Karstologie, 55, 312-315.
- Calvet M., Lemartinel B. (2003) - Vieilles formes et vieux versants. Le paradoxe des paysages méditerranéens. Collection EDYTEM. Cahiers de géographie, 1, 37-48.
[DOI: 10.3406/edyte.2003.859](https://doi.org/10.3406/edyte.2003.859)
- Calvet M., Gunnell Y., Braucher R., Hez G., Bourlès D., Guillou V., Delmas M., 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, 617- 633.
[DOI: 10.1016/j.geomorph.2015.07.013](https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.07.013)
- Camus H. (1997) - Formations de réseaux karstiques et creusement des vallées/ exemple du Larzac méridional (Hérault-France), Karstologia, 29, 23-42.
- Camus H. (2003) - Vallées et réseaux karstiques de la bordure carbonatée sud cévenole : Relations avec la surrection, le volcanisme et les paléoclimats. Thèse de doctorat, Université de Bordeaux 3, 688 p.
- Child D.P., Elliott G., Mifsud C., Smith A.M, Fink D. (2000) - Sample processing for earth science studies at ANTARES. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B Beam Interactions with Materials and Atoms 172 (1-4), 856-860.
[DOI: 10.1016/S0168-583X\(00\)00198-1](https://doi.org/10.1016/S0168-583X(00)00198-1)
- Corbel, J. (1954) - Les phénomènes karstiques dans les Grands Causses. Revue de géographie de Lyon, 29 (4), 287-315.
 DOI : 10.3406/geoca.1954.1990
- Dandurand G., Quinif Y., Guendon J.-L., Gruneisen A. (2019) - Sources vauclusiennes et fantômes de roche. Karstologia, 74, 31-46.
- Dubois C., Lans B., Olivier K., Maire R., Quinif Y. (2011) - Karstification de type fantômes de roche en Entre-deux-Mers (Gironde, France) : Implications en karstogenèse et morphologie

- karstique. *Karstologia*, 57, 19-27.
[DOI : 10.3406/karst.2011.2690](https://doi.org/10.3406/karst.2011.2690).
- Dubois C., Quinif Y., Baele J.-M., Barriquand L., Bini A., Bruxelles L., Dandurand G., Havron C., Kaufmann O., Lans B., Maire R., Martin J., Rodet J., Rowberry M., Tognini P., Vergari A. (2014)** - The process of ghost-rock karstification and its role in the formation of cave systems. *Earth Science Reviews*, 131, 116-148.
[DOI : 10.1016/j.earscirev.2014.01.006](https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.01.006)
- Dubois C., Quinif Y. (2019)** - The ghost-rock of the Chansin quarry (Belgium) – A remarkable example of pseudogallery. *Geologica Belgica*, 22, 175-181.
[DOI : 10.20341/gb.2019.004](https://doi.org/10.20341/gb.2019.004).
- Dunai T.J. (2010)** - Application of cosmogenic nuclides to Earth surface sciences. In Dunai T.J. (Eds.) : *Cosmogenic Nuclides. Principles, Concepts and Applications in the Earth Surface Sciences*, 77-143. Cambridge University Press.
[DOI : 10.1017/CBO9780511804519.005](https://doi.org/10.1017/CBO9780511804519.005)
- Dupont N., Quinif Y., Dubois C., Cheng H., Kaufmann O. (2018)** - Le système karstique de Sprimont (Belgique). Holotype d'une spéléogénèse par fantômisisation, BSGF - Earth Sciences Bulletin, 189 (1), 22 p.
[DOI : 10.1051/bsgf/2017205](https://doi.org/10.1051/bsgf/2017205)
- Ford C., Williams P. (2007)** - *Karst Hydrogeology & Geomorphology*. John Wiley, New York. 562 p.
- Gèze B., Bambier A., Paloc H. (1985)** - carte géologique BRGM au 50 000, n° 936, Nant. BRGM, Orléans.
- Granger D. E., Kirchner J.W., Finkel R.C. (1997)** - Quaternary downcutting rate of the New River, Virginia, measured from differential decay of cosmogenic ²⁶Al and ¹⁰Be in cave-deposited alluvium. *Geology*, 25, 107-110.
- Granger D.E., Muzikar P.F. (2001)** - Dating sediment burial with in situ-produced cosmogenic nuclides : theory, techniques, and limitations. *Earth and Planetary Science Letters*, 188 (2001) 269-281.
- Granger D.E., Lifton N.A., Willenbring J.K. (2013)** - A cosmic trip : 25 years of cosmogenic nuclides in geology. *GSA Bulletin*, 125, 1379-1402.
[DOI : 10.1130/B30774.1](https://doi.org/10.1130/B30774.1)
- Harmand D., Adamson K., Rixhon G., Jaillet S., Losson B., Devos A., Hez G., Calvet M., Audra P. (2017)** - Relationships between fluvial evolution and karstification related to climatic, tectonic and eustatic forcing in temperate regions. *Quaternary Science Reviews*, 166, 38-56.
[DOI : 10.1016/j.quascirev.2017.02.016](https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2017.02.016).
- Husson E. (2014)** - Interaction géodynamique/karstification et modélisation 3D des massifs carbonatés : Implication sur la distribution prévisionnelle de la karstification. Exemple des paléokarsts crétacés à néogènes du Languedoc montpelliérain. Thèse de doctorat, Université Montpellier 2, 236 p.
- KARST3D (2019)** - KARST3D. OSU OREME. (Collection).
<https://doi.org/10.15148/940c2882-49f1-49db-a97e-12303cace752>
- Lebatard A.-E., Bourlès D. (2015)** - Quantification des processus superficiels et datation par les radionucléides cosmogéniques ¹⁰Be, ²⁶Al et ³⁶Cl. *Quaternaire*, 26, 193-213.
[DOI : 10.4000/quaternaire.7339](https://doi.org/10.4000/quaternaire.7339).
- Malcles O., Vernant P., Chéry J., Camps P., Cazes G., Ritz J.-F., Fink D. (2020)** - Determining the Plio-Quaternary uplift of the southern French Massif Central ; a new insight for intraplate orogen dynamics. *Solid Earth*, 11, 241-258,
[DOI : 10.5194/se-11-241-2020](https://doi.org/10.5194/se-11-241-2020), 2020.
- Martin P. (2000)** - Forme et rugosité des surfaces karstiques. Conséquences pour une théorie spatiale et fractale de l'interface terrestre. *Karstologia : revue de karstologie et de spéléologie physique*, 36, 1-16.
[DOI : https://doi.org/10.3406/karst.2000.1748](https://doi.org/10.3406/karst.2000.1748)
- Martel E.A. (1894)** - *Les Abîmes, les eaux souterraines, les cavernes, les sources, la spéléologie*. Paris, Delagrave, 596 p.
- Mocochain L. (2007)** - Les manifestations géodynamiques – externes et internes - de la crise de salinité messinienne sur une plate-forme carbonatée peri-méditerranéenne : le karst de la basse ardèche (moyenne vallée du Rhône ; France). Thèse de doctorat, Université Aix- Marseille I – Université de Provence, U.F.R des Sciences géographiques et de l'aménagement Centre Européen de Recherches et d'Enseignement en Géosciences de l'Environnement., 196 p.
- Quinif Y. (2010)** - Fantômes de roche et fantômisation – Essai sur un nouveau paradigme en karstogénèse. *Karstologia Mémoires*, 18, 196p.
- Quinif Y., Bruxelles L. (2011)** - L'altération de type « fantôme de roche » : processus, évolution et implications pour la karstification. *Géomorphologie relief processus environnement*, 4, 349-358.
[DOI : 10.4000/geomorphologie.9555](https://doi.org/10.4000/geomorphologie.9555).
- Quinif Y. (2018)** - Fantômisation et spéléogénèse : implications et questionnement. *Karstologia*, 69.
- Rodet J. (2014)** - The primokarst, former stages of karstification, or how solution caves can be born. *Geologica Belgica*, 17, 58-65.
- Séranne M., Camus H., Lucazeau F., Barbarand J., Quinif Y. (2002)** - Surrection et érosion polyphasées de la Bordure cévenole. Un exemple de morphogénèse lente, *Bulletin de la Société Géologique de France* 173, 97-112.
- Stock G. M., Granger D. E., Sasowsky I. D., Anderson R. S., Finkel R. C. (2005)** - Comparison of U-Th, paleomagnetism, and cosmogenic burial methods for dating caves : Implications for landscape evolution studies. *Earth and Planetary Science Letters*, 236, 388-403.
[DOI : 10.1016/j.epsl.2005.04.024](https://doi.org/10.1016/j.epsl.2005.04.024)
- Stone J. O. (2000)** - Air pressure and cosmogenic isotope production. *Journal of geophysical Research*, 105 (10), 23 753-23 759.
- Tassy A., Mocochain L., Bellier O., Braucher R., Gattacceca J., Bourlès D. (2013)** - Coupling cosmogenic dating and magnetostratigraphy to constrain the chronological evolution of peri-Mediterranean karsts during the Messinian and the Pliocene : Example of Ardèche Valley, Southern France. *Geomorphology*, 189, 81-92.
[DOI : 10.1016/j.geomorph.2013.01.019](https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.01.019).
- Vanara N., Maire R., Delannoy J.-J., Gauchon C., Hobléa F., Jaillet S., Perrette Y., Perroux A.-S., Ployon E. (2009)** - Karst : From palaeogeographic archives to environmental indicators. *Géomorphologie : Relief, Processus, Environnement*, 15 (2), 83-94.
[DOI : 10.4000/geomorphologie.7520](https://doi.org/10.4000/geomorphologie.7520).
- White W. (2007)** - Cave sediments and paleoclimate. *Journal of Cave and Karst Studies*, 69 (1), 76-93.

Wilcken K.M., Fink D., Hotchkis M., Garton D., Button D., Mann M., Kitchen R., Hauser T., O'Connor A. (2017) - Accelerator Mass Spectrometry on SIRIUS : New 6MV spectrometer at ANSTO. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B : Beam Interactions with Materials and Atoms, 406.
DOI : [10.1016/j.nimb.2017.01.003](https://doi.org/10.1016/j.nimb.2017.01.003).

Wilcken K.M., Fujioka T., Fink D., Fülöp R., Codilean A.T., Simon K., Mifsud C., Kotevski S. (2019) - SIRIUS Performance : ^{10}Be , ^{26}Al and ^{36}Cl measurements at ANSTO. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B : Beam Interactions with Materials and Atoms, 455.
DOI : [10.1016/j.nimb.2019.02.009](https://doi.org/10.1016/j.nimb.2019.02.009).

Abridged English version

New Terrestrial Cosmogenic Nuclides (TCN) burial ages are provided for three caves located in the south-eastern perimeter of the “Grands-Causse”, France ; two are within the Vis canyon, and a third cave is located toward the centre of the Larzac plateau. These ages, based on $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$ cosmogenic isotopic ratios measured on quartz cobbles deposited in the galleries of the cave system challenge the commonly accepted karstic evolution model used to explain the formation process of horizontal galleries. In this model, during periods of relative base level stability, dissolution of the karstic substrate induces horizontal voids or chambers at the contemporary base level. As base level lowers due to incision and/or uplift, new horizontal cave systems are formed at lower elevations. In this model, each period of base level stability will lead to the formation of horizontal caves into which alluvial sediments might be trapped. The progressive incision of the river will create a vertical organisation of caves, with the higher the cave, the older the sediment deposit and hence older cosmogenic $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$ burial ages correlate with higher elevation above today's river bed. This model has been widely used to constrain valley incision rates (Granger et al., 1995 ; Harmand et al., 2017) (fig. 1). One can defend a reversed organisation regarding the ages with the “per ascensum” model (Moccochain, 2007), that is to say, caves will be created during a major aggradation period leading to younger ages at higher elevations. In both models, the cave-system geometries and the age –elevation dependency is controlled by the water-table elevation.

Over the past few decades, an alternative model has been proposed, backed by observations in quarry fronts, that of ghost-rock structuration (Dupont et al., 2018 ; Quinif, 2018 ; Dubois and Quinif, 2019). The ghost rock process is the isovolumetric alteration of the rock under a slow hydrological circulation that will export or remove material that is more easily dissolved. This phase of slow alteration will create a proto-network of altered rocks where the porosity could increase by up to tens of percents. The structural integrity of the altered rock volume is maintained and supported as long as it remains in the saturated zone. When the proto-network volume is transferred into the vadose zone by a lowering water-table, the whole connected network will quickly be compacted, because the drop in water pressure compared to that in the saturated zone no longer supports the ghost structure and free water circulation can now erode the altered rock to void the horizontal cave systems. This phenomenon could be fast (few days) as observed in quarry front (Dupont et al., 2018 ; Quinif, 2018 ; Dubois and Quinif, 2019). Although, these processes have been

proposed to explain regional karst structure (Dandurand et al., 2019), no absolute dating was reported to validate the alternate model.

In the Vis canyon, we sampled three cave systems (fig. 2) in order to constrain the regional incision rate and test the validity of the recently proposed one of $83 \pm 35 \text{ m.Ma}^{-1}$ (Malcles et al., 2020). The Scorpions and the Bergougnous caves are directly connected to the valley gorge walls at ca. 105 and ca. 117 m respectively above the base level (nearer river elevation). The third cave, the Rocas is located a few kilometres distant from the valley gorge crest and within the plateau of Larzac and its connection with the Vis valley is attested by dye-tracer tests. The Rocas quartzitic alluvium sediments are ca. 317 m above the river. In all three cave systems alluvial quartz cobbles have been collected to provide $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$ burial ages. For the Scorpions and the Bergougnous caves burial ages are $1.2 \pm 0.4 \text{ Ma}$, and $1.2 \pm 0.3 \text{ Ma}$ respectively, leading to a local incision rate of $90 \pm 39 \text{ m.Ma}^{-1}$ in agreement with the proposed regional incision rate of $83 \pm 35 \text{ m.Ma}^{-1}$. Extrapolating this incision rate to 317 m suggests that the Rocas sediments burial age should be $3.5 \pm 1.2 \text{ Myrs}$ old. However, the measured age is $0.94 \pm 0.07 \text{ Ma}$, which overlaps within 1 SD error with the ages from for the Scorpions and the Bergougnous caves.

In addition, quartz cobbles are present only in the upper part of the Rocas and ghost rock pockets are present in the lower part of the Rocas. This unexpected young age result, when coupled with the sedimentary evidence given above for the Rocas cave deposits, supports an explanation of karstic systems controlled by preliminary developed ghost-rock network. We propose that, around 1 Myr, the Vis valley floor was roughly 100 m above its present-day river bed and sediments were being flushed into caves via openings that were forming in the canyon at the river bed elevation (these are the alluvial sediments found in the Scorpions and the Bergougnous caves for example). Meanwhile, the plateau cave systems in the Rocas areas (e.g. the lower level of the Rocas) were not connected to the Vis valley by karst drains. The surface water flow across the plateau flushed sediments into the caves that were opened near the surface of the plateau (e.g. the upper level of the Rocas). Subsequently between now and one million years ago, the Vis has downcut by about 100m through a ghost-rock network, allowing the water table to fall and resulting in erosion and removal of the ghost-rock material, leading to the opening of whole cave system including vertical and horizontal parts (fig. 4). Direct connections from the plateau surface to the valley being then possible we can provide two scenarios : where the plateau had an extensive sedimentary cover, sediments would have been flushed down to the karst creating, mixed burial ages sequences in some caves (the younger being expected as ca. 1 Myr old). Elsewhere the ghost-rock erosion would have led to almost alluvial-free caves parts. This is supported by the absence of alluvial sediment in the lower levels of the Rocas.

Therefore, supported by our new cave deposit burial ages, we propose the application of a two step ghost-rock process which controls the formation of the karstic network observed across the south-eastern region of the “Grands-Causse” in France. We conclude that horizontal galleries (and major shafts) are not necessarily related to relative stability of the base level but are instead, primarily structured by alteration along paths of slow fluid circulation (cracks and bedding planes). The evolution into an open cave system is then a secondary process, controlled by the connection between major river incision and the ghost-rock networks.