



HAL
open science

Deux karsts de plateaux à l'origine de la karstologie française : les Grands Causses et les plateaux du Jura

Laurent Bruxelles, Didier Cailhol

► To cite this version:

Laurent Bruxelles, Didier Cailhol. Deux karsts de plateaux à l'origine de la karstologie française : les Grands Causses et les plateaux du Jura. *KARSTOLOGIA*, 2022, 79, pp.11-20. hal-03917442

HAL Id: hal-03917442

<https://hal.science/hal-03917442>

Submitted on 1 Jan 2023

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

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

Laurent BRUXELLES^{1&2}
et Didier CAILHOL^{1&3}

(1) TRACES, UMR 5608 du CNRS,
5, allées Antonio Machado
31058 Toulouse, France
laurent.bruxelles@inrap.fr

(2) GAES, University of the
Witwatersrand, Johannesburg,
South Africa

(3) Inrap, 13, rue du Négoce,
31650 Saint-Orens-de-Gameville,
France
didier.cailhol@inrap.fr

Two plateau karsts at the origin of French karstology: the Grands Causses and the plateaus of the Jura

Deux karsts de plateaux à l'origine de la karstologie française : les Grands Causses et les plateaux du Jura

ABSTRACT: In France, two karstic areas attracted very early the attention of geographers, geologists, speleologists and karstologists: the Grands Causses and the Jura plateaus. It is their typical and spectacular forms, but also the particular hydrology that intrigued and were at the origin of detailed studies already borrowing the vocabulary of another famous plateau, the cradle of karstological terminology: the Kras. Since then, different generations of researchers have succeeded in specifying, by various approaches, the framework of the genesis of these landscapes but also their chronology, making it possible to answer very current questions of management and land planning. This article is an opportunity to review the specificities of these two long-studied regions and to summarize the main features of their morphological evolution as we understand it today.

KEYWORDS: plateaus, karst, causses, geomorphology, covers, canyon, Jura, Aveyron, Lozère, Gard.

RÉSUMÉ : En France, deux régions karstiques ont très tôt attiré l'attention des géographes, des géologues, des spéléologues et des karstologues : les Grands Causses et les plateaux du Jura. Ce sont leurs formes typiques, spectaculaires, mais aussi l'hydrologie particulière qui intriguent et sont à l'origine d'études détaillées empruntant déjà le vocabulaire d'un autre plateau célèbre, berceau de la terminologie karstologique : le Kras. Depuis, différentes générations de chercheurs ont réussi à préciser le cadre de la formation de ces paysages mais aussi leur chronologie, permettant de répondre à des questions tout à fait actuelles de gestion et d'aménagement du territoire. Cet article sera l'occasion de faire un point sur les spécificités de ces deux régions étudiées de longue date et de faire une synthèse des principaux traits de leur évolution morphologique tels que nous la comprenons aujourd'hui.

MOTS-CLÉS : plateaux, karst, causses, géomorphologie, couvertures, canyon, Jura, Aveyron, Lozère, Gard.

Introduction

The limestone massifs of the Causses and the Jura with their large open and typical landscapes constitute singular ensembles which dominate the basins or the neighboring plains. The particularities of the present karst required the populations who settled there to adapt both their lifestyles and their habitats in order to develop communities and activities in interaction with the resources and the environments. Strong identities have been created at the origin of land use and development as close as possible to available resources. This culture of karst developed by the populations was based on practices of collaboration and autonomy. It has long presented an austere character and the feeling of limited resources compared to the plain territories they dominate. From the 17th century, the development of traffic routes and exchanges brought new perspectives and questions about these regions and their natural heritage. Nineteenth-century geographers and geologists used these massifs to lay the essential

Introduction

Les massifs calcaires des Causses et du Jura avec leurs grandes étendues et leurs paysages caractéristiques constituent des ensembles singuliers qui dominent les bassins ou les plaines avoisinantes. Les particularités du karst présent ont demandé aux populations qui s'y installaient des adaptations, tant de leurs modes de vie que de leurs habitats, pour y développer des communautés et des activités en interaction avec les ressources et les environnements. Des identités fortes se sont créées à l'origine d'usages et d'aménagement du territoire au plus près des ressources disponibles. Cette culture du karst développée par les populations a reposé sur des pratiques de collaboration et d'autonomie. Elle a longtemps présenté un caractère austère et le sentiment de ressources limitées par rapport aux territoires de plaine qu'ils dominent. À partir du XVII^e siècle, le développement des axes de circulation et des échanges apporte des regards nouveaux et des questionnements à propos de ces régions et de leurs patrimoines naturels. Les

foundations for understanding the history of the earth, the processes involved in geomorphological evolutions and the functioning of related ecosystems. The main principles of karstology find examples and explanations from the work carried out on these two massifs which, when confronted with observations and scientific discussions on other areas of karst plateaus, became the bases of karstology. From sinkholes to avens, ruz to combs, from springs to resurgences, the relationships between the surface environments and the underground environment will be described and interpreted in an increasingly precise manner. The contributions of speleological exploration will reveal the density and importance of the speleological networks present and the importance of the karstic systems to which they are attached. On the Jura massif, more than 12,000 cavities have been inventoried on both the French and Swiss sides. On the Causses, the various inventories give a similar number. Currently, the need for scientific knowledge to address the issues of development and management of these territories has provided essential data in the fields of geology, hydrogeology, karstology and archeology for the understanding of these plateaus and of the natural heritage that constitutes them. Their landscapes, original but authentic, have a strong tourist attraction and play a major role in the economic development of these areas.

I. The Grands Causses Plateaus: A long term and complex evolution

If karstic conduits can form in a few thousand years, successive studies on the Grands Causses have shown that these landscapes and the associated karstic networks result from a complex, polyphase evolution, which must now be considered in millions or even in tens of millions of years.

A. An original landscape that leaves no one indifferent

For the geographers and travelers of the 19th century, the landscapes of the Grands Causses were in turn described as a desolate “desert” where the “*pieces of stones and rocks stretch as far as the eye can see and seem to make any cultivation impossible*” [Las Cases, 1880], “*deforested and bare horizons extending into rocky plateaus, dry and arid deserts*” [A. Joanne, 1881] or even “... *the most desolate and miserable country in the world, without wood, without water, without culture, without villages, without inhabitants*” [Malot, 1878]. Yet, it was at the same time that Edouard Alfred Martel revealed the treasures of the Grands Causses by exploring behind the scenes: caves and deep shafts [Martel, 1883, 1885 and 1936; fig. 1]. From his first visit to the region, he fell in love with these landscapes and would return very regularly.

The foundations of caving and karstology were then laid by E. A. Martel through several major works for our discipline. These works paved the way for other geographers who, at the beginning of the 20th century, integrated the karstic dimension into the landscapes they studied. Thus, De Martonne [1926] described the Grands Causses as “*high limestone plateaus smashed by sinkholes and caves which absorb all the water that has fallen on their stony surface, cut only by three or four fantastic gorges, where rivers rapids flow between walls 400 to 500 m high.*” H. de Baulig, in 1928,

géographes et les géologues du XIX^e siècle posent, à partir de ces massifs, des bases essentielles pour la compréhension de l'histoire de la Terre et des processus impliqués dans les évolutions géomorphologiques et le fonctionnement des écosystèmes qui s'y rapportent. Les grands principes de la karstologie trouvent des exemples et des explications à partir des travaux conduits sur ces deux massifs qui, confrontés aux observations et aux discussions scientifiques sur d'autres zones de plateaux karstiques, vont devenir des bases de la karstologie. Des dolines aux avens, des ruz aux combes, des sources aux résurgences, les relations entre les milieux de surface et le milieu souterrain vont être décrites et interprétées de manière de plus en plus précise. Les apports de l'exploration spéléologique vont révéler la densité des réseaux spéléologiques présents et l'importance des systèmes karstiques auxquels ils se rattachent. Sur le massif du Jura, c'est plus de 12 000 cavités inventoriées tant du côté français que suisse. Sur les Causses, les différents inventaires donnent un nombre similaire. Actuellement, les besoins de connaissances scientifiques pour aborder les questions d'aménagement et de gestion de ces territoires ont apporté des données essentielles dans les domaines de la géologie, l'hydrogéologie, la karstologie et l'archéologie pour la compréhension de ces plateaux et des patrimoines naturels qui les constituent. Leurs paysages, originaux mais authentiques, ont un fort attrait touristique et participent largement au développement économique de ces massifs.

I. Les plateaux des Grands Causses : une évolution complexe sur le temps long

Si des conduits karstiques peuvent se former en quelques milliers d'années, les études successives sur les Grands Causses ont montré que ces paysages et les réseaux karstiques associés découlent d'une évolution complexe, polyphasée, qu'il faut désormais considérer en millions voire en dizaines de millions d'années.

A. Un paysage original qui ne laisse pas indifférent

Pour les géographes et voyageurs du XIX^e siècle, les paysages des Grands Causses sont tour à tour décrits comme un « désert » désolé ou les « *morceaux de pierres et de rochers s'étendent à perte de vue et semblent rendre impossible toute culture* » [E. de Las Cases, 1880], « *des horizons déboisés et nus s'étendant en plateaux rocheux, des déserts secs et arides* » [A. Joanne, 1881] ou encore « ... *le pays le plus désolé et le plus misérable du monde, sans bois, sans eau, sans culture, sans villages, sans habitants* » [Malot, 1878]. C'est pourtant à la même époque qu'Édouard-Alfred Martel va révéler les trésors des Grands Causses en explorant l'envers du décor : les grottes et les gouffres [Martel, 1883, 1885 et 1936 ; figure 1]. Dès sa première visite dans la région, il tombe amoureux de ces paysages et reviendra très régulièrement.

Les fondements de la spéléologie et de la karstologie sont alors posés par É.-A. Martel au travers de plusieurs ouvrages majeurs pour notre discipline. Ces travaux ouvrent la voie à d'autres géographes qui, au début du XX^e siècle, intègrent la dimension karstique aux paysages qu'ils étudient. Ainsi, De Martonne [1926] décrit les Grands Causses comme des « *hauts plateaux calcaires défoncés par les puits des avens et les grottes qui absorbent toute l'eau tombée sur leur*

underlined the particularity of these landscapes “*Into the mass of folded and crumpled, metamorphic and crystalline terrains of dark tonality, the Grands Causses introduce, with the regulated order of their powerful limestone beds, the clear note of their calm horizons and their vigorous escarpments*”. Shortly after, Paul Marres, in his thesis [1935] specified that these plateaus “*can easily be distinguished from the regions that surround them. There is nothing in common between the greyish rolling of their bald ridges and the tight waves of the Cévennes ridges or the massive ridges of the Aigoual, darkened with forests and moors*”. What a contrast with the first citations of the 19th century!

On this momentum, many researchers then succeeded to reveal fragments or aspects of the history of these plateaus. They thus show that it is much more complex than the relatively flat topography of the plateaus might suggest...

B. A simple geological and geomorphological context...

The plateaus of the Grands Causses are located between the southwestern edge of the Massif Central, include the Causse du Larzac, the Causse Rouge, the Causse Noir, the Causse Méjean, the Causse Comtal and the Causse de Sauveterre/Séverac for the main ones (figure 2). They cover an area of 3000 km², the Larzac alone covering more than 1000 km². The surface of the plateaus varies from 700 to 1200 m in altitude and are bordered by vertiginous cornices several hundred meters high. The only perennial water circulations are at the bottom of the canyons which are enclosed in the limestone entablature and come from the foothills of the Massif Central. They are fed all along their course by numerous karstic springs which drain more or less important parts of the plateaus.

The sedimentary series that make up the Grands Causses was deposited from the Triassic to the Upper Cretaceous. It reaches 1,500 to 2,000 meters in thickness, comprising two main level of karstifiable terrain several hundred meters thick: the Lower Jurassic (Lias: Hettangian and Sinemurian) and the Middle/Upper Jurassic. Most of the tectonic structuring of this series takes place during the Eocene and results in a north-south compression linked to the formation of the Pyrenees. Large east-west faults, often inverse, cut the generally monoclinical carbonate series and guide the waves of regressive erosion along the marly anticlines, forming long east-west indentations.

C. ...but a very long geomorphological evolution

The history of the landscapes of the Grands Causses results from a succession of legacies which accumulate on the surface in the form of a palimpsest of shapes and surficial formations. At the end of the Lower Cretaceous, the carbonate platform emerges and is subject to karstification. Bauxite deposits contemporaneous with the first karsts were sealed by the comeback of the sea during the Upper Cretaceous [Bruxelles et al., 1999]. Thus, from the Cenomanian, a marine intrusion invaded the karstic landscapes and deposited more than a hundred marginal-coastal sediments. The sea left definitively at the end of the Upper Cretaceous and the Pyrenean compression phase caused the structuring but also the jerky uplift of the entire region. This results in a series of staged erosion surfaces whose



Figure 1 : Plan of the ruiniform chaos of Montpellier-le-Vieux (Causse Noir, Aveyron) surveyed by É.-A. Martel [1885, Source: National Library of France, BNF].

Plan du chaos ruiniforme de Montpellier-le-Vieux (Causse Noir, Aveyron) levé par É.-A. Martel [1885, source : Bibliothèque nationale de France].

surface pierreuse, coupés seulement par trois ou quatre gorges fantastiques, où des rivières rapides coulent entre des parois hautes de 400 à 500 m. ». H. Baulig, en 1928, soulignera la particularité de ces paysages « *Dans la masse des terrains plissés et froissés, métamorphiques et cristallins de tonalité sombre, les Grands Causses introduisent avec l'ordonnance réglée de leurs puissantes assises calcaires, la note claire de leurs horizons calmes et de leurs vigoureux escarpements* ». Peu après, Paul Marres, dans sa thèse [1935] précise que ces plateaus « *se distinguent aisément des régions qui les encadrent. Rien de commun entre le moutonnement grisâtre de leurs croupes chauves et les vagues serrées des crêtes cévenoles ou les croupes massives de l'Aigoual, assombries de forêts et de landes* ». Quel contraste avec les premières citations du XIX^e siècle !

Sur cette lancée, de nombreux chercheurs se sont ensuite succédé pour révéler des fragments ou des aspects de l'histoire de ces plateaus. Ils montrent ainsi qu'elle est bien plus complexe que la topographie relativement plane des plateaus ne pourrait le laisser penser...

B. Un contexte géologique et géomorphologique simple...

Les plateaus des Grands Causses, situés le long de la bordure sud-ouest du Massif central, comprennent le Causse du Larzac, le Causse Rouge, le Causse Noir, le Causse Méjean, le Causse Comtal et le Causse de Sauveterre/Séverac pour les principaux (figure 2). Ils couvrent une surface de 3000 km², le Larzac concernant à lui seul plus de 1000 km². La surface des plateaus varie de 700 à 1200 m d'altitude et elle est bordée de corniches vertigineuses de plusieurs

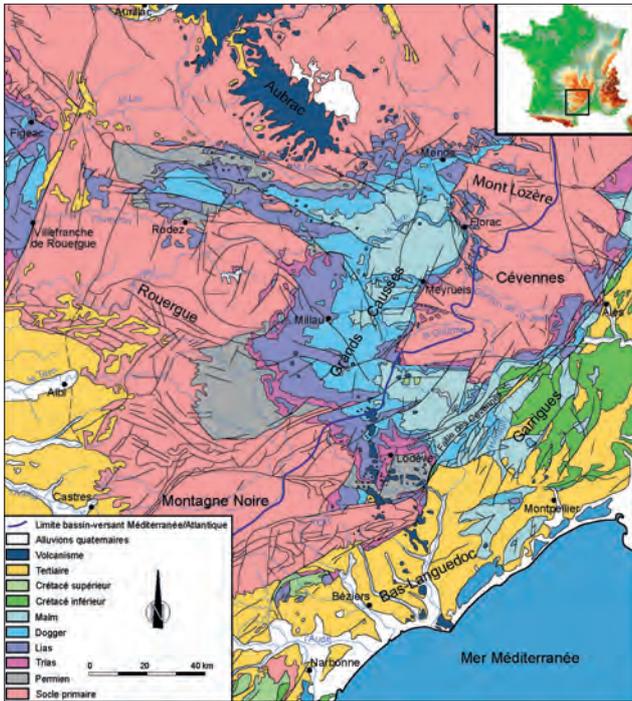


Figure 2 : Synthetic geological map of the Grands Causses region (based on the BRGM 1/1 000 000 geological map).
Carte géologique synthétique de la région des Grands Causses (d'après la carte géologique au 1/1 000 000 du BRGM).

formation begins in the Paleogene and which are found from one plateau to another. The Neogene is characterized by an upheaval of dynamics. With the oceanic opening of the Gulf of Lion and the appearance of the Mediterranean, a new gradient appears. The Grands Causses region then straddled the Atlantic and the Mediterranean watershed. The continuation of the uplift of the Massif Central causes the collection of the hydrographic network which descends from the Cévennes, crosses the Grands Causses and brings igneous and metamorphic sediments into the sedimentary basins which border them. Karstic systems, whether binary or unary, develop according to this device and the progressive fragmentation of the carbonate platform. The impact of the Messinian salinity crisis will have little effect on the digging of the canyons, the size of the deepening of which is globally comparable between the Atlantic and Mediterranean areas, but it will play an important role in the structuring of the endokarst on its southern margin.

D. Some major aspects of the karstic evolution of the Grands Causses plateaus

The surface of the plateaus combines a long geomorphological evolution of more than 100 million years, interrupted by the marine intrusion of the Upper Cretaceous. It is not possible here to review in detail all the geomorphological steps, but some fundamental points in the evolution of the karst deserve to be specified.

1) The impact of sedimentary covers

As soon as the sea receded, the plateaus were subjected to the alteration of the sedimentary sequence while playing the role of foothills of the Massif Central [Ambert, 1994; Bruxelles, 2001; Camus, 2003]. Throughout the Paleogene

centaines de mètres de hauteur. Les seules circulations d'eau pérennes se situent au fond de canyons qui sont encaissés dans l'entablement calcaire et proviennent des contreforts du Massif central. Elles sont alimentées tout le long de leur parcours par de nombreuses sources karstiques qui drainent des parties plus ou moins importantes des plateaux.

La série sédimentaire qui constitue les Grands Causses s'est déposée du Trias au Crétacé supérieur. Elle atteint 1 500 à 2 000 mètres d'épaisseur comprenant deux principales tranches de terrain karstifiables épaisses de plusieurs centaines de mètres : le Jurassique inférieur (Lias calcaire) et le Jurassique moyen/supérieur. L'essentiel de la structuration tectonique de cette série s'opère au cours de l'Éocène et se traduit par une compression nord-sud liée à la formation des Pyrénées. De grandes failles est-ouest, souvent inverses, découpent la série carbonatée globalement monoclinale et guident les vagues d'érosion régressive le long des anticlinaux marneux, formant de longues échancrures est-ouest.

C. ...mais une très longue évolution géomorphologique

L'histoire des paysages des Grands Causses résulte d'une succession d'héritages qui se cumule en surface sous forme d'un palimpseste de formes et de formations superficielles. Dès la fin du Crétacé inférieur, la plateforme carbonatée émerge et elle est soumise à la karstification. Des dépôts bauxitiques contemporains des premiers karsts sont scellés par le retour de la mer au Crétacé supérieur [Bruxelles et *al.*, 1999]. Ainsi, dès le Cénomaniens, une ingression marine envahit les paysages karstiques et dépose plus d'une centaine de mètres de sédiments marginaux-littoraux. La mer se retire définitivement à la fin du Crétacé supérieur et la phase de compression pyrénéenne provoque la structuration mais aussi la surrection saccadée de la région. Cela se traduit par une série de surfaces d'érosion emboîtées dont la formation démarre dès le Paléogène et que l'on retrouve d'un causse à l'autre. Le Néogène se caractérise par un chamboulement des dynamiques. Avec l'ouverture océanique du Golfe du Lion et l'ouverture de la Méditerranée, un nouveau gradient apparaît. La région des Grands Causses est alors située à cheval entre les bassins versants atlantique et méditerranéen. La poursuite du soulèvement du bloc cévenol provoque l'encaissement du réseau hydrographique qui descend des Cévennes, traverse les Grands Causses et apporte un cortège de minéraux du socle dans les bassins sédimentaires qui les bordent. Les systèmes karstiques, qu'ils soient binaires ou unaires, se développent en fonction de ce dispositif et du morcellement progressif de la plateforme carbonatée. L'impact de la crise de salinité messinienne n'aura que peu d'effet sur le creusement des canyons dont l'ampleur de l'entaille est globalement comparable entre les domaines atlantique et méditerranéen mais elle jouera un rôle important dans la structuration de l'endokarst sur sa marge méridionale.

D. Quelques aspects majeurs de l'évolution karstique des Grands Causses

La surface des plateaux cumule une évolution géomorphologique longue de plus de 100 millions d'années, interrompue par l'ingression marine du Crétacé supérieur. Il n'est pas possible ici de reprendre en détail l'ensemble des

and the Neogene, loose cover, more or less thick, therefore succeeded one another and contributed to the morphogenesis of the plateaus. These surficial formations come either from the alteration of the sedimentary pile (Upper Cretaceous, Bajocian limestone with cherts, Bathonian dolomite) or from allochthonous sediments having more or less evolved *in situ* (bauxites, Cévennes alluvium). They took turns according to the evolution of the landscapes and notably allowed the development of cryptocorrosion, the formation of poljes and the development of vast corrosion surfaces of corrosion wedged on former base levels. Finally, with the digging of the canyons, the remains of these covers will allow locally the maintenance of the cryptocorrosion processes and the concentration of the water towards privileged points of loss. The rocky aspect that marked the first authors hardly accounts for the importance played by these covers in the morphogenesis of the Causses as they are relict today.

2) The role of ghost rocks in the development of endokarst

One of the fundamental aspects in the first steps of endokarst development is attributable to ghost rocks karstification [Quinif, 1999 and 2010; Quinif and Bruxelles, 2011; Bruxelles, 2001]. The isovolume alteration of certain levels of the sedimentary pile (Hettangian, Sinemurian, Bajocian and Bathonian for the most part) is responsible



Figure 3 : Cave of the Cabane de Saint-Paul-des-Fonts (Aveyron). The gallery is wedged on a pseudo-endokarst hollowed out of its alterites, overdeepened laterally by the underground river.

Grotte de la Cabane de Saint-Paul-des-Fonts (Aveyron). La galerie est calée sur un pseudo-endokarst évidé de ses altérites, surcreusé latéralement par la rivière souterraine. Photo J.-Y. Bigot

facteurs géomorphologiques mais certains points fondamentaux dans l'évolution du karst méritent d'être précisés.

1) L'impact des couvertures d'altérites

Dès le retrait de la mer, les plateaux ont été soumis à l'altération des séries sédimentaires caussenardes tout en jouant le rôle de piémont du Massif central [Ambert, 1994 ; Bruxelles, 2001 ; Camus, 2003]. Tout au long du Paléogène et du Néogène, des couvertures meubles, plus ou moins épaisses, se sont donc succédé et ont contribué à la morphogenèse des plateaux. Ces formations superficielles proviennent soit de l'altération de la série caussenarde (Crétacé supérieur, calcaires bajociens à chailles, dolomie bathonienne) soit d'apports allochtones ayant plus ou moins évolué sur place (bauxites, alluvions cévenoles). Elles se sont relayées au gré de l'évolution des paysages et ont notamment permis le développement de la cryptocorrosion, la formation de poljés et de vastes surfaces de corrosion calées sur les anciens niveaux de base. Enfin, avec le creusement des canyons, les restes de ces couvertures vont permettre le maintien local des processus de cryptocorrosion et la concentration de l'eau vers des points de perte privilégiés. L'aspect rocailleux qui a marqué les premiers auteurs rend difficilement compte de l'importance jouée par ces couvertures dans les morphogenèses caussenardes tant elles sont relictuelles aujourd'hui.

2) Le rôle de la fantômisiation dans le développement de l'endokarst

Un des aspects fondamentaux dans l'initiation du développement de l'endokarst est attribuable à la fantômisiation [Quinif, 1999 et 2010 ; Bruxelles, 2001 ; Quinif et Bruxelles, 2011]. L'altération isovolume de certains étages de la série sédimentaire caussenarde (Hettangien, Sinémurien, Bajocien et Bathonien pour l'essentiel) est responsable non seulement de formes de surface, comme les reliefs ruiniformes décrits par Martel (figure 1), mais aussi de la préparation et l'organisation du drainage karstique. Cette altération a pu démarrer très précocement mais c'est surtout à partir du Néogène, lorsqu'un gradient hydraulique apparaît, que les couloirs d'altération formés sous plafond carbonatés (les pseudo-endokarsts) sont évidés de leurs altérites. À l'image des exemples belges [Quinif et Maire, 2009], ce processus est rapide et certains hydrosystèmes karstiques viennent soutirer les couvertures superficielles et conquérir par érosion régressive les bassins-versants des autres sources [Bruxelles et Bruxelles, 2002 ; Malcles et Vernant, 2020]. Ce phénomène, encore actif, est bien visible dans le réseau de la Cabane de Saint-Paul des Fonds (figure 3) par exemple ou dans l'hydrosystème de la source du Durzon.

3) L'ancienneté du creusement des canyons

Pendant très longtemps, le creusement des canyons des Grands Causses a été contingenté au seul Quaternaire [Dubois, 1985], en lien avec un soulèvement régional à partir de la fin du Pliocène. Pour certains encore, ils étaient le résultat de l'effondrement de la voûte d'anciennes galeries traversant les plateaux [Corbel, 1954 ; Coulet, 1962]. Par la combinaison d'éléments géomorphologiques et géologiques, Paul [Ambert, 1994] et Martine Ambert [1995]

not only for surface features, such as the ruiniform reliefs described by Martel (figure 1), but also for preparation and organization of karstic drainage. This alteration could have started very early, but it is especially from the Neogene, when a hydraulic gradient appears, that the alteration corridors formed under the carbonate ceiling (the pseudo-endokarsts) are hollowed out of their alterites. Like the Belgian examples [Quinif and Maire, 2009], this process is rapid. Some karstic hydrosystems drain the surface covers and conquer by regressive erosion the catchment areas of other sources [Bruxelles and Bruxelles, 2002; Malcles and Vernant, 2021]. This phenomenon, which is still active, is clearly visible in the network of the Cabane de Saint-Paul des Fonds (figure 3) for example or in the hydrosystem of the Durzon spring.

3) The age of the digging of the canyons

For a very long time, the digging of the canyons of the Grands Causses was restricted to the Quaternary alone [Dubois, 1985] in connection with a regional uplift from the end of the Pliocene. For others, they are the result of the collapse of the vault of old galleries crossing the plateaus [Corbel, 1954; Coulet, 1962]. Paul Ambert [Ambert, 1994; Ambert and Ambert, 1995], by combining geomorphological and geological elements, places the history of this digging in the long term. Thus, by the presence of perched meanders and remnant of alluvial terraces, he demonstrates the sub-aerial origin of these circulations. Then, the dating of effusive volcanoes at mid-height in the gorges combined with those of stepped travertines at the bottom of the valley allow him to propose the start of construction of the canyons of the Grands Causses to the Miocene. It thus validates the ages advanced a century ago by precursors such as Edouard Alfred Martel for example [1883 and 1936]! These results are confirmed by recent dating obtained recently from cosmogenic nuclides [Sartegout et al.], with an average incision rate of 80 m/million years [Malcles, 2021]. If we consider a homogeneous incision rate, we must actually date back to the end of the Miocene the beginning of the collection of watercourses, knowing that they must already have crisscrossed the Grands Causses between the Massif Central and the long-standing Piedmont. This gives an indication of the antiquity of the perched karst networks, karstification having accompanied the establishment of these hydrographic networks and then their deepening throughout the whole Pliocene and the Quaternary.

II. Jura massif, a plateau karst?

Jura Massif, is a low to medium altitude range, which spatially coincides with the intra-continental Rhine-Bresse Transfer Zone to the west and the Alpine orogenesis to the east. A succession of layered reliefs, with steep valleys organize these typical karst landforms and landscapes. The elevation range to 300 m a.s.l. in the western external part, to 1700 m a.s.l. in the “Haute chaîne” at the east of the massif [Bichet et Campy, 2009]. The dominant climate is continental with oceanic influences with rainy and snowy precipitations which favors an important forest cover, currently dominated by oak-grass forests on the plateaus and conifers on the high ranges [Cupillard et al., 2015]. If

replacent l'histoire de ce creusement dans le long terme. Ainsi, la présence de méandres perchés et de lambeaux de terrasses alluviales, confirment l'origine sub-aérienne de ces circulations. Puis, la datation de volcans effusifs à mi-hauteur dans les gorges combinées à celles de travertins étagés en fond de vallée leur permettent de repousser la mise en chantier des canyons des Grands Causses au Miocène. Ils valident ainsi les âges avancés il y a un siècle par les précurseurs comme É.-A. Martel notamment [1883 et 1936] ! Ces résultats sont désormais validés grâce aux datations récentes obtenues récemment à partir des nucléides cosmogéniques [Sartegou et al., 2018], avec un taux d'incision de 80 m/million d'années en moyenne [Malcles, 2021]. Si l'on considère un taux d'incision homogène sur toute la hauteur des gorges, il faut effectivement faire remonter le début de l'encaissement des cours d'eau à la fin du Miocène, sachant qu'ils devaient déjà sillonner les Grands Causses, entre le Massif central et le piémont, de longue date. Cela donne de fait une indication de l'ancienneté des réseaux karstiques perchés, la karstification ayant accompagné la mise en place de ces réseaux hydrographiques puis leur encaissement pendant au moins tout le Pliocène et le Quaternaire.

II. Le massif du Jura, un karst de plateau ?

Parmi les autres massifs calcaires présents sur le territoire français, le Jura, en dépit de contextes climatiques bien différents, présente de nombreuses similitudes avec les plateaux caussenards tant du point de vue des évolutions karstiques que des occupations anthropiques et des usages du territoire et des ressources.

Le massif du Jura se déploie entre la France, la Suisse et l'Allemagne. Il est installé entre les bassins d'effondrement de la Saône à l'ouest, celui du Rhin au nord-ouest et les reliefs alpins à l'est, présente une succession de structures étagées, entrecoupées de vallées plus ou moins encaissées qui organisent des espaces et des paysages karstiques remarquables. L'étagement progressif de la partie occidentale, contraste avec les reliefs plus marqués qui dominent le bassin molassique suisse à l'est. Si les altitudes sont modestes, elles s'échelonnent entre 300 et 800 m pour les plateaux de la bordure externe et s'élèvent jusqu'à 1700 m pour les reliefs de la haute chaîne plissée [Bichet et Campy, 2009]. Du fait de sa position, le climat est relativement marqué par les influences continentales et océaniques avec des précipitations pluviales et neigeuses qui favorisent un couvert forestier important, actuellement dominé par des forêts à chênaie-hétraie sur les plateaux et des résineux sur la haute chaîne [Cupillard et al., 2015].

Cette géographie d'apparence simple résulte en fait de processus géologiques et géomorphologiques de grande ampleur qui se mettent en place avec les évolutions de la plaque européenne depuis le Mésozoïque pour s'ajuster aux grands bouleversements tectoniques du Cénozoïque et aux variations environnementales du Quaternaire. Ces différents aspects ont été perçus dès le XVIII^e siècle par Alexander von Humboldt ou plus tard, au XIX^e siècle, avec Alexandre Brongniart pour définir les séries géologiques jurassiques, avec Jules Thurmann pour les plissements des calcaires et Louis Agassiz et les évolutions glaciaires. C'est

geography looks clear, the geological and geomorphological evolutions must be taken in a long-term consideration, from the Cenozoic to the Quaternary. At the end of the XVIIIth Century, Geographer like Alexander von Humboldt, described the Jura limestone and, on 1830, Brongniart named the Jurassic period from the observations in the Jura. Then Jules Thurmann explained first, the folding layers in the limestone observed in the Northern Swiss part of the Jura and Louis Agassiz the glacial extension with the erratic from Neuchâtel area. At the beginning of the XXth Century, Eugène Fournier installed the karstic hydrogeological studies by the combination of cave exploration and hydrological monitoring.

A. Jura Massif, the result of the Cenozoic tectonic evolutions

During Cenozoic, this part of the European plate is affected by major tectonic evolutions. The alpine uplift and the Saône and Rhine grabens adjustments, huge folding and thrusting complex events occurred (figure 4). The evaporite levels over the crystalline basement allowed these thrusting and folding dynamic [Rime et al., 2019]. The shortening of the structures was 21 to 26 km to form an arc, more than 340 km long [id.]. Folding and thrusting developments followed one another until the early Quaternary, with intense erosive phases. Deep fault systems are associated with thrusting and ramp formations (figure 5). Intense

également au passage du XX^e siècle qu'Eugène Fournier installe des bases essentielles de l'hydrogéologie karstique et d'études spéléologiques pour la compréhension des systèmes karstiques et du milieu souterrain.

A. Le massif du Jura, le produit des grandes évolutions tectoniques du Cénozoïque

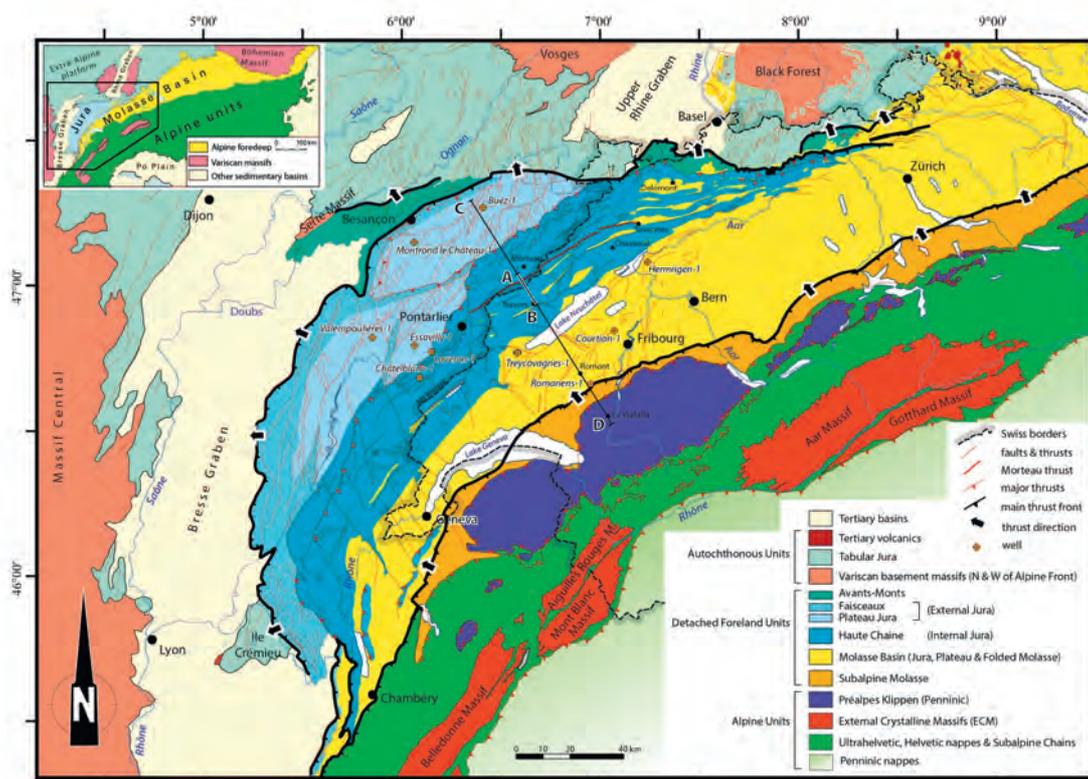
Les structures du relief jurassien sont issues des grandes évolutions tectoniques qui ont affecté cette partie de la plaque européenne au cours du Cénozoïque (figure 4). Avec la surrection alpine et les évolutions des structures d'effondrement des fossés de la Saône et du Rhin, et l'installation du bassin molassique suisse, les séries sédimentaires ont été plissées et des chevauchements complexes se sont installés à partir des niveaux d'évaporites qui reposent sur le socle [Rime et al., 2019]. Le raccourcissement des structures a été de l'ordre de 21 à 26 km pour aboutir à cet arc, formé par le front de chevauchement long de plus de 340 km [idem].

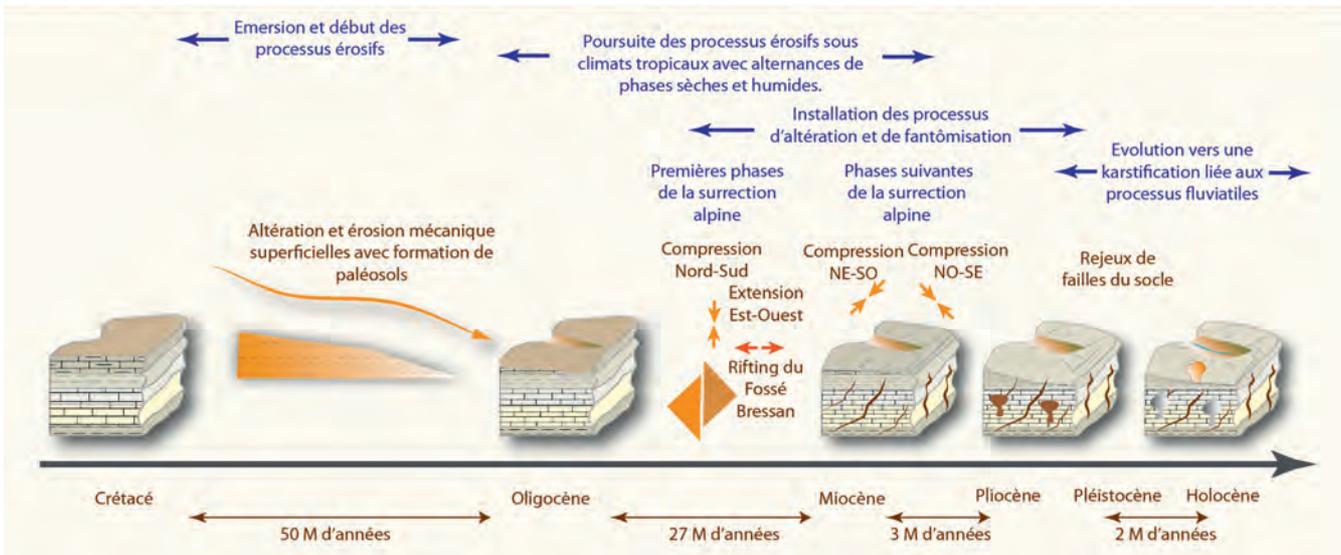
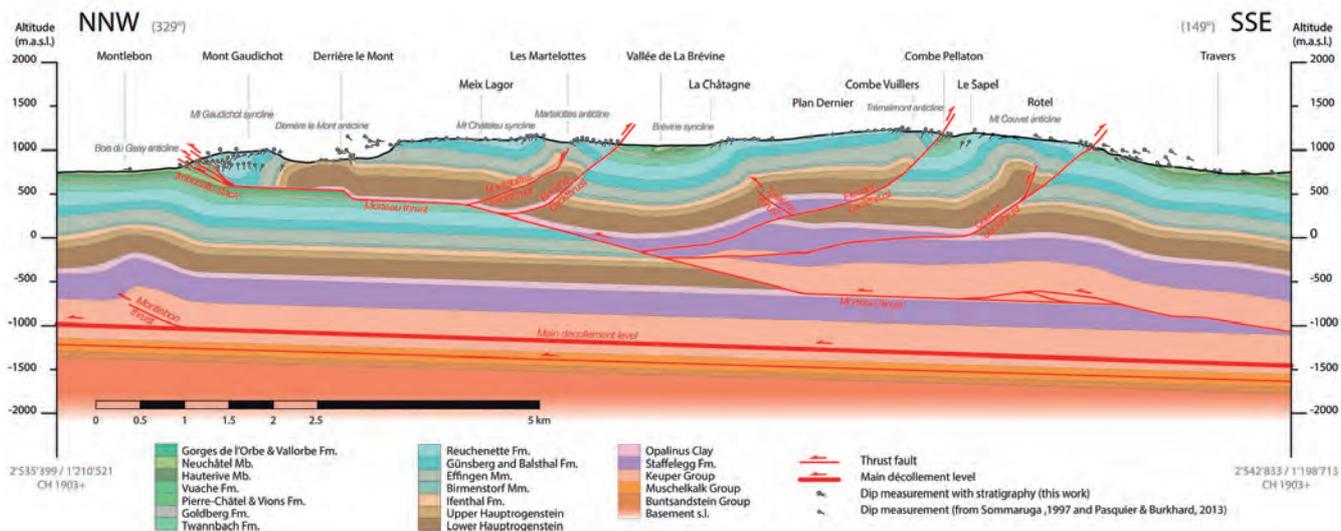
Les évolutions des plissements et des chevauchements se sont succédé jusqu'au début du Quaternaire, avec des phases érosives intenses. Des systèmes de failles profondes accompagnent les chevauchements et les formations de rampes (figure 5).

Lors de ces évolutions, des processus de karstification parfois intenses se mettent en place, conditionnés par les contextes paléo-environnementaux correspondants (figure 6).

Ainsi, les grands systèmes karstiques que l'on retrouve dans les structures de la Haute chaîne, tant côté suisse avec le système de Vallorbe, grotte des Fées, le système de la Loue dans le département du Doubs ou le système karstique de la Bienne dans le département du Jura, avec les émergences des sources de Brive ou de l'Enragé, à la base des systèmes chevauchants autour des Rousses, sont

Figure 4 : Geological context of the Jura between the Saône and Rhine collapse basins and the Swiss Molassic basin. Rime et al [2019], modified from Sommaruga et al [2017]. Contexte géologique du Jura entre les bassins d'effondrement de la Saône et du Rhin et le bassin molassique suisse. Rime et al. [2019], modifié d'après Sommaruga et al. [2017.]





↑ Figure 5 : Structures and tectonics of the central Jura between the Val de Travers in Switzerland and Montlebon (Doubs, France) Rime et al [2019].
Structures et tectonique de la partie centrale du Jura entre le Val de Travers en Suisse et Montlebon (Doubs, France). Rime et al. [2019].

↑↑ Figure 6 : Evolutionary process of the Jura karst. Processus d'évolution du karst jurassien.

karstification processes take place, conditioned by the corresponding paleo environmental contexts (Fig.6). Thus, the present huge karst systems are conditioned by these structures. Vallorbe spring and grotte des Fées system, in Switzerland, Loue spring or Bienne karst system with Brive and Enragé springs, located on the French side of the "Haute chaîne" are representative of these resulting large-scale karstification.

Verneau cave network is 30 km long installs at the boundary of the plateau of Levier and the Salinois fold complex system. With 6 entrances, from different caves or shafts, it's possible for speleologists to observe the karst system. The thrusting of the Liassic and Jurassien can be observed all long the cave network, in "gouffre du Jérusalem" in the upper part, in "Baume des Crêtes",

conditionnées par ces structurations. Les organisations des réseaux spéléologiques, des systèmes karstiques ainsi que les fonctionnements actuels des aquifères sont issus des évolutions des contextes glaciaires du Pléistocène puis des environnements de l'Holocène.

Le réseau spéléologique du Verneau qui se développe dans le faisceau salinois, en bordure du premier plateau, développe plus de 30 km de galeries. Avec ses six entrées, issues des processus d'érosion récents des versants et du plateau de Levier, il s'inscrit complètement dans les dynamiques d'évolution du karst à partir des structures tectoniques, au cours du Quaternaire. Les mécanismes de chevauchement de séries du Lias et du Jurassien sont bien visibles dans plusieurs branches du réseau avec des plis dysharmoniques (les charnières) dans le gouffre du Jérusalem à l'amont, de la Baume des Crêtes, des Biefs-Boussets ou à grotte Baudin, à l'aval [Aucant et al., 1985]. Le réseau du Verneau, affluent du Lison, comme beaucoup d'autres systèmes spéléologiques de la zone des plateaux, ne comporte pas de zone noyée profonde. Son bassin d'alimentation est installé dans des terrains marneux qui affleurent au sein de petits bassins de quelques km² [Bichet et Campy, 2009]. Les zones de pertes au contact des calcaires assurent une infiltration rapide dans le système de

“Biefs-Boussets” or “grotte Baudin”, in the lower part of the system [Aucant *et al.*, 1985]. This is a binary perched system. A large part of the catchment is located in marly level. During flood events, the run off increase intensely in a few hours with a ratio of 1 to 1000. The spring is in a typical pocket valley closed to the Lison river [Bichet *et al.*, 2009].

B. Karst structure and ghost rocks

During Eocene period, many intensive weathering episodes occurred. The northern part of the Jura was covered by important layers of red clay, the “siderolithic formation” [Stelhin, 1909, Schmidt-Kittler, 1987, Picot, 2002]. In the inner part, along the Doubs Valley, extensive tectonic phases during Oligocene period and the tectonic ramps [Bitterli, 1990, Valley *et al.*, 2004], will allow weathering conditions from upwelling of mineralized fluids from hypogenic loops along the ramps and the deep fault systems. These contexts generate supergene processes in a context of pseudo endokarst in the northern part [Bruxelles 2002, Quinif, 2010] and weathering from hypogenic interaction in the inner part. The installation of gravific conditions contribute to the removal of the weathering sediment out of the karst with specific cave and karst morphologies of these areas of the Jura massif (Fig.7) [Cailhol *et al.*, 2012, Cailhol, 2017].

Conclusion

The typical landscapes of Causses and Jura Plateaus have had a major impact to understand what karstification is, and which processes are involved to form such landforms or environments. The inhabitants of these areas have known how to develop life style adapted to the karst resources.

These two karst plateaus have a similar long-term evolution, despite different paleo environment. Tectonic had a major impact with the collapse basins in their sur-

drainage, majoritairement en écoulement libre dans des galeries interconnectées de la zone épinoyée. La résurgence du système se fait au fond d'une petite reculée située dans la terminaison du faisceau salinois, au niveau des marnes.

B. La structuration du karst à partir de phénomènes de fantômisations

À l'instar des Grands Causses, le massif du Jura et plus particulièrement sa partie nord, a été soumis à des phases intenses d'altération qui ont laissé des niveaux parfois importants de couvertures argileuses très rouges, le « siderolithique » des anciennes dénominations géologiques. D'importants profils latéritiques se sont mis en place à l'Éocène à partir des matériaux issus de l'érosion et des premières étapes de karstification amorcées depuis l'émergence des carbonates au Jurassique [Stelhin, 1909 ; Schmidt-Kittler, 1987 ; Picot, 2002]. Ces profils montrent des matériaux argilo-sableux et ferrugineux d'épaisseur importante en recouvrement sur les niveaux calcaires du Jurassique supérieur. Dans la partie centrale, le long du Doubs à la frontière franco-suisse, ce sont les épisodes de distension qui surviennent à l'Oligocène et au Langhien [Bitterli, 1990 ; Valley *et al.*, 2004] qui vont permettre des conditions d'altération à partir de remontées de fluides minéralisés issus des boucles hypogènes au sein des systèmes de rampes. Ces processus issus d'altération supergène ou hypogène [Bruxelles, 2002 ; Quinif, 2010] vont contribuer à l'installation d'un karst gravifique et à l'évacuation de tout ou partie des altérites, à l'origine de la mise en place de cavités et des paysages de surface de ces secteurs du massif jurassien (figure 7) [Cailhol *et al.*, 2012 ; Cailhol, 2017].

Conclusion

Les plateaux des Causses et du Jura, avec leurs paysages caractéristiques, ont largement contribué à la compréhension des processus en jeu dans la karstification et à définir les morphologies et les environnements qui en découlent. Les sociétés humaines ont développé des modes de vie adaptés à ces caractéristiques avec des usages appropriés des ressources et des territoires.

Ces deux ensembles de plateaux calcaires présentent des modalités d'évolutions karstiques similaires malgré des contextes environnementaux bien différents. Dans ces processus, la tectonique tient une place importante avec la

Figure 7 : Landscape of the Doubs valley in the defile of Entre Roche in Morteau. The ghosting corridors have structured the installation of karstic system in the valley with numerous cavities and the orientation of the Doubs course.

Paysage de la vallée du Doubs dans le défilé d'Entre Roche à Morteau. Les corridors de fantômisations ont structuré l'installation de système karstique dans la vallée avec de nombreuses cavités et l'orientation du cours du Doubs. Photos Didier Cailhol.



roundings and the impact of Massif Central uplifting for the Causses Plateau or the Alpine orogeny for the Jura. It installed the conditions for a deep karstification that then evolves with interconnection to other epigenic karst systems. Ghost-rock karstification is an important karst process in both regions at the origin of cave systems or to structure valleys or gorges. It gives similar relief well expressed in the landscapes of the two plateaus.

These surface or underground landscapes are the result of the interactions between geological and environmental phenomena. They are important Geo-heritages and the witnesses of the adaptations of Human societies to the karst. It is also landmarks for the Earth sciences epistemology.

mise en place de bassins d'effondrement à leurs périphéries, de rehaussement du Massif central pour les Causses ou de la surrection alpine pour le Jura. Les structures qui en découlent vont alors installer les conditions d'une karstification en profondeur qui au fil des évolutions vont être interconnectées avec des systèmes épigés. Il faut également noter l'importance des processus comme la fantômisiation dans la mise en place de réseaux spéléologiques ou dans la structuration de gorges ou de vallées. Il en résulte également des morphologies de surface particulières qui se retrouvent dans les paysages de ces deux plateaux.

Leurs paysages de surface ou souterrain sont des témoins éloquentes de ces évolutions et des interactions des phénomènes géologiques et environnementaux. En cela, ils constituent des géo patrimoines remarquables et des jalons de l'histoire des sociétés humaines et des repères indispensables pour l'épistémologie des sciences de la Terre.

Bibliography / Bibliographie

- AMBERT P., 1994** - *L'évolution du Languedoc Central depuis le Néogène (Grands Causses méridionaux, piémont languedocien)* – Document n° 232 du BRGM, Orléans, 210 p. + 3 cartes géomorphologiques en couleur H.T.
- AMBERT M. et AMBERT P., 1995** - Karstification des plateaux et encaissement des vallées au cours du Néogène et du Quaternaire dans les Grands Causses méridionaux (Larzac, Blandas). *Géologie de la France*, n° 4, 1995, p. 37-50.
- AUCANT Y., SCHMITT C. et URLACHER J.-P., 1985** - *Spéléologie en Franche-Comté. Le Verneau souterrain* - SHAG.
- BAULIG H., 1928** - *Le Plateau Central de la France et sa bordure méditerranéenne, Étude morphologique*, Paris, 592 p.
- BICHET V. et CAMPY M., 2009** - *Montagnes du Jura, géologie et paysages*, 2nd édition. Néo Editions. (hal-00483267).
- BITTERLI T., 1990** - The kinematic evolution of a classical Jura fold: a reinterpretation based on 3 dimensional balancing techniques (Weissenstein Anticline, Jura Mountains, Switzerland); *Ecol. Geol. Helvet.*, 83, p. 493-511.
- BRUXELLES L., 2001** - *Dépôts et altérites des plateaux du Larzac central : causses de l'Hospitalet et de Campestre (Aveyron, Gard, Hérault). Évolution morphogénique, conséquences géologiques et implications pour l'aménagement*, Thèse 3^e cycle, Université de Provence, Aix-en-Provence, 266 p. + 5 cartes couleur.
- BRUXELLES L., 2002** - Dépôts et formations superficielles du Larzac central : Rôle morphologique et intérêt pour la reconstitution des paléo-paysages. *Karstologia*, n°38, p. 15-28.
- BRUXELLES L., TRONCHETTI G., AMBERT P. et GUENDON J.-L., 1999** - Les affleurements de Crétacé supérieur sur les Grands Causses méridionaux (France). *Comptes-rendus de l'Académie des Sciences*, t. 329, n°10. – p. 705-712, Paris.
- BRUXELLES L. et BRUXELLES S., 2002** - La chasse aux fantômes dans les Grands Causses. Utilisation d'un nouveau concept de spéléogénèse dans la recherche de cavités, *Spelunca*, n°88, 2003, p. 14-20.
- CAILHOL D., 2017** - Observations sur les processus d'altération et leur influence dans la structuration locale du karst et des aquifères. *Karstologia* n° 69, p. 19-28.
- CAILHOL D. et MEURY P. X., 2012** - Processus de fantômisiation dans les calcaires du Jurassique supérieur du Jura tabulaire. *Karstologia* n° 59, p. 13-18.
- CAMUS H., 2003** - *Creusement des vallées et des réseaux karstiques sur la bordure sud cévenole; relation avec la tectonique, le volcanisme et les paléoclimats*. Thèse, Université Bordeaux III, 688 p. + annexes.
- CORBEL J., 1954** - Les phénomènes karstiques dans les Grands Causses. *Rév. Géogr. Lyon*, XXCX, 4, p. 387-315.
- CUPILLARD C., MAGNY M., BOCHERENS H., BRIDAULT A., BÉGEOT C. et al., 2015** - Changes in ecosystems, climate and societies in the Jura Mountains between 40 and 8 ka cal BP. *Quaternary International*, Elsevier, 2015, Volume 378 (18 August 2015), p. 40-72.
- COULET E., 1962** - Morphologie des Grands Causses. *Bull. Soc. Lang. Géog.*, t. 33, 1-2, p. 1-62.
- DUBOIS P., 1985** - Notes karstologiques sur les Grands Causses. – *Bulletin de la Société Languedocienne de Géographie*, t. 19, fasc. 3-4, p. 197-226.
- JOANNE A., 1881** - *Géographie du département de la Lozère*, éd Hachette, 72 p.
- LAS CASES E. de, 1880** - *Ephémérides*, rééd. Presse du Languedoc, 1992, 282 p.
- MALCLES O., 2021** - *Analyse des mouvements verticaux récents associés aux reliefs cévenols : Implications en termes de dynamique des déformations en domaine intraplaque*. Université de Montpellier.
- MALCLES O., VERNANT P., CHERY J., RITZ J.-F., CAZES G. et FINK D., 2020** - Burial ages, ghost-rocks and karst network structure. Insights from the Vis canyon (Southern France). *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, Groupe français de géomorphologie (GFG), 2020, 26 (4), pp.255-264.
- MALOT H., 1878** - *Sans famille*, Edouard Dentu Ed., Paris.
- MARRES P., 1935** - *Les Grands Causses, étude de Géographie Physique*, Thèse d'Etat, Tours, 213 p.
- MARTEL E. A., 1936** - *Les Causses Majeurs*, Millau, Editions Artières, Millau, 520 p.
- MARTEL E. A., 1883** - Le cañon du Tarn. In : *Annuaire du Club Alpin Français*, p. 242-261.
- MARTEL E. A., 1885** - Le Causse Noir et Montpellier-le-Vieux. In : *Annuaire du Club Alpin Français*, p. 305-320.
- MARTONNE E. de, FAYEL P. et TEISSIER M., 1926** - *Cévennes et Causses*, Paris, 31 p.
- PICOT L., 2002** - *Le Paléogène des synclinaux du Jura et de la bordure sud-rhénane : paléontologie (Ostracodes), paléocologie, biostratigraphie et paléogéographie*, GeoFocus 5, 240 p.
- QUINIF Y., 1999** - Fantômisiation, cryptoaltération et altération sur roche nue, le triptyque de la karstification. *Actes du colloque européen Karst-99*, p. 159-164.
- QUINIF Y., 2010** - *Fantômes de roche et fantômisiation – Essai sur un nouveau paradigme en karstogénèse*. Karstologia Mémoires, 18, 196 p.
- 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
- QUINIF Y. et MAIRE R., 2009** - La Grotte Quentin (Hainaut, Belgique) : un modèle d'évolution des fantômes de roche. *Karstologia Mémoires*, 17, pp. 214-218.
- SARTEGOU A., MIALON A., THOMAS S., GIORDANI A., LACOUR Q., JACQUET A., ANDRE D., CALMELS L., BOURLES D., BRUXELLES L., BRAUCHER R., LEANNI L. et ASTER T., 2018** - When TCN meet high school students: deciphering western Cévennes landscape evolution (Lozère, France) using TCN on karstic networks. *4th Nordic Workshop on Cosmogenic Nuclides*, Jun 2018, Geiranger, Norway. hal-01925926.
- SCHMIDT-KITTLER N. (éd.), 1987** - *International Symposium on Mammalian biostratigraphy and Paleocology of the European Paleogene*, Mainz, February, 18th-21st 1987. Münchn. Geowiss Abh., A, vol. 10, 312 p.
- SOMMARUGA A., MOSAR J., SCHORI M. and GRUBER M., 2017** - The Role of the Triassic Evaporites underneath the North Alpine Foreland. In: Soto, J.I., Flinch, J., Tari, G. (Eds.), *Permo-Triassic Salt Provinces of Europe, North Africa and the Atlantic Margins*. Elsevier, pp. 447-466. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-809417-4.00021-5>.
- STEHLIN H.G., 1909** - Remarques sur les faunules de mammifères de couches éocènes et oligocènes du bassin de Paris. *Bull. Soc. géol. France*, 9, 4, p. 488-520
- VALLEY B., BURKHARD M., SCHNEGG P.-A., 2004** - Dépliage 3-D des anticlinaux bordant le synclinal fermé de la vallée des Ponts, Jura central, Suisse. *Ecol. Geol. Helvet.*, 97, pp : 279-291.