

Les indicateurs du milieu enregistrés dans les karsts subtropicaux de Chine

Relations avec l'évolution géomorphologique et les paléoenvironnements

Richard Maire ¹ et Nathalie Vanara ²

Résumé : Dans les karsts subtropicaux de Chine, les altérites, les dépressions et les grottes ont enregistré certains paramètres de l'évolution de l'environnement. Il est possible de présenter un référentiel provisoire d'indicateurs karstiques valables pour le milieu naturel sans l'homme et avec l'homme. Les indicateurs génériques désignent les familles d'indicateurs présents à l'extérieur et à l'intérieur du karst : morphologiques, hydrologiques, chimiques, biologiques, sédimentaires, anthropiques. Ces indicateurs peuvent être instantanés (débit, chimie de l'eau) ou non instantanés. Les indicateurs morphologiques et sédimentaires externes permettent d'apprécier la vitesse d'érosion et/ou de sédimentation. Les indicateurs internes (spéléothèmes, rythmites) enregistrent les signaux périodiques, voire instantanés, de l'évolution du milieu, mais également les indices d'occupation humaine. Les indicateurs spécialisés (ou haute résolution) sont plus précis ; c'est le cas d'une laminite fluorescente de stalagmite attestant la présence de matière organique en liaison avec l'activité biopédologique de saison chaude. C'est le cas aussi des microlamines enregistrant les épisodes pluvieux intra-annuels. Dans les karsts de Chine, les séquences de remplissage détritique et les spéléothèmes ont ainsi enregistré les changements climatiques, l'incidence de la mousson et le rôle de l'homme dans la déstabilisation des terroirs (déforestation). Les indicateurs sismo-tectoniques regroupent tous les effets instantanés ou décalés dans le temps liés aux ruptures de contraintes tectoniques : tremblements de terre ou bien cisaillements au contact ou au voisinage des vides karstiques par relaxation des contraintes. Ces indices vont des sismites instantanés (spéléothèmes brisés, rythmites liquéfiés) aux figures de tension (cisaillement) et d'éclatement de la roche et des concrétions qui sont la manifestation d'effets progressifs et/ou retardés. L'analyse des signaux environnementaux a pour

but de caractériser les processus périodiques, les discontinuités et les processus d'accélération. En étudiant les archives du passé à basse et haute résolution, on constate des lois générales, en particulier les effets de la non linéarité de la flèche du temps. Quand un seuil est franchi, il y a accélération, puis décélération, avec périodicité ou pseudo-périodicité. Cet aspect, valable pour les processus naturels, l'est aussi pour les sociétés humaines et les impacts homme / milieu. L'analyse de ces indicateurs permet donc de mieux comprendre les processus en cours à l'interface Nature / Sociétés, et de départager l'impact des paramètres locaux et globaux. Le concept de forçage doit être retenu quand des facteurs globaux deviennent dominants et transcendent les influences locales, cas des changements climatiques en grande partie d'origine astronomique, mais phénomène valable pour les sociétés dans le cas de la pression démographique, des guerres, de la mondialisation.

Mots-clés : indicateur, spéléothème, remplissage, sismite, paléoenvironnement, paléoclimat, karst subtropical, Chine.

Abstract: *The environment indicators recorded in the subtropical karsts of China. Relations with the geomorphological evolution and the paleoenvironments.*

In the subtropical karsts of China, alterites, depressions and caves have recorded some parameters of the environment evolution. It is possible to present a list of valid karstic indicators for the natural environment without and with the man's impact. The generic indicators outside and inside the karst are morphological, hydrological, chemical, biologic, sedimentary and anthropogenic. These indicators can be instantaneous for floods and volcanic eruptions. The external morphological and sedimentary indicators allow to calculate the sedimentation and the erosion speed. The internal

1. ADES-Dymset, UMR 5185 et GDR 440 du CNRS, Université de Bordeaux 3. <rmaire@ades.cnrs.fr>

2. Institut de Géographie, Université de Paris 1 et ADES-Dymset, UMR 5185 ; GDR 440 du CNRS, Université de Bordeaux 3. <nathalie.vanara@free.fr>

indicators (speleothems, rhythmites) record the periodic and immediate signals, the evolution of the environment, but also the indications of human activities. Specialized indicators (high resolution) are more precise. It is the case of a fluorescent laminite of stalagmite giving evidence of the presence of organic matter in connexion with the biopedological activity of warm season. It is the case also for microlaminae recording the intra-annual rainy episodes. In the karsts of China, the detrital sequences and the speleothems recorded climatic changes, incidence of the monsoon and part of the man in the destabilization of soils (deforestation). The sismo-tectonic indicators include together all the immediate and delayed effects connected with tectonic stress: earthquakes, shearing in the contact or in the neighbourhood of the galleries by strain release. These indicators are sismites (broken speleothems, liquefied sediments), wall and speleothems shearing which are the demonstration of instantaneous or delayed effects. The analysis of the environmental signals aims

characterizing the periodic processes, the discontinuities and the processes of acceleration. By studying the past records in low and high resolution, we notice general laws, particularly the effects of the non linearity of time. When a line is crossed, there is speeding up of the process, then slowing down, with periodicity or pseudo-periodicity phenomena. This aspect is valid for the natural processes, for the human societies and also for the relations between man and environment. The analysis of these indicators thus allows to understand better the current processes in the Nature / Man interface, and to decide between the impact of the local and global parameters. The concept of forcing must be chosen when global factors become dominant and transcend the local influences as the climatic changes in connexion with astronomical parameters, but this notion is valid for human societies in the case of demographic pressure, wars and globalization.

Key-words: indicator, speleothem, filling, sismite, paleoenvironment, paleoclimate, subtropical karst, China.

第十章 中国亚热带喀斯特记录的环境标志 ——与地貌演化和古环境的关系

中国亚热带喀斯特区,风化作用、封闭负地形及洞穴记录了一些环境演化的参数。有可能列出一个对具有或没有人类影响自然环境有效的喀斯特标志的目录。喀斯特内部和外部的标志是形态学的、水文学的、气候的、生物学的、沉积学的及人类起源与发展等方面。这些标志可以是象洪水及火山喷发那样短暂的。外表形态及沉积学标志允许计算沉积作用及侵蚀作用速度。内部标志(洞穴钙质沉积物、韵律)记录了环境演变周期的及密集的信息,也是人类活动的标志。特殊的标志(高分辨率)最为精确,这就是提供与温暖季节生物土壤活动有关的有机质存在证据的石笋荧光层。微层理也记录了年内的降水幕。中国喀斯特区的碎屑层序及洞穴钙质沉积物记录了气候变化、季风影响及土壤流失方面人类作用部分(滥伐森林)。地震—构造学标志包

括所有与构造应力相关的瞬时和滞后效应:地震、剪切或廊道区内应变解除。这些标志是地震的(断开的洞穴钙质沉积物、液化的沉积物)、岩壁及洞穴钙质沉积物的剪切,这均是瞬时或延迟效应的证据。环境信息分析的目标在于周期过程特征、不连续及加速过程。据低和高分辨记录的研究。我们注意到一般规律,特别是时间的非线性效应。当一条线呈横向时,则过程加速然后就减缓,具周期性或假周期现象。这一现象对自然过程、人类社会以及人类与环境关系均有效。这些标志的分析使我们更好地了解人与自然相互作用通常的过程,并判定局部影响还是全球参数。当全球因素成为支配并超越局部影响时,象与天文参数相关的气候变化那样,必须对概念作出选择,但其对人类社会在人口统计压力、战争与全球化方面是有效的。

Introduction

Protégé de l'érosion externe, le milieu karstique superficiel et souterrain enregistre la dynamique de l'environnement local et global par des signaux variés. La validité de la fonction de transfert entre le signal enregistré dans les sédiments et sa signification environnementale a été vérifiée expérimentalement pour les laminites saisonnières des stalagmites [Genty, 1993 ; Perrette, 2000] et les laminites de crues des dépôts détritiques [Quinif et Maire, 1998]. Ces études ont été effectuées essentiellement dans les karsts du domaine tempéré, notamment pour les concrétions souterraines (ou spéléothèmes) qui constituent un outil performant pour les études paléoclimatiques [Quinif, Genty, et Maire, 1994]. Mais la distribution des milieux karstiques dans tous les domaines climatiques et anthropiques permet désormais de comparer l'enregistrement des différents paramètres du milieu dans l'espace et dans le temps.

Les régions tropicales constituent un domaine géographique immense dans lequel les zones karstiques sont très développées avec comme exemple phare, les karsts de Chine du Sud-Ouest, les plus vastes du monde. La problématique soulevée par le domaine intertropical est du plus haut intérêt sur un plan environnemental et paléoclimatique car il renferme, malgré une apparente monotonie climatique, une très grande variété de milieux. Dans le domaine tropical à saisons contrastées, illustré par le climat de mousson de la Chine du Sud, du Sud-Ouest et du Centre, la périodicité des signaux saisonniers est bien enregistrée dans les sédiments des grottes. Cette périodicité peut être soulignée, voire perturbée par des facteurs climato-anthropiques comme la déforestation et l'érosion des sols.

Dans les régions tropicales, la montagne induit un renforcement des paramètres "tempérés" dans le sens vertical. Les saisons thermiques sont échelonnées du bas vers le haut, de la forêt ombrophile aux glaciers, en passant par la forêt nuageuse et les prairies alpines. Dans ces milieux montagnards, parfaitement illustrés par l'étagement des karsts du Yunnan-Guizhou entre 500 et 5 000 m, l'intérêt du décryptage des archives karstiques est de comparer l'intensité du signal. Cette comparaison peut se faire par exemple dans le cas :

- des changements climatiques globaux, passage du stade isotopique 2 au stade 1 holocène ;
- des fluctuations climatiques intra-holocènes ;
- des impacts anthropiques anciens (feux) ou catastrophiques plus récents (déforestation massive).

Facteur de diversification dans un espace restreint, la montagne tropicale démultiplie les exemples, d'où son intérêt. En l'état actuel des connaissances dans le Yunnan-Guizhou, nous donnons surtout des exemples choisis dans les karsts de moyenne altitude compris entre 1 000 et 2 000 m.

I. Mémoire karstique et référentiels d'indicateurs d'évolution du milieu

La mémoire karstique constitue une "boîte noire" qui a enregistré certains paramètres de l'évolution de l'environnement à l'abri de l'érosion externe. Les résultats obtenus dans les karsts tempérés et tropicaux permettent aujourd'hui de présenter un référentiel provisoire d'indicateurs karstiques valables pour le milieu naturel sans l'homme et avec l'homme. Le milieu naturel ou faiblement anthropisé présente des indicateurs génériques et spécialisés.

A. Les types d'indicateurs

- **Indicateurs génériques.** Les indicateurs génériques désignent les familles, sous-familles et genres d'indicateurs présents à l'extérieur et à l'intérieur du karst : morphologiques, hydrologiques, chimiques, biologiques, sédimentaires, anthropiques. Ces indicateurs peuvent être instantanés (débit, chimie de l'eau) ou non instantanés. Parmi les sous-familles d'indicateurs, on discerne des indicateurs morphologiques et sédimentaires externes qui permettent d'apprécier la vitesse d'érosion et/ou de sédimentation et des indicateurs internes qui enregistrent les signaux périodiques, voire instantanés, de l'évolution du milieu, mais également les indices d'occupations humaines. Parmi les genres, citons les spéléothèmes et les rythmites détritiques.

- **Indicateurs spécialisés.** Les indicateurs spécialisés désignent une espèce ou une variété d'indicateurs. Par exemple, une laminite fluorescente de stalagmite indique la présence de matière organique en liaison avec l'activité biopédologique de saison chaude, permettant ainsi de mettre en évidence des lamines invisibles au microscope optique [Perrette, 2000]. Le but est de préciser et de valider la gamme des indicateurs afin d'apporter des informations précises sur l'ancien fonctionnement des milieux. Cette étape est indispensable pour comparer les héritages avec les processus actuels qui interfèrent avec les activités humaines.

- **Signification des indicateurs.** Les indicateurs sédimentaires internes et périodiques sont les plus remarquables pour le fonctionnement naturel car ils ont enregistré les signaux saisonniers, annuels et les cycles. Ils peuvent contenir des indices de phénomènes instantanés ou rapides, comme des micro-charbons de bois (incendies), des tephra (éruption volcanique). Les grottes tropicales, moins étudiées que celles du domaine tempéré, offrent un potentiel important de découvertes sur l'utilisation humaine des grottes : sépultures, habitats, grottes-forteresses, barrages souterrains, exploitations de nitrate, de gypse, de nids d'hirondelle. En Chine,

Indicateurs génériques	Indicateurs spécialisés	Signification environnementale
Indicateurs morphologiques externes	Forêts de pierre (shilin), pinnacles Dents de pierre (shiya)	Erosion naturelle, crise tectonique et/ou climatique Erosion climato-anthropique
Indicateurs biologiques externes	Touffes racinaires	Erosion climato-anthropique
Indicateurs sédimentaires lacustres externes	Rythmites de poljés Niveaux de charbons de bois	Erosion naturelle et/ou anthropique Brûlis anthropiques
Indicateurs morphologiques internes	Vagues d'érosion	Creusement en régime noyé
Indicateurs sédimentaires internes : - rythmites - spéléothèmes	Laminites périodiques (fausses varves) Laminites périodiques, doublets	Enregistrement saisonnier et annuel avec laminites de crue de mousson Enregistrement saisonnier et annuel
Indicateurs instantanés internes	Sismothèmes (spéléothèmes cisailés) Sismites (figures de liquéfaction)	Séismes et mouvements tectoniques Séismes
Indicateurs internes de processus rapides	Niveaux de tephra Niveaux de cendres	Eruption volcanique Incendies, brûlis
Indicateurs internes d'occupation humaine et animale	Traces de pas + charbons de bois Ossements humains et animaux Peintures rupestres....	Incursion humaine profonde (torche) Sépultures, abris.. mouvements de population, changement climatique
Indicateurs microbiologiques internes	Spéléothèmes algaires orientés Microchampignons calcifiés Ferro-bactéries, mangano- bactéries...	Rôle de la lumière Réchauffement climatique Réchauffement, paléokarst

Tableau 15 : Principaux indicateurs génériques et spécialisés étudiés dans le milieu karstique tropical avec leur signification environnementale.

Main generic and specialized indicators studied in the tropical karst environment (environmental meaning).

Photo 374 : Galerie d'entrée de la grotte de Dadong (hauteur 90 m) dans l'Ordovicien inférieur (district de Wufeng, Hubei).



Entrance gallery (90 m high) of Dadong is formed in lower Ordovician (Wufeng County, Hubei).

Photo R. Maire 1992

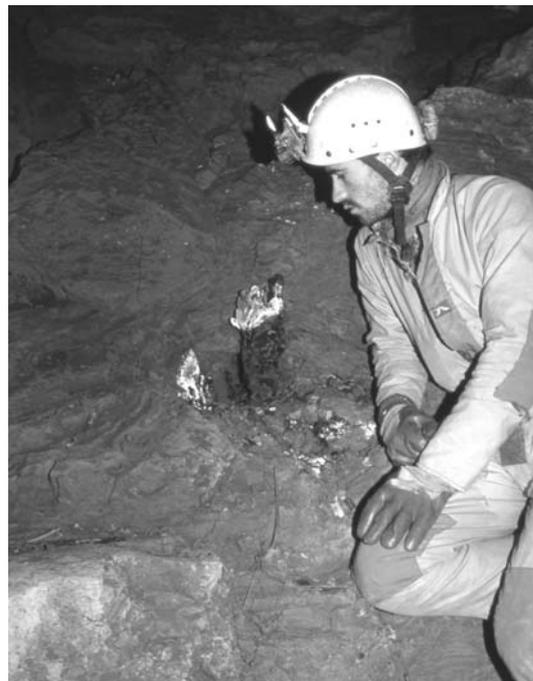


Photo 375 : Tronc daté (C^{14}) à 18 590 ans BP \pm 160, base de la séquence de Dadong (Wufeng, Hubei). Analyse : laboratoire radiocarbone, Lyon.

Trunk at the bottom of Dadong sequence, C^{14} dating = 18 590 yr BP \pm 160 (Wufeng County, Hubei).

Analyse: Radiocarbone laboratory, Lyon.

Photo R. Maire 1992

les indicateurs anthropogènes anciens sont représentés par des traces de pas, des ossements, certains charbons de bois (torches en bambou). Ils témoignent d'une occupation temporaire, d'une visite (parfois très loin de l'entrée), d'une sépulture, voire d'un abri, d'un habitat. Les peintures rupestres, actuellement inconnues dans les grottes de Chine, constituent des indices précieux sur les mouvements de population.

En Chine du Sud-Ouest, les peintures rupestres sont uniquement connus sur des pans de paroi, notamment dans le Yunnan (district de Cangyuan près de Myanmar), le Guangxi et dans deux sites du Guizhou (Panjiang et Danzhai) [Chen Zhao-fu, 1988]. Elles sont datées de 2 000 à 3 000 ans environ et sont donc plus récentes que celles de la culture néolithique Yangshao datées de 6 000 ans. Ces indicateurs naturels et anthropiques peuvent être corrélés avec l'évolution récente des terroirs et les processus de déstabilisation liés à des forçages socio-économiques : guerres, déforestation, érosion des sols, surpopulation.

B. Les séries détritiques souterraines

En zone tropicale à saisons contrastées, les séries détritiques souterraines sont d'un grand intérêt car elles ont enregistré le fonctionnement hydroclimatique et pédoclimatique, mais également les impacts anthropiques pour les dépôts actuels, holocènes, voire un peu plus anciens.

L'exemple de la grotte de Dadong est l'un des plus remarquables connus actuellement avec une série souterraine épaisse de 25-40 m sur une longueur de 150 m. Elle a été découverte pour la première fois lors de l'expédition spéléologique franco-chinoise de 1989 [Maire, 1991]. Un calage chronologique et une première étude micromorphologique des fausses varves a été effectuée après l'expédition de 1992-93 [Pomel et Maire, 1995 et 1997].

1. Apport de la micromorphologie des sols

Cette discipline est née réellement en 1938 avec la publication de l'ouvrage de Kubiena intitulé *Micropedology*, puis elle est devenue dans la deuxième moitié du XX^{ème} siècle une nouvelle branche de la science des sols [Bullock P, Fedoroff N., *et al.*, 1985]. De nouveaux concepts ont été développés comme ceux de fabrique (*fabric*), de distribution entre plasma et squelette (*related distribution pattern*), de revêtements ou cutanes (*coatings*).

La description des traits micromorphologiques a pour but d'expliquer les processus de la pédogenèse, de la sédimentogenèse et de l'altérogenèse. Ces concepts de la micropédologie,

à la fois descriptifs et génétiques, commencent à être utilisés dans l'étude des remplissages souterrains détritiques pour la connaissance des paléoenvironnements, mais il est nécessaire de les adapter à la problématique des cavités karstiques et surtout à leur spécificité souterraine.

La micromorphologie spéléo-karstique repose au départ sur les concepts de la géomorphologie et l'analyse des arrangements spatiaux à différentes échelles. La micromorphologie va donc plus loin que l'analyse micropédrographique traditionnelle. L'apport du traitement d'images permet de quantifier certains paramètres comme la porosité, la granulométrie, le comptage de lamines.

2. Enseignements apportés par la coupe de Dadong

La grotte de Dadong se situe dans le district de Wufeng, dans la partie ouest de la province du Hubei. Avec 11 km de développement et plusieurs salles géantes, c'est l'une des cavités karstiques les plus volumineuses de Chine. Placé à l'extrémité aval d'un grand canyon aveugle de 300 m de profondeur, le porche d'entrée, haut de 100 m, constitue la perte d'un torrent à écoulement temporaire qui draine un large bassin karstique. En hautes eaux (mousson d'été), la cavité peut absorber des débits de plusieurs dizaines de m³/s. Il existe donc un transfert direct des eaux turbides, provenant de l'érosion des sols. Cette turbidité reflète l'état de l'environnement pédoclimatique, bioclimatique et éventuellement anthropique.

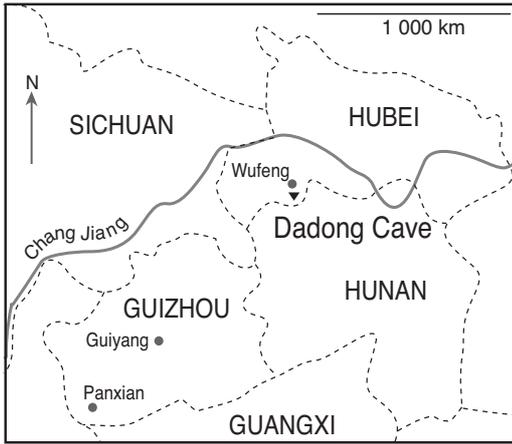
- **Lithostratigraphie.** La coupe de Dadong, située dans la salle des Varves Marrons, est une grande séquence sédimentaire de 25 à 40 m d'épaisseur et 150 m de long. De bas en haut, on distingue :
- une séquence détritique grossière de base à galets et graviers de plus de 5 m de puissance ;
- une petite séquence argilo-limoneuse de base à lamines gris-orange de 2 à 3 m ;
- une séquence principale argilo-limoneuse rythmée de teinte marron haute de 25 m.

L'ensemble du dépôt a été raviné par le torrent. Un bois fossilisé à la base de la coupe, dans la séquence argilo-limoneuse à lamines gris-orange, a été daté à 18 590 ± 160 BP (datation ¹⁴C, J. Evin, Laboratoire de radiocarbone Lyon). Ce calage permet de placer l'essentiel de la coupe à la fin du stade isotopique 2, entre 19 000 et 13 000 ans environ.

- **Enregistrement des crues de mousson.** Un photogramme de lame mince, sur un échantillon examiné situé au sommet de la coupe (DAD 514-6), permet dans un premier temps de visualiser la variabilité de l'épaisseur des doublets lamine claire / lamine sombre (40 à 1 000 µm en général) et leur distribution (régulière, irrégulière ou par paquets). Il permet aussi de compter les lamines de manière directe et de comparer avec le profil de ligne en niveaux de gris (logiciel Optilab) (figure 161).

Figure 160 : Enregistrement des paléomoussons datées de la fin du stade isotopique 2 dans la grotte de Dadong (district de Wufeng, Hubei).

Paleomonsoons recorded in Dadong cave, end of isotopic stage 2 (Wufeng County, Hubei).



Localisation de la grotte de Dadong.

Location of Dadong cave.



Photo A : Base de la coupe, fausses varves gris-oranges contenant du bois fossilisé daté à 18 590 +/-160 BP.

Trunk dated by C14 (18 590 yr +/-160 BP), bottom of the loam deposit.

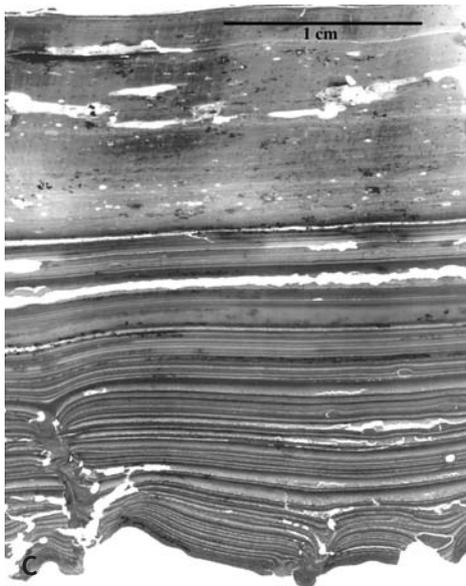
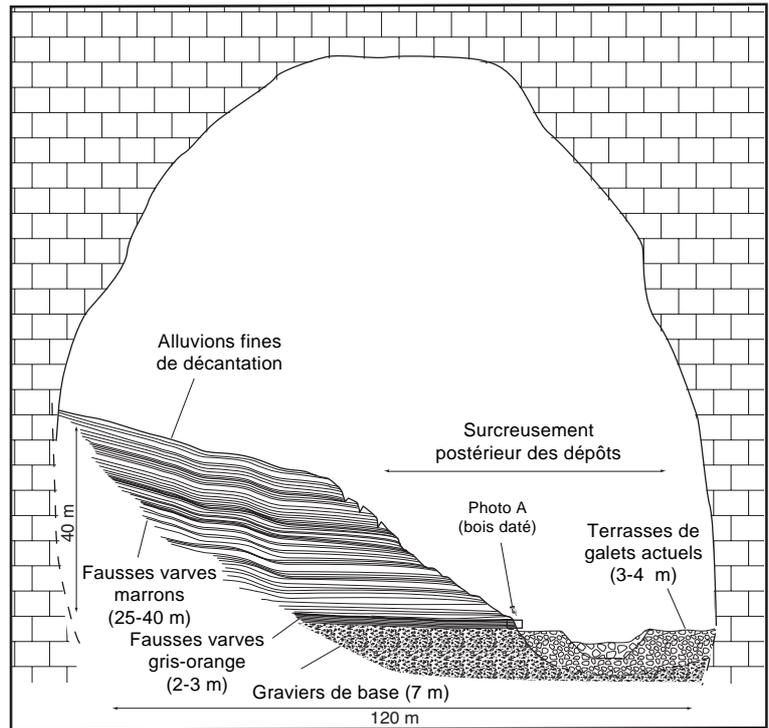


Photo C : Photogramme d'une lame mince montrant la base de la séquence des fausses varves de crue.

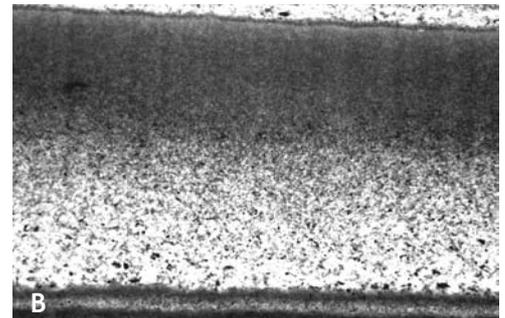
Thin section showing the bottom of the Dadong sequence.



Coupe des fausses varves marrons de Dadong

Section of "pseudo brown varves" deposit in Dadong cave (Wufeng).

Photo B : Doublet lamine claire - lamine sombre correspondant à une séquence de crue, avec granulométrie décroissante se terminant par une microséquence d'assèchement d'argiles (x 100, h = 700 µm).



Doublet with clear and dark laminae (flood sequence) (x 100, height = 700 µm).

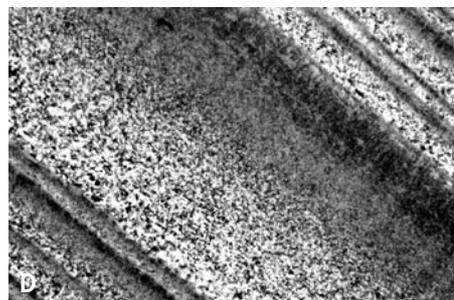
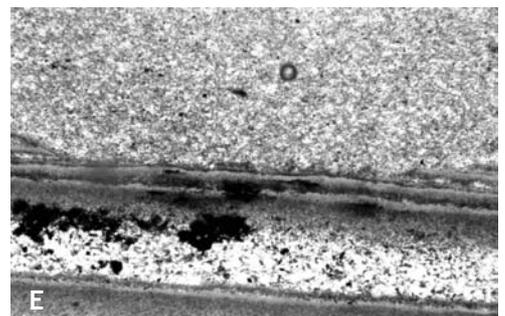


Photo D : Séquence de crue principale (h = 700 µm) limitée par des microséquences de crues (50-100 µm) (x 100, LPA).

Flood sequence, 700 µm thick, bordered by flood microsequences (50-100 µm) (x 100, LPA).

Photo E : Surface d'érosion à la base d'une séquence de crue (x 100, LPNA, h = 200 µm).

Erosional surface at the bottom of a flood sequence (x 100, LPNA, h = 200 µm).



Seule une analyse comparée, avec un examen micromorphologique à plus fort grossissement, peut permettre d'éliminer les artefacts (bruits de fond du diagramme) et d'identifier avec certitude les microdoublets.

La détermination des séquences annuelles n'est pas évidente, mais on peut voir apparaître, à l'échelle d'une lame mince, plusieurs types de rythmicité :

- une rythmicité primaire marquée par la succession des doublets ;
- une rythmicité secondaire marquée par une périodicité de paquets à petits doublets et de paquets à gros doublets ;
- une rythmicité tertiaire marquée par des lamines argilo-limoneuses très épaisses, plurimillimétriques.

Chaque doublet ou couple de lamine claire / lamine sombre forme une microséquence d'assèchement, à granulométrie décroissante, avec de bas en haut :

- une lamine claire (orange) à particules grossières (limons moyens et grossiers, 10-40 μm) constituée surtout de quartz et de grains pédologiques ;
- une lamine sombre (rouge sombre), en continuité avec la précédente, formée par des argiles rouges ferrugineuses.

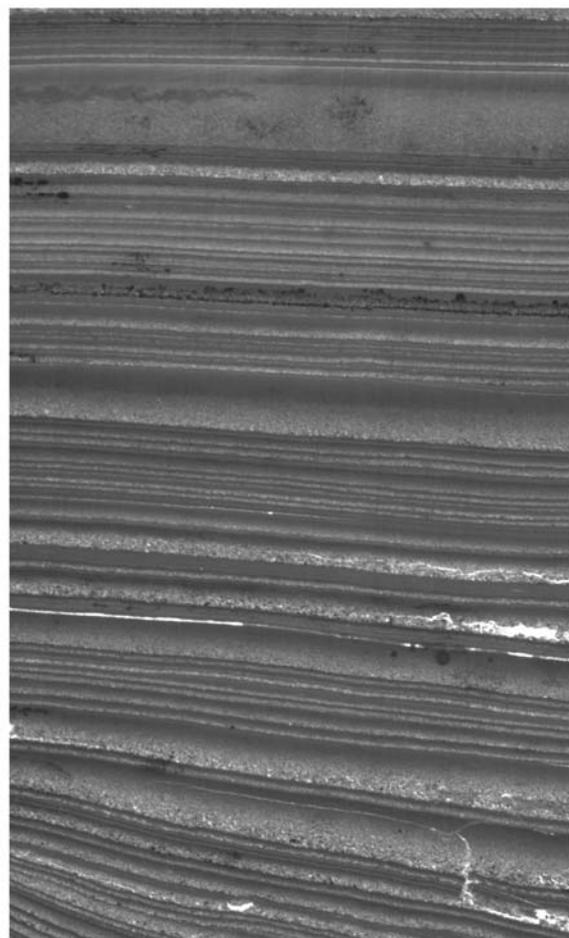
Chaque doublet enregistre donc la sédimentation des particules détritiques fines (limons et argiles) en suspension dans un contexte lacustre souterrain suite à l'ennoiement de la salle par une crue. Les plus petits doublets limon/argile ont 25-30 μm d'épaisseur, les plus gros dépassent 1 mm.

- **Crues de paléomousson et saisonnalité.** La coupe de Dadong a enregistré le fonctionnement hydroclimatique dans une période de déstabilisation du milieu située à la fin du stade isotopique 2. Les sédiments rythmés de la base de la coupe (doublets gris et rouge) sont surtout constitués par une succession de carbonates et d'argile rouge. L'ensemble de la coupe est constitué par une puissante séquence de fausses varves de crue à doublets limon / argile brun-rouge avec une forte contribution en microdébris pédologiques (rhexistase). Il est encore difficile de discerner avec précision les séquences annuelles car chaque doublet est l'enregistrement d'une crue de mousson d'été. Or une année peut enregistrer de nombreuses crues sur plusieurs millimètres. La succession de gros doublets et d'une série de petits doublets est l'expression typique d'un ensemble de crues intra-annuelles.

- **Absence de filtrage.** En raison du transfert direct des particules dans l'endokarst par un très large conduit, ce dépôt lacustre souterrain joue le rôle de paléohydromètre avec un enregistrement en continu de milliers de crues, essentiellement d'été, car on se situe dans le domaine subtropical de mousson. Sur l'ensemble de la mégaséquence, on peut donc envisager une analyse quantitative et qualitative des crues : intensité-durée, périodicité à diff-



Diagramme de comptage des lamines des lamines (logiciel Optilab, niveaux de gris, profil de ligne).



rents pas de temps, période de retour des crues majeures, etc.

C. Les spéléothèmes : faciès et indicateurs

Les concrétionnements souterrains ont attiré depuis longtemps l'intérêt des spéléologues, puis des géologues et karstologues. Le faciès microrhythmé a été observé depuis longtemps et une correspondance a été faite avec la croissance des cernes des arbres, d'où la supposition d'une signification annuelle des lamines de croissance des spéléothèmes qui a été signalée par divers auteurs et prouvée expérimentalement au début des années 1990 [Baker *et al.*, 1993 ; Genty, 1993].

1. Micromorphologie des spéléothèmes

L'étude micromorphologique des spéléothèmes est donc très proche de l'étude micropétrographique traditionnelle [Mills, 1965]. Une stalagmite s'apparente à une roche calcitique. Par contre, la micromorphologie apporte un regard nouveau pour les problèmes d'altération, de microdissolution, de revêtements (cutanes), de distribution, etc. Au sein de l'immense famille des spéléothèmes, les spéléothèmes tropicaux constituent donc un champ

Figure 161 : Photogramme de lame mince montrant sur 13 mm une succession de fausses varves limoneuses claires et sombres. Chaque doublet lamine claire - lamine sombre indique une séquence (800 à 1000 μm) ou une microséquence (40 à 100 μm) de crue.

Thin section shows clear and dark loam laminae. Every doublet (clear lamina and dark lamina) indicates a sequence (800-1 000 μm) or a microsequence of flood (40-100 μm).

Tableau 16 : Exemple d'indicateurs génériques et spécialisés présents dans les spéléothèmes de Chine du Sud-Ouest.

Example of generic and specialized indicators in the speleothems of South-West China.

Indicateurs génériques	Indicateurs spécialisés	Signification environnementale	Signification climatique
laminites visibles	laminite poreuse épaisse laminite non poreuse fine	- -	saison chaude saison froide
laminites invisibles	laminite fluorescente laminite non fluorescente	matière organique pas de matière organique	saison chaude saison froide
diasthèmes surface d'érosion -dissolution	niveau de microdissolution -	solution pédologiques arrêt et érosion-dissolution	fluctuations saisonnières changement climatique
cycles de laminites	-	variation périodique	cycles solaires probables
cendres	cinérites microcharbons de bois	retombées volcaniques brûlis, incendies	- sécheresse possible
contaminations détritiques	particules sols, cendres	érosion des sols	fluctuations climatiques
cassures	cisaillement	séisme, tectonique mouvement gravitaire	-
cassures	microcisaillement	recristallisation + gonflement (aragonite en calcite)	changement du régime hydrique

d'étude d'un grand intérêt qui mérite d'être comparé avec les résultats nombreux obtenus sur les spéléothèmes des régions tempérées.

Rappelons que toute étude à haute résolution de remplissages karstiques doit être replacée obligatoirement dans son contexte local (la grotte) et régional (géologie, géomorphologie, climat). En ce sens la micromorphologie est un outil de plus dans l'étude morphologique, non destructive, à différentes échelles. Le spéléothème se situe ici à l'une des extrémités du système karstique. L'étude des concrétions actives du monde tropical permet, en plus de l'analyse des remplissages détritiques, de mieux connaître l'impact de l'homme, en particulier le rôle de la déforestation et de l'érosion des sols au cours du dernier siècle.

Ce phénomène est d'une ampleur considérable en Chine. C'est dire l'intérêt qu'il y a à comparer les séries rythmées souterraines, calcitiques et détritiques de Chine, afin de comparer le poids respectif des impacts climatiques et des impacts climato-anthropiques dans un milieu montagnard soumis au climat de mousson.

2. Enregistrement typique des paléomoussons par une stalagmite du Yunnan

Une stalagmite inactive du Yunnan a été prélevée dans la grotte de Qinhuadong située dans le bassin de Xiangyun, entre Dali et Kunming (chap. 6, p. 265). La concrétion, longue de 12 cm et large

de 8 cm, a fait l'objet d'une lame mince complète. Un premier examen macroscopique montre à la fois un aspect laminé plus ou moins accentué et une cyclicité assez nette (40 à 45 cycles) (fig. 162). Chaque cycle comporte une série de lamines. Certains cycles se terminent ou débutent par un niveau de contamination pédo-déritique important avec des grains de sols et de cuirasses de 0,2 à 1 mm de diamètre. Le sommet de la stalagmite se termine par un arrêt du concrétionnement symbolisé par une surface corrodée et le dépôt de grains pédologiques et de roches. Le grain de roche (calcaire micritique) le plus important mesure 4,5 mm. On observe également un charbon de bois, avec tissu cellulaire typique, de 5 mm de long sur un niveau déritique riche en matière organique.

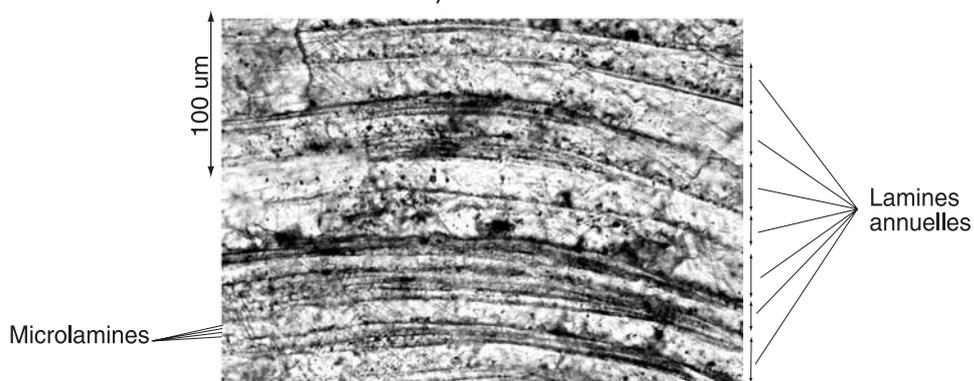
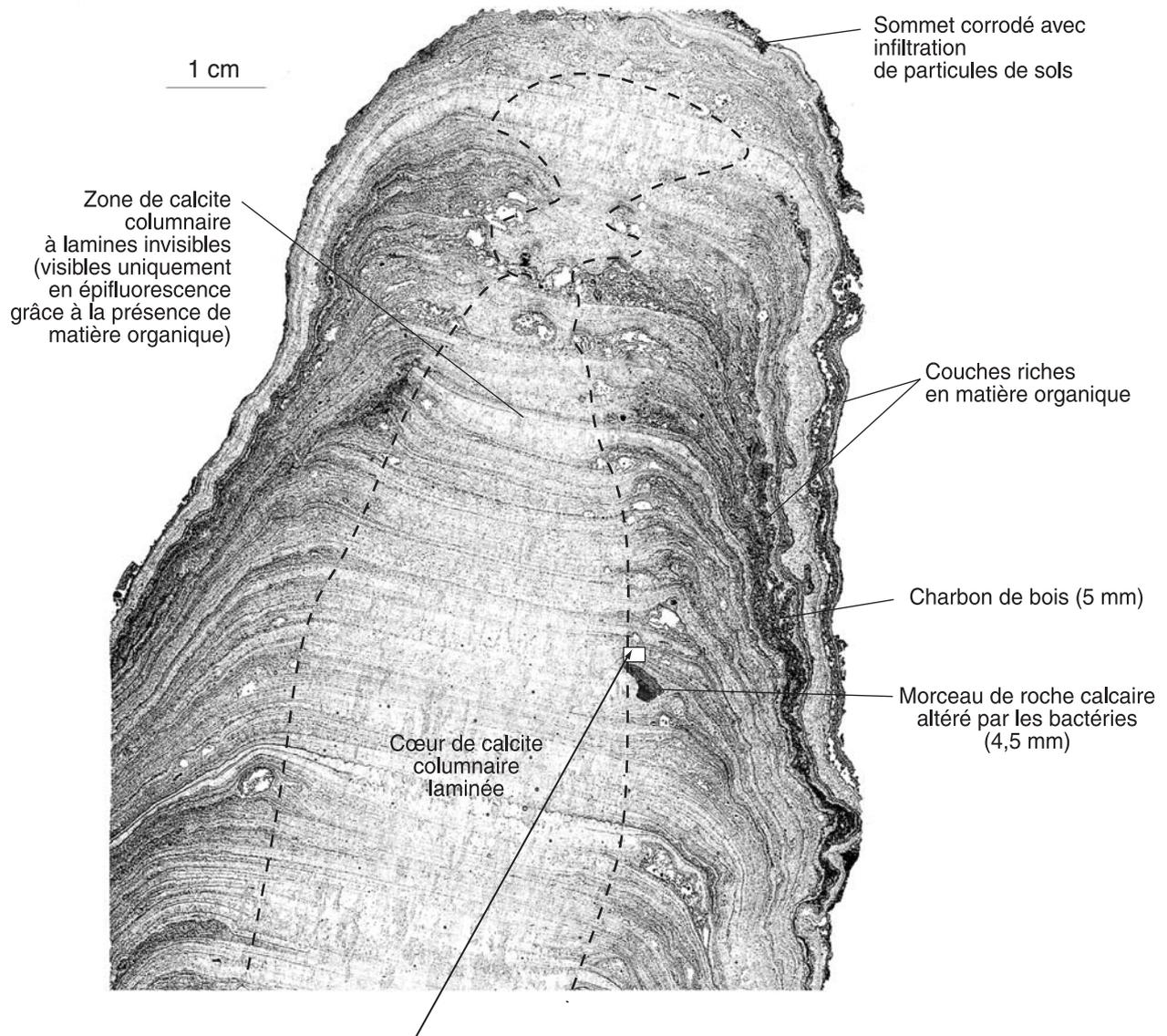
Une analyse microscopique détaillée montre que les lamines ne sont pas toujours visibles. Les secteurs les mieux rythmés sont formés par des doublets de lamines dont chacun mesure 60 à 120 µm de large. A fort grossissement, on constate que chaque doublet (100 µm) est constitué par une lamine épaisse (90-95 µm) et une lamine fine (5-10 µm). La lamine épaisse est généralement subdivisée en 5 à 8 microlamines en moyenne. En épifluorescence (lumière bleue et verte), on constate que les discontinuités entre microlamines sont luminescentes.

Certaines parties du concrétionnement montrent une calcite colonnaire qui transcendent les lamines. A d'autres endroits, la calcite palissadique

Figure 162 : Enregistrement des paléomoussons dans une stalagmite de la grotte de Qinhudong (préfecture de Dali, Yunnan).

Paleomonsoon recorded in a stalagmite of Qinhudong cave (Dali Prefecture, Yunnan).

Analyse R. Maire, dessin G. Réaud-Thomas, lab. Dymset-CNRS



Détail des lamines annuelles de croissance. Chaque lamine est subdivisée par des microlamines soulignées par la matière organique et correspondant aux différents épisodes pluvieux de mousson.

efface la structure microrhythmée. Toutefois, en épifluorescence (lumière bleue), une structure laminaire apparaît car chaque lamine et microlamine est séparée par une discontinuité ou par une plage luminescente. Des lamines invisibles à l'oeil nu et au microscope optique deviennent donc visibles en épifluorescence comme l'avait montré Y. Perrette [2000] pour des stalagmites du Vercors (France) à partir de la technique laser.

Les lamines claires épaisses sont séparées par des microlamines sombres traduisant des épisodes réguliers de soutirage de particules et de solutions pédologiques : micrograins, solutions ferrugineuses, matière organique. La stalagmite a donc enregistré une saisonnalité caractéristique marquée par la succession d'une saison estivale humide (précipitation de la calcite, soutirage des grains pédologiques) et d'une saison sèche hivernale (ralentissement et arrêt du concrétionnement).

3. Enregistrement des paléomoussons et mise en évidence des épisodes pluvieux

L'analyse microséquentielle de cette stalagmite du Yunnan montre une cyclicité hydroclimatique remarquable. Chaque cycle se termine par un niveau net de contamination pédologique signifiant un soutirage des sols dans l'endokarst par le réseau de microfissures qui peut dépasser plusieurs millimètres de large. La phase terminale marquant le sommet du concrétionnement traduit le début d'une période de déséquilibre bioclimatique correspondant probablement à une phase de rhexistase, donc d'érosion des sols.

L'annualité et la saisonnalité sont deux caractères importants que l'on peut ou ne pas déterminer dans les concrétionnements souterrains. Dans le cadre du milieu montagnard du Yunnan, caractérisé aujourd'hui et au cours du Pléistocène par un climat à saisons contrastées de type mousson, il est fort intéressant d'examiner si l'on observe un enregistrement de ces deux caractères. Or on constate que les doublets de lamines de 60 à 100 µm d'épaisseur correspondent probablement à des doublets annuels. Chaque doublet est formé par :

- une grosse lamine claire subdivisée en microlamines correspondant probablement à la succession des épisodes pluvieux de la mousson d'été ;
- une lamine fine plus foncée correspondant à la saison sèche d'hiver ou au début de la saison humide.

Cette saisonnalité est attestée par la mise en évidence de la matière organique luminescente ; celle-ci est présente au sein de la calcite, sans doute sous forme de gel et n'est pas visible en lumière polarisée non analysée et analysée. C'est l'excitation des électrons les plus externes des atomes formant les macromolécules organiques qui révèle

lent cette épifluorescence typique. Si la matière organique d'origine pédologique est transportée massivement au début de chaque épisode pluvieux important, les lamines fluorescentes majeures marqueraient le début de chaque mousson. Dans ce cas on n'aurait pas de lamine de saison sèche en raison d'une quasi interruption du concrétionnement.

Ce type de lamination se distingue de la rythmicité annuelle enregistrée sous la forme de doublets à lamine poreuse épaisse et grise (saison humide) et lamine compacte et blanche de fin de saison humide ou début de saison sèche.

II. Les indicateurs de surface : altérites et alluvions

Les principes et enseignements exposés ci-dessus ont été appliqués pour les dépôts superficiels et souterrains du district de Panxian (Guizhou ouest). Les dépôts superficiels les plus remarquables sont les sols et altérites d'une part et les anciennes alluvions fluviales d'autre part.

A. Les indicateurs altérologiques

Les indicateurs altérologiques, liés à l'érosion chimique de la roche, sont importants à connaître car ils sont responsables de la pédogenèse et de l'altérogenèse. Ils renseignent sur la nature et l'origine des roches altérées, notamment sur la nature d'une ancienne couverture géologique aujourd'hui disparue à cause de l'érosion. Lorsque l'érosion des sols est importante, elle révèle la surface irrégulière du substrat calcaire crypto-karstifié en dents de pierre. Entre ces crypto-lapiés, on observe des racines de sols et d'altérites qui forment des horizons B tronqués de teinte rouge. Ces altérites anciennes remanient des résidus d'altération issus de la digestion de la colonne sédimentaire. L'examen minéralogique au microscope de la fraction sableuse est la méthode la plus pratique pour reconnaître les signatures éventuelles des roches disparues.

1. L'enregistrement du décapage de la couverture géologique

Les basaltes du Permien supérieur de la formation Emeishan jouent un rôle géomorphologique important dans les karsts du Yunnan et de la bordure ouest du Guizhou. Ainsi, des affleurements basaltiques subsistent au niveau de la frontière des deux provinces entre 2 000 et 2 700 m d'altitude. Ces roches ont subi une érosion et une altération importante au cours des temps géologiques. Les produits d'altération, riches en argiles ferrugineuses

ses, donnent des altérites rouges typiques comme celles du secteur de la forêt de pierre de Lunan (Shilin) dans le Yunnan. Les altérites étudiées sont situées sur des affleurements de Permien inférieur calcaire (Maokou) et de Trias calcaire.

a) Décapage de la couverture basaltique

Dans les karsts du Guizhou, les produits d'altération provenant d'une ancienne couverture de basaltes ne sont pas visibles à l'œil nu dans les altérites, d'où la nécessité d'un examen de la fraction sableuse au microscope.

-Altérites de référence sur roches basaltiques.

Dans le district de Panxian, les basaltes de la forêt de bambou (Laochang) reposent directement sur les flyschs pélitiques du Permien inférieur. Ils présentent des profils d'altération typiques. On observe à la base la roche saine en prismes (horizon R = Rca) surmontée par un profil épais de 2 m constitué par (fig. 163) :

- un horizon RC en boules (1 m) ;
- un horizon S (ou B) argilo-ferrugineux brun-rouge (0,9 m) ;
- un horizon A (ou A1) humifère (0,1 m).

La fraction sableuse de l'horizon B (éch. 583) présente de nombreux grains de sols. Le cortège minéral est constitué par de très nombreux petits verres volcaniques (< 50-60 µm) provenant de la décomposition de la mésostase comme l'attestent de multiples verres blancs ou bruns en partie argilisés (fig. 164, photos Aa, Ab, Ac). En effet on sait que la masse argileuse de fond vient précisément de l'altération du verre. On observe également des quartz : gros grains à extinction roulante, quartz en échardes ou anfractueux, quartz bruns (250 µm). Quelques zircons sont présents de même que de la magnétite.

-Décapage de la couverture du karst de l'anticlinal de la Gesohe, altérites de Baoji sur calcaires du Permien inférieur.

A proximité du village de Baoji (alt. 1 700 m), les profils d'altérites en bordure de route montre un horizon B argileux, rouge, en partie tronqué à cause de l'érosion des sols. La fraction sableuse (éch. 581) montre une masse de fond constituée par des grains de cuirasses de fer et de sols ferrugineux, quelques gros quartz, des débris de spicules, de rares micas et de petits verres volcaniques blancs, parfois bruns (fig. 164, photos Ba, Bb). On est donc en présence d'une contamination volcanique nette qui prouve l'ancienne extension de la formation Emeishan. Actuellement cette couverture basaltique se situe 5 km au nord-ouest où elle culmine entre 2 300 et 2 558 m (Badashan).

- **Décapage de l'anticlinal faillé de Panxian (Biyun).** Une altérite de versant a été étudiée sur le versant, près de la grotte de Bianfu. La coupe étudiée est située sur les calcaires du Permien inférieur à 1 400 m sur le versant sud du sommet coté 1 774 m. L'horizon S (B) argileux, tronqué, est

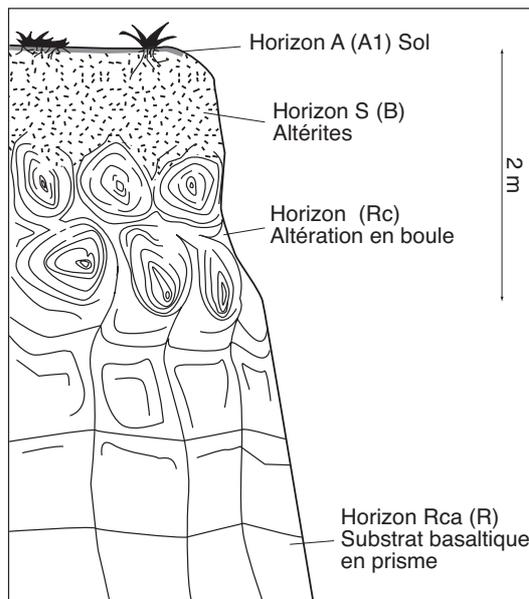


Figure 163 : Profil d'altération typique dans les basaltes du Permien (forêt de Bambou de Laochang, district de Panxian, Guizhou).

Typical alteration profile in the permian basaltic cover (bambou forest of Laochang, Panxian County, Guizhou).

Figure N. Vanara

de teinte brun-rouge. La fraction sableuse (éch. 587) montre des grains de sols et de cuirasses, accompagnés de quartz, de quelques verres volcaniques (200 µm) et de rares phytolites (fig. 164, photos Ca, Cb). La contamination volcanique des altérites de versant de cette zone est confortée par le contexte géomorphologique. En effet une large bande de basaltes de la formation Emeishan est présente 2 à 3 km à l'ouest et au nord-ouest.

- **Décapage de la haute surface de Daladong.** Le réseau fossile de Daladong marque l'ancien fonctionnement de la haute surface karstique à buttes coniques de la zone anticlinale de Machang vers 1 700 m d'altitude. En surface, les dents de pierre mis à nu par l'érosion des sols montrent des racines d'altérites rouges à brun-rouge. Deux échantillons (570 et 571) ont été prélevés à la base du versant, 15 m au-dessus de l'entrée de la grotte principale. La fraction sableuse montre de nombreux grains de quartz (90 %), des grains de sol et de petits charbons de bois assez nombreux (100-150 µm) (fig. 164, photos Da, Db, Dc). Le cortège minéral secondaire est constitué par des zircons usés, des chailles, du verre volcanique, de l'hornblende verte (rare) et de l'andalousite (probable).

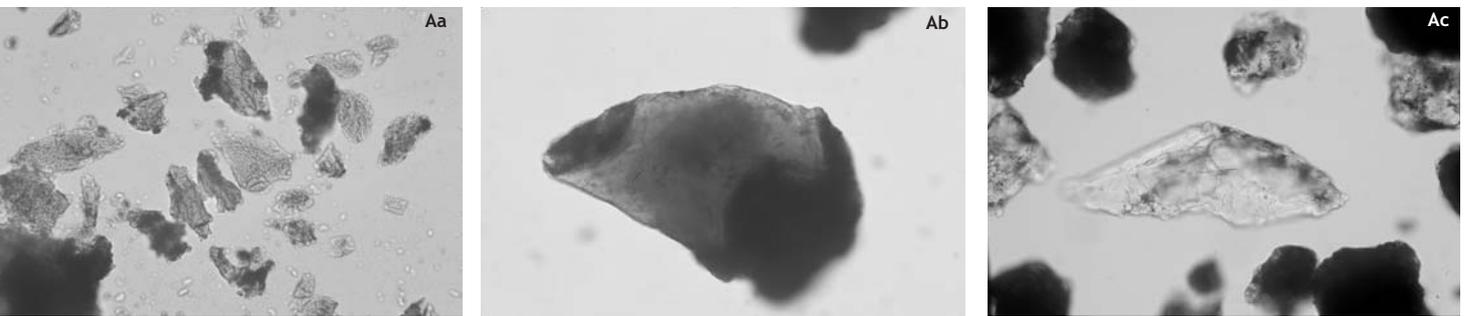
b) Altération des pélites en position chevauchante sur le Trias calcaire : site de Baiguo

Au-dessus de Baiguo, au nord-ouest du district de Panxian, les hauts versants calcaires entre 1 700 et 2 000 m sont façonnés dans les calcaires du Trias moyen. Ils présentent des surfaces de crypto-lapiés décapées par l'érosion des sols au cours du XX^{ème} siècle. Les racines d'altérites rouges qui subsistent entre les dents de pierre hautes de 1,5 m à 2,5 m présentent une matrice argileuse très importante. La fraction sableuse (éch. 603) révèle de très nombreux quartz sédimentaires plus ou moins altérés,

Figure 164 : Enregistrement du décapage de la couverture basaltique dans le district de Panxian (Guizhou).

Erosion recording of the basaltic cover (Panxian County, Guizhou).

Etude des minéraux en grains et photos R. Maire et N. Vanara, lab. Dymset-CNRS



Photos Aa, Ab, Ac : Echantillon 583, horizon B sur basalte de la Forêt de Bambous (Laochang).

Sample 583, B horizon upon Permian basalt (Bamboo Forest, Laochang).

Aa : Petits verres bruns ± argilisés de 10 à 40 μm provenant de l'altération de la mésostase de silice amorphe (x 400, LPNA = lumière polarisée non analysée). *Small brown glasses (10-40 μm) more or less argillized coming from the mesostase alteration.*

Ab : Quartz volcanique brun de 200 μm avec revêtement argilo-ferrugineux (x 400, LPNA). *Brown quartz (200 μm) with clayey-ferruginous coating (right).*

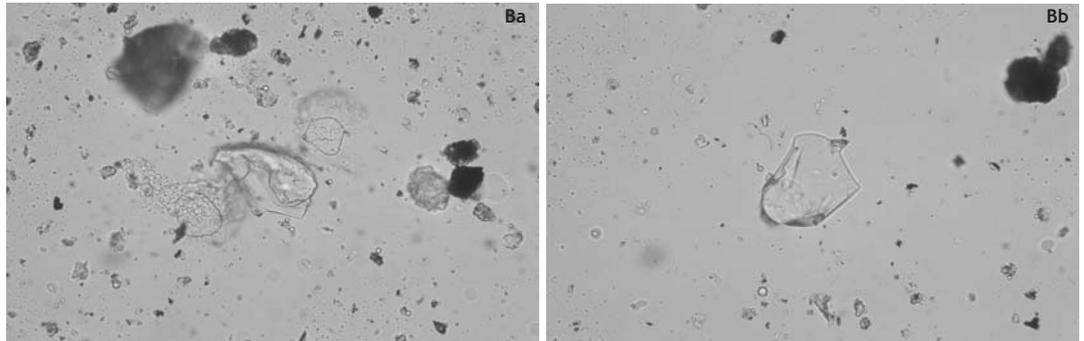
Ac : Gros quartz volcanique de 400 μm (x 200, LPNA). *Big volcanic quartz 400 μm long.*

Photos Ba, Bb : Echantillon 581, horizon B argileux rouge du plateau de Baoji.

Sample 581, clayey and red B horizon of Baoji plateau.

Ba : Verre volcanique bulleux de 65 μm (x 400, LPNA). *Volcanic glass 65 μm long.*

Bb : Autre exemple de verre volcanique de 65 μm (x 400, LPNA). *Other example of volcanic glass 65 μm long.*

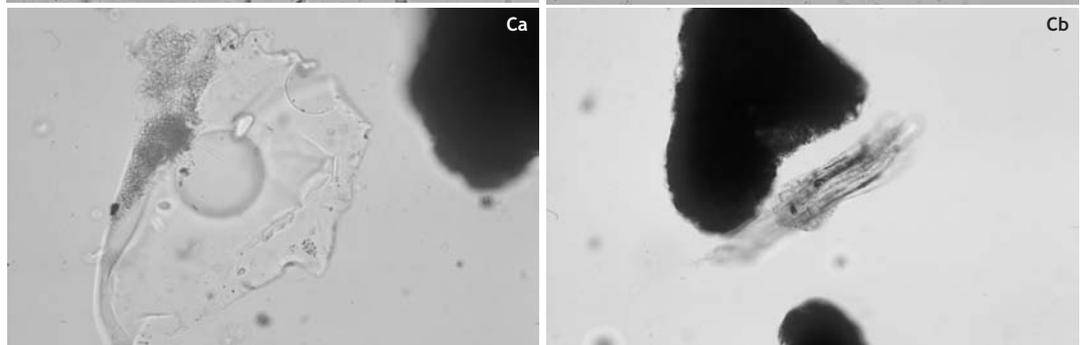


Photos Ca, Cb : Echantillon 587, horizon B argileux tronqué, brun-rouge, de l'anticlinal de Panxian (Biyun).

Sample 587, clayey B horizon (Panxian-Biyun anticline).

Ca : Gros verre volcanique de 220 μm (x 400, LPNA). *Big volcanic glass 220 μm long.*

Cb : Grain argilo-ferrugineux et phytolite de 500 μm (x 200, LPNA). *Clayey-ferruginous grain and phytolite 500 μm long.*

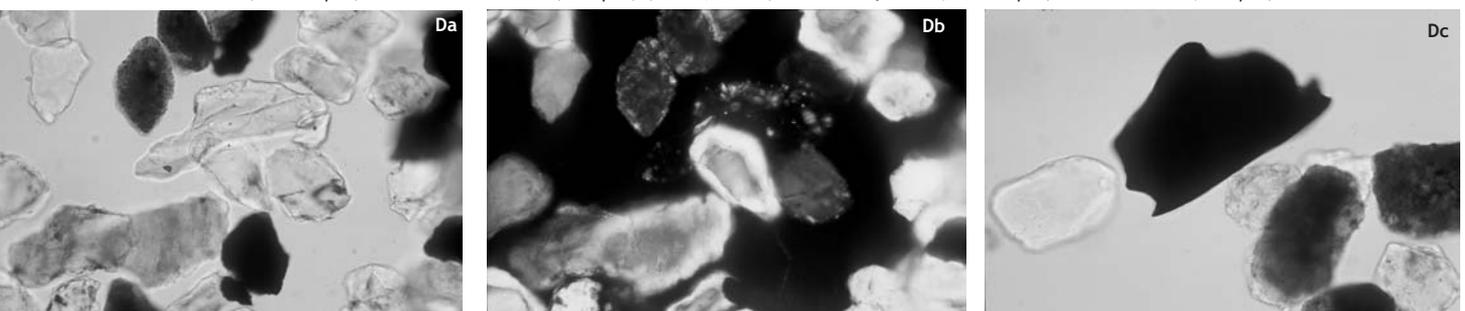


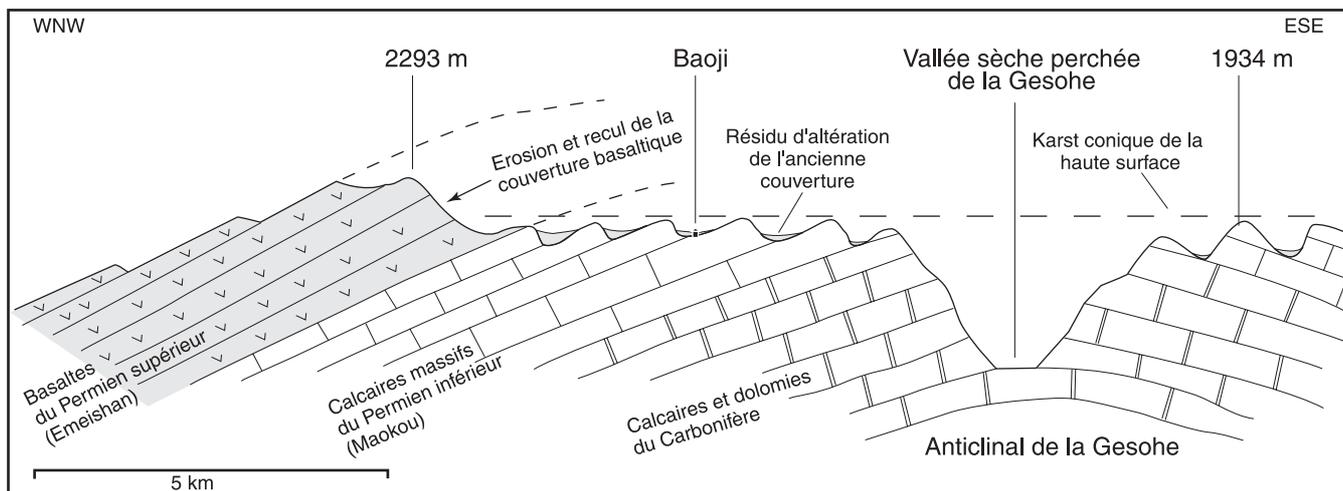
Photos Da, Db, Dc : Echantillon 570, racine d'altérites rouges de la haute surface tertiaire de Daladong (Machang). *Sample 570, red alterites of the tertiary surface of Daladong (Machang).*

Da : Quartz, verre volcanique et grains argilo-ferrugineux de 90-300 μm (x 200, LPNA). *Quartz, volcanic glass and clayey-ferruginous grains 90-300 μm .*

Db : Idem en lumière polarisée analysée (LPA). Le verre volcanique en silice amorphe demeure opaque. *Idem in analysed and polarized light. The volcanic glass in amorphous silice is opaque.*

Dc : Quartz altérés (80-170 μm) et charbon de bois (300 μm) (x 200, LPNA). *Altered quartz (80-170 μm) and charcoal (300 μm).*





des grains de sols et cuirasses ferrugineuses, quelques zircons altérés, des hornblendes vertes, des débris de chailles, du rutile (photo 376). On observe aussi quelques quartz très usés par altération (photo 377). Le résidu d'altération provient en partie de la roche en place, mais surtout de roches pélitiques et argiliques situées topographiquement au-dessus du versant en raison de la structure géologique localement écaillée. En effet, les pélites du Permien supérieur (ou du Trias inférieur) sont parfois en position chevauchante.

2) Intensité de l'altération des minéraux et relations avec la morphogénèse karstique

- Altération des verres volcaniques. Le verre étant formé par de la silice amorphe, donc non cristallisée, la molécule SiO_2 peut se dissocier assez aisément et se combiner avec l'alumine pour donner des argiles qui sont des silicates d'alumine hydratés disposés en feuillets, d'où le terme plus précis de phyllosilicates. Le verre volcanique a donc la réputation de s'argiliser facilement. Lorsqu'une couverture de laves s'altère, elle donne des argiles rouges en raison de la présence de fer. Lorsque les calcaires sont purs, cas de ceux du Permien inférieur, les profils d'altérites qui recouvrent la roche calcaire sont toujours le résultat de l'altération d'autres roches situées autrefois au-dessus. La présence de rares verres dans ces profils tronqués est liée à l'ancienneté de l'altération et à l'argilisation quasi complète de la silice amorphe.

Dans le cas de la haute surface karstique à buttes coniques des karsts de Panxian (anticlinal de la Gesohe, anticlinal de Machang), situés généralement au-dessus de 1700 m d'altitude, l'altération et l'érosion de la couverture imperméable du Permien supérieur (basaltes) et du Trias inférieur (argilites et pélites) s'est effectuée au cours d'une très longue période que l'on peut situer approximativement pendant une grande partie de l'ère tertiaire. Au fur et à mesure du décapage de cette couverture et de la mise à l'affleurement des calcaires sous-jacents, notamment ceux du Permien inférieur et du Carbonifère, un karst à buttes coniques s'est mis en place. Celui-ci a été ensuite porté en altitude, de l'ordre d'un millier de mètres, à la suite de la dernière grande phase de surrection himalayenne (Plio-Quaternaire).

- Altération des quartz. Le quartz est un tectosilicate constitué par de la silice cristallisée ; son altération est plus lente que celle du verre. Le quartz, comme le verre, est insoluble dans les acides (sauf l'acide fluorhydrique). Dans le milieu naturel, le quartz peut s'altérer uniquement dans un environnement alcalin, donc basique, avec des pH et une température élevés. Les milieux tropicaux avec couverture d'altérites épaisses sont donc favorables à l'altération des quartz, mais cette altération est plus lente que celle du verre à cause des liaisons cristallines plus difficiles à dissocier au niveau de la maille élémentaire. Les formes d'altération les plus caractéristiques sont les golfes de corrosion qui donnent une morphologie cariée ty-

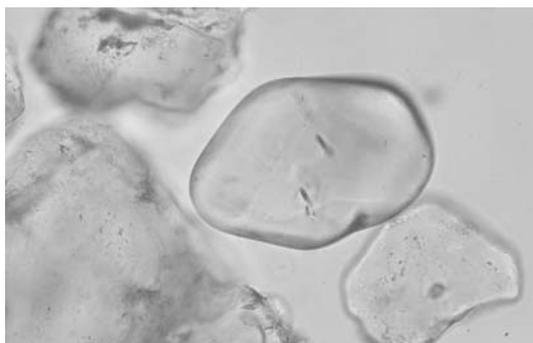
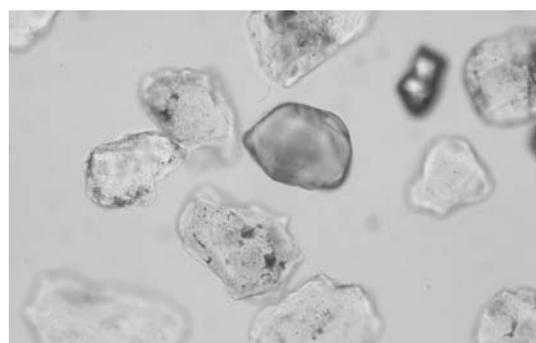
Figure 165 : Décapage de la couverture basaltique du Permien supérieur sur l'anticlinal de Baoji (district de Panxian, Guizhou).

Erosion of the Permian basaltic cover on the Baoji anticline (Panxian County, Guizhou).

Figure R. Maire

Photos 376-377 : Echantillon 603, racine d'altérites rouges au-dessus de Baiguo (Panxian, Guizhou).

Sample 603, red alterites above Baiguo (Panxian, Guizhou).



376 (gauche) : Quartz, hornblende verte (140 μm) et zircon (x 200, LPNA). Quartz, green hornblende (140 μm) and zircon.

377 (droite) : Quartz usé (150 μm) par altération pédologique prolongée. Rounded quartz (150 μm) by a long alteration.

Photos R. Maire et N. Vanara

pique et un état de surface très irrégulier, corrodé. D'autres quartz corrodés présentent une surface très lisse et arrondie tout en présentant un net pléochroïsme en lumière polarisée non analysée, ce qui n'est pas le cas pour le quartz en général. Ce type d'altération suggère une corrosion homogène avancée. L'état de l'altération de ces quartz, comme celle de zircons portés et usés, atteste donc une longue période d'altérogenèse remontant probablement au Tertiaire.

B. Les indicateurs alluvionnaires

L'évolution des bassins-versants et du karst superficiel peut s'étudier également par la nature et la situation des dépôts alluvionnaires. La reconnaissance de ces dépôts permet localement de suivre l'enfoncement de la karstification et/ou de l'incision des cours d'eau en fonction de la surrection tectonique himalayenne.

1. Les alluvions récentes

Le cas des alluvions récentes doit être étudié au préalable car il permet d'apprécier le rôle d'indicateur de ce type de dépôts. Par la minéralogie des grains, les sables alluviaux des rivières actuelles donnent une indication sur la nature des terrains du bassin d'alimentation. L'exemple de la zone d'entrée de la perte de la Gesohe, localisé au nord-est du district, permet de caractériser le faciès des sables de crue à la cote + 10 m et + 40 m (chap. 1, p. 55).

Les sables de + 10 m sont présents à l'intérieur du grand porche d'entrée, sur la banquette de rive droite (éch. 577). Au microscope, on observe de multiples grains de sols, des quartz dont certains ronds et usés (érosion fluviale), quelques verres volcaniques, du zircon et un cortège minéral divers (fig. 166, photo A).

Les sables fins de + 40 m ont été récoltés dans les champs situés 200 m avant la perte (éch. 580). Ces dépôts de très hautes eaux sédimentent lorsque la perte ne peut plus évacuer la totalité du débit (> 1 000 m³/s). Il se produit alors un lac temporaire au niveau de la perte. La détermination révèle un cortège minéral très varié : très abondants grains de sols et charbons de bois, de cuirasses de fer, nombreux quartz sédimentaires, du zircon, de l'augite, du quartz brun (rare), de la glauconite, du mica, de la chlorite et d'autres minéraux non identifiés (fig. 166, photos B1, B2).

Cette variété minérale atteste d'abord l'importance de l'érosion des sols, le rôle des brûlis, mais également la diversité des terrains traversés en liaison avec la superficie du bassin-versant (1 187 km²). Cet impluvium intéresse tous les terrains présents sur le district de Panxian, du Carbonifère à l'Eocène conglomératique en passant par les basaltes du Permien supérieur et les pélites et

argilites du Permien supérieur et du Trias inférieur.

2. Les alluvions anciennes perchées, indicateurs de paléotracés

En géomorphologie fluviale, les alluvions anciennes sont étagées sur le flanc des vallées en fonction de l'encassement de celles-ci, de la surrection du massif et parfois de l'abaissement du niveau de base marin. En région karstique et fluvio-karstique, les alluvions peuvent se retrouver à la surface du karst. Dans ce cas, soit il s'agit d'une cavité totalement érodée dont il ne reste que le plancher et les dépôts fluviaux, soit il s'agit d'un ancien parcours aérien. Le contexte géomorphologique peut aider à trancher l'origine de ces alluvions.

Cette famille d'alluvions, comprenant des sables, graviers et galets, a été retrouvée à différents niveaux d'altitude sur le tracé des grottes-tunnels du nord du district de Panxian : Gedahe et Wutuhe (chap. 9, fig. 156).

a) Les indices des paléocours de la Gedahe

L'exemple de la Gedahe est remarquable car les sédiments perchés, retrouvés en divers points du plateau, permettent de retracer l'histoire du paléotracé de la Gedahe. Trois sites ont été échantillonnés au-dessus de la perte actuelle (1 340 m) et sur le plateau.

- **Site 1.** Il se présente sous la forme d'une terrasse fluviale typique de plusieurs mètres d'épaisseur avec des niveaux de graviers, de sables et de limons (photo 378) ; elle est localisée plus de 100 m au-dessus de la perte actuelle, au bord d'une piste, et à proximité d'une ancienne galerie constituant l'ancien parcours souterrain de la Gedahe. Les petits graviers et sables grossiers, d'une taille comprise entre 2-4 et 10-15 mm, sont constitués par des grès, chailles et silex et quelques fragments de cuirasses de fer. Les grès présentent un cortex d'altération et des craquelures. L'examen minéralogique des sables (éch. 592) montre de nombreux grains de quartz, de sols et de cuirasses ferrugineuses à structure microgréseuse. Le cortège minéral secondaire est assez varié : mica, verre volcanique bulleux, sphène, zircon, calcédoine, tourmaline (probable) (fig. 166, photos C1, C2, C3).

- **Site 2.** Le dépôt fluviale se situe sur le plateau sur le parcours morphologiquement évident de l'ancienne rivière souterraine. Les galets et graviers sont présents dans toutes les terrasses de culture au fond d'une petite vallée encaissée qui correspond à une ancienne salle effondrée. Le prélèvement des alluvions a été effectué vers 1 435 m, un peu avant le grand porche de la grotte fossile de Tianshengqiao qui représente un des tronçons reliques de l'ancienne grotte-tunnel de la Gedahe. La fraction

Figure 166 : Les traceurs minéraux dans les alluvions récentes et anciennes (district de Panxian, Guizhou).

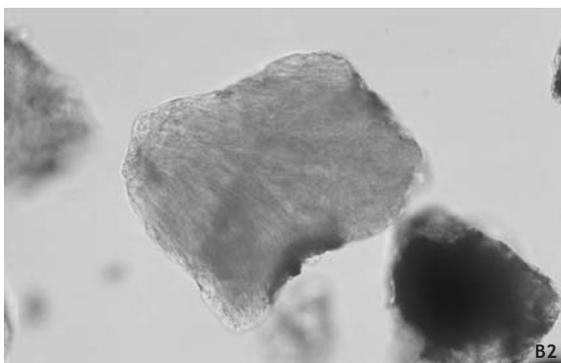
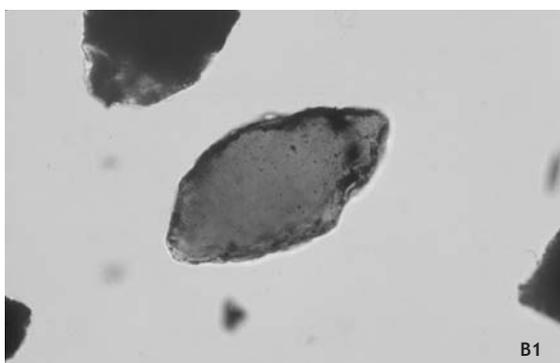
Mineral tracers in the recent and old alluvium (Panxian County, Guizhou).

Examen des minéraux en grains et photos R. Maire et N. Vanara, lab. Dymset-CNRS



Photo A : Echantillon 577, alluvions fines de crue de la perte de la Gesohe (+ 10 m). Verre volcanique de 250 μm (x 200, LPNA).

Sample 577, flood sands of the Gesohe sinkhole (+ 10 m). Volcanic glass 250 μm long.



Photos B1, B2 : Echantillon 580, sables fins avant la perte de la Gesohe (terrasse de + 40 m). Sample 580, fine sands before the Gesohe sinkhole (terrace of + 40 m).

B1 : Quartz brun de 150 μm (x 400, LPNA). Brown quartz 150 μm long.

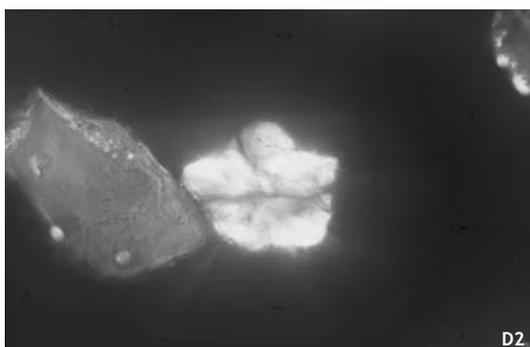
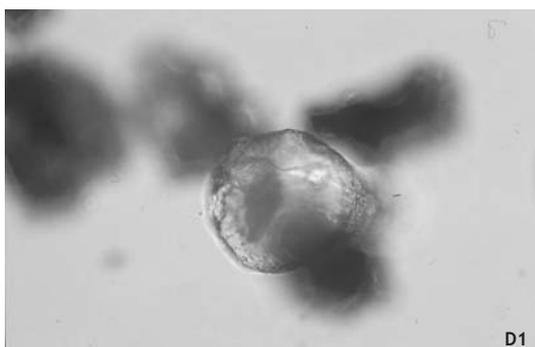
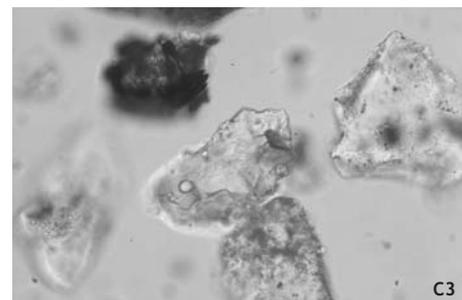
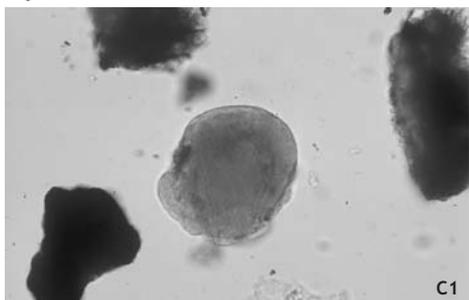
B2 : Grain de chlorite verdâtre de 200 μm (x 400, LPNA). Greenish grain of chlorite 200 μm long.

Photos C1, C2, C3 : Echantillons 592, alluvions anciennes de la Gedahe situées 100 m au-dessus de la perte actuelle. Old alluvium of Gedahe located 100 m above the actual sinkhole.

C1 : Mica verdâtre de 100 μm (x 400, LPNA). Greenish mica 100 μm long.

C2 : Sphène probable de 110 μm (x 400, LPNA). Probable sphene 110 μm long.

C3 : Verre volcanique bulleux de 110 μm au centre and quartz (x 400, LPNA). Volcanic glass 110 μm long in the center and quartz.



Photos D1, D2: Echantillon 593, autres alluvions anciennes de la Gedahe avant le tunnel fossile de Tianshengqiao. Sample 593, other old alluvium of Gedahe near the dry tunnel cave of Tianshengqiao.

D1: Bille de verre volcanique vésiculeux de 100 μm (x 400, LPNA). Small ball of volcanic glass 100 μm long.

D2: Calcitonite au centre (100 μm) et quartz à gauche (140 μm) en lumière polarisée analysée (x 400, LPA). Calcitonite in the center (100 μm) and quartz on left (140 μm) in analysed polarized light.

Photo 378 : Ancienne terrasse alluviale située sur le plateau à + 100 m indiquant l'ancien tracé de la Gedahe.

Old fluvial terrace located 100 m above the Gedahe sinkhole.

Photo N. Vanara 2000



sableuse des alluvions (éch. 593) montre également une majorité de quartz et de grains de sols et de cuirasses (fig. 166, photos D1, D2). Le cortège secondaire est formé par de la chlorite, du verre vésiculé, du rutile, de la calcédonite, de la tourmaline (?).

- **Site 3.** Le dernier dépôt alluvial, le plus haut, se situe au sommet du plateau, au-dessus de Tianshengqiao vers 1 520 m. On observe aussi des galets dans l'ensemble des altérites formant les terrasses de culture, mais les éléments sont plus altérés. On ne discerne pas les formes d'une ancienne cavité décapitée par l'érosion. La fraction sableuse (éch. 596) révèle en majorité des grains de sols et de cuirasses (80 %), des quartz (15 %) et un cortège secondaire peu varié (chailles, grenat, glauconite).

b) Rétrospective de l'évolution de la Gedahe

Les anciennes alluvions retrouvées en surface et leurs relations avec des paléocavités permettent de retracer approximativement l'histoire de l'enfoncement de la grotte-tunnel de la Gedahe. La carte géologique montre très clairement la répartition des affleurements géologiques. On constate ainsi la présence de pastilles de basalte de la formation d'Emeishan prouvant l'ancienne extension de la couverture volcanique. A une époque ancienne, au cours du Tertiaire, les cours d'eau coulaient sur cette surface imperméable. C'est avec la surrection himalayenne polyphasée, le décapage progressif de cette couverture et l'enfoncement des vallées, que la Gedahe souterraine a commencé à s'établir

(fig. 156, p. 325). On peut donc distinguer les phases suivantes :

- **Phase 1.** Décapage de la couverture basaltique et écoulement fluvial normal au cours du Tertiaire

- **Phase 2.** Affleurement des calcaires permien et début de formation du cours souterrain de la Gedahe. Les alluvions les plus élevées (site 3, + 180 m) pourraient appartenir soit à un ancien cours superficiel ou à un premier parcours souterrain ou semi-souterrain de la Gedahe. Cette phase se place probablement au cours du Néogène.

- **Phase 3.** La paléo-Gedahe emprunte une grotte-tunnel dont il subsiste notamment le tronçon souterrain de Tianshengqiao (+ 110 m) qui est en relation avec les alluvions du site 2 et probablement du site 1. On se situe encore dans le Néogène.

- **Phase 4.** Cette phase n'a pas été bien précisée, mais elle pourrait correspondre à une période plus ancienne du Pléistocène, en relation avec un porche suspendu au-dessus de la perte actuelle.

- **Phase 5.** La Gedahe emprunte la grotte-tunnel actuelle au cours du Pléistocène.

III. Les dépôts détritiques souterrains

Plusieurs exemples sont étudiés dans des cavités du district de Panxian (Guizhou) : Liangfengdong, Gesohe, Gedahe, Laodong, Daxiaodong. Il s'agit de dépôts souterrains, mais également de paléoalluvions souterraines localisées en surface à cause de la destruction d'anciens niveaux de grottes-tunnels.

A. Les dépôts de Liangfengdong

1. Description

Située dans le sud du district près de Lemin, la grotte sèche de Liangfengdong fait partie du système de la grotte-tunnel de Zhujiadadong (fig. 154, p. 320 et fig. 167) Elle constitue un étage fossile latéral se développant 40 à 50 m au-dessus du niveau actif noyé. La galerie, large de 5 à 10 m, présente une morphologie phréatique typique et des remplissages détritiques importants (fig. 168). La coupe de rive droite, placée à 60 m de l'entrée, mesure 3 m d'épaisseur. Elle repose sur des blocs de base. La litho-stratigraphie montre une succession de couches de galets, de sables et de niveaux limono-argileux indiquant un fonctionnement rythmé de crues. Trois grandes séquences au moins sont observées. En rive gauche, le sommet du dépôt est scellé par un plancher détritique induré et par des stalagmites, dont plusieurs sont actives. En rive droite, le dépôt monte localement jusqu'au plafond au niveau du départ d'un conduit affluent (fig. 168).

La séquence de base, épaisse de 1,50 m, pré-

sente une couche de graviers et galets mal lités de quelques centimètres de diamètre. La matrice sableuse (éch. 610) révèle au microscope de nombreux grains de sols et cuirasses et quelques % de quartz. Les grains de chailles sont abondants. Les quartz présentent des indices remarquables de corrosion (fig. 169, photos A1, A2). Le cortège secondaire est formé par du zircon, de la glauconie, de l'apatite et d'autres minéraux non déterminés.

La couche de sédiments fins est épaisse de 35 cm. Les niveaux sableux (éch. 612) présentent comme précédemment une majorité de grains de sols et de cuirasses et assez peu de quartz. Le cortège secondaire est formé par des grains de chaille, du zircon et quelques minéraux verts.

La deuxième séquence présente une épaisse couche argilo-sableuse sommitale. La fraction sableuse des niveaux argileux (éch. 615) montre une quantité très importante (95 %) de grains de sols et de cuirasses (fig. 169, photos B1, B2). Les quartz représentent seulement quelques pourcents. Le cortège secondaire est peu varié : apatite, mica plus ou moins argilisé, écharde de quartz non sédimentaire.

2. Interprétation

a. Chronologie relative

La géométrie de la galerie et l'analyse du remplissage permettent de retracer les grandes étapes de l'histoire du réseau depuis sa genèse probablement au cours du Pléistocène. En effet ce conduit se situe 50 m au-dessus de la rivière actuelle pendant l'étiage et 30 m seulement pendant les grandes crues. On peut distinguer cinq phases principales :

- Phase de creusement en régime noyé et épinoyé. Cette phase de corrosion est attestée par la morphologie typique des parois et du plafond (coupoles, morphologie lisse). Le réseau est emprunté par une rivière. Les premiers sédiments liés à cette phase ne sont pas connus.

- Phase de dénoyage. Celle-ci correspond à un réajustement mécanique de la voûte et s'accompagne localement par des effondrements formant les blocs situés à la base du remplissage étudié.

- Phase de remplissage alluvial de crue. Le colmatage alluvial grossier et fin jusqu'à la voûte de la galerie indique un événement majeur dans l'histoire de la grotte. En raison de l'emplacement de ce réseau latéral à proximité du grand porche de la grotte-tunnel de Zhujiadadong, il ne fait pas de doute que Liangfengdong a été colmatée lorsque le tunnel principal a été engorgé par de grandes crues de mousson.

- Phase de décolmatage. Cette période érosive est attestée par le ravinement important du remplissage sur les deux rives du conduit. L'érosion fluviale responsable de cette évacuation des débris n'a

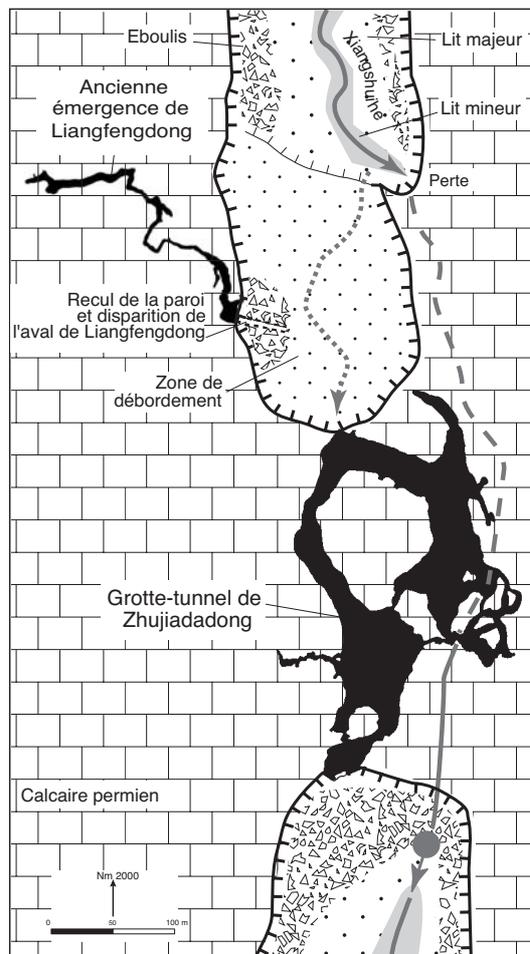


Figure 167 : Localisation géomorphologique de la grotte de Liangfengdong (district de Panxian, Guizhou).

Geomorphological location of Liangfengdong cave (Panxian County, Guizhou).

Figure R. Maire et N. Vanara, topographie Panxian 2000 (p. 106).

pas laissé de dépôts corrélatifs évidents, ce qui suggère un bon drainage.

- Phase de concrétionnement. Cette période correspond à l'assèchement définitif du réseau. Au début, des bassins et des gours subsistent dans les parties les plus basses. Ces laisses d'eau sont prouvées par la présence de choux fleurs d'aragonite (éch. 621) présents sur les parois d'un paléobassin localisé 2 à 3 m sous le niveau moyen de la galerie (fig. 168). L'assèchement du remplissage fin par évaporation provoque une induration de la partie supérieure par une calcite sparitique (éch. 618). On observe une sorte de pédogenèse au niveau de la réorganisation du fer : cristallites de goethite probable vers l'extérieur du dépôt et amas ferro-bactériens (fig. 169, photos C1, C2). Ce type de fonctionnement est un indicateur de phase chaude comme pour le remplissage type de Dadong dont la phase de pédogenèse souterraine est essentiellement holocène. Les stalagmites actives qui scellent le remplissage raviné sont holocènes et actuelles.

b. Intérêt des indicateurs détritiques et chimiques

La présence de fragments du remplissage détritique jusqu'au plafond de la galerie indique un fonctionnement fluvio-lacustre qui a fini par obstruer complètement le réseau. A la base, la dimension médiocre des galets (1 à 4 cm) suggère un tri

Figure 168 : Les remplissages de Liangfengdong (Panxian, Guizhou). The karst deposits of Liangfengdong (Panxian, Guizhou).

Figure N. Vanara, topographie Panxian 2000 (p. 108).

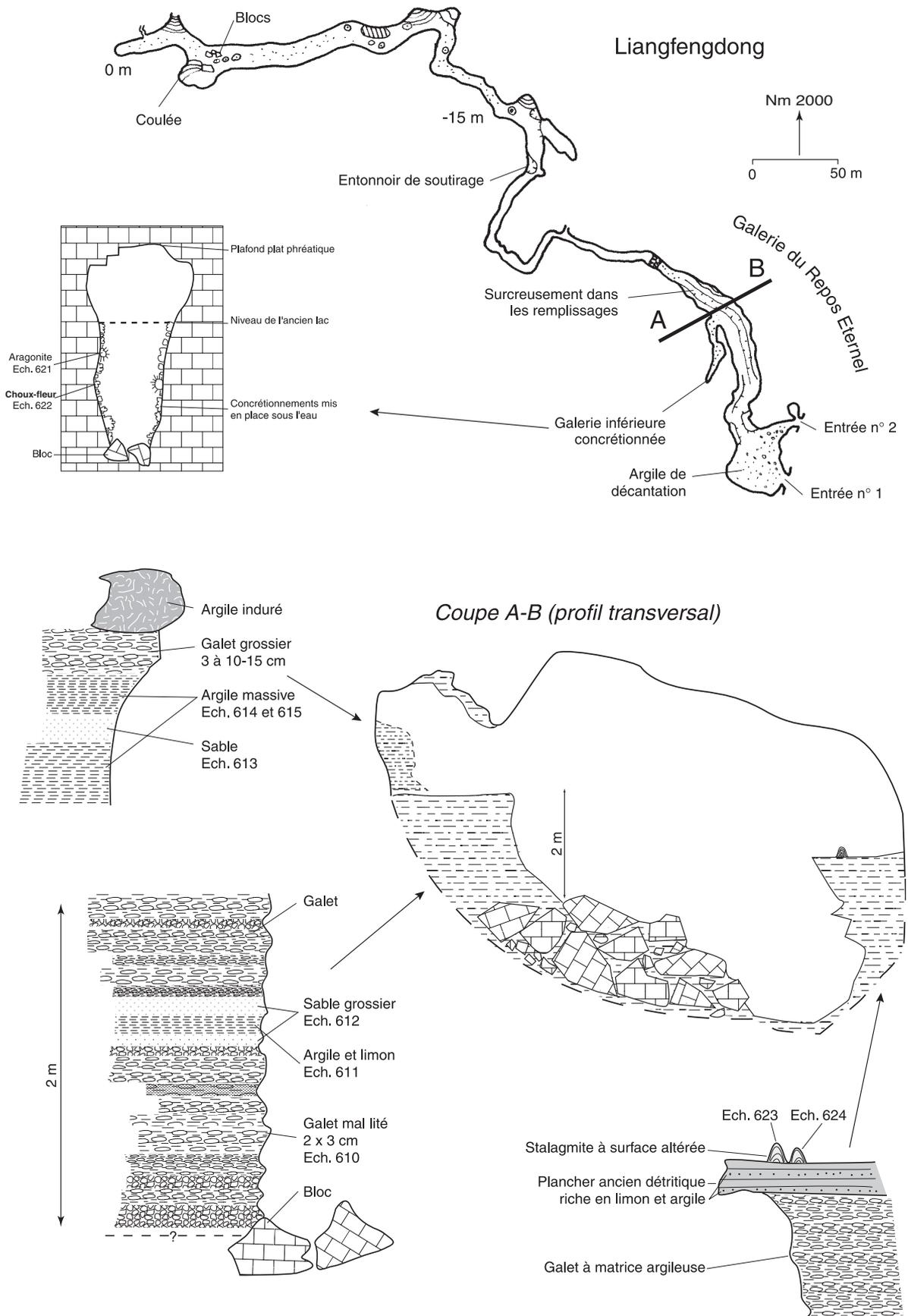
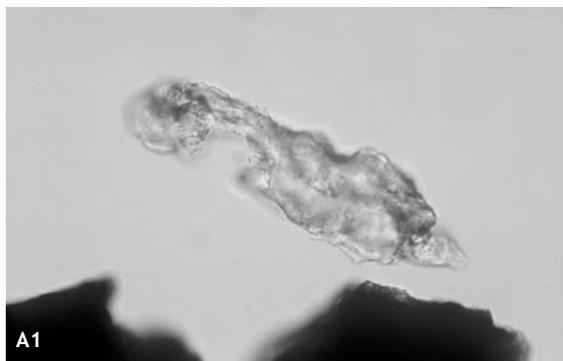


Figure 169 : Minéraux de la fraction sableuse du dépôt principal de la grotte de Liangfengdong (district de Panxian, Guizhou).

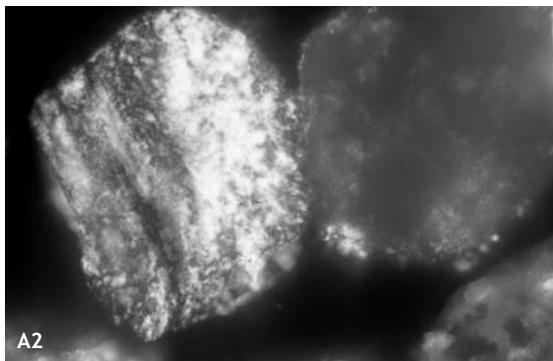
Mineral of sand fraction in the main detrital deposit of Liangfengdong (Panxian County, Guizhou).

Etude des minéraux en grains et photos R. Maire et N. Vanara, lab. Dymset-CNRS



A1 : Quartz très corrodé de 220 µm (x 400, LPNA).

Very altered quartz 220 µm long.

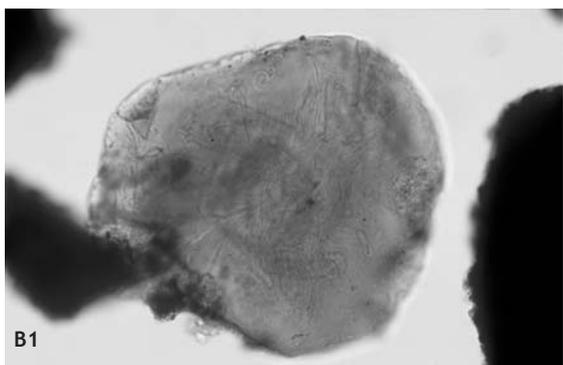


A1 : Deux grains de chailles plus ou moins argilisés de 180 µm de diamètre (x 400, LPA).

Very altered quartz 220 µm long.

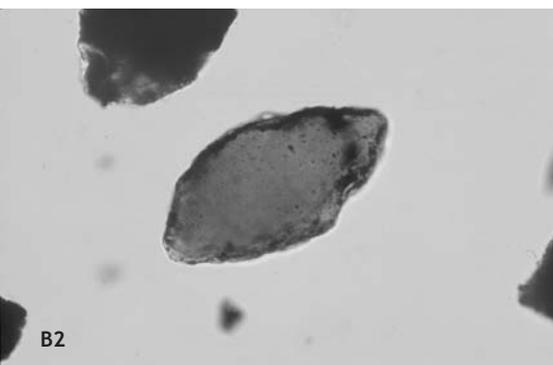
Photos A1, A2 :
Echantillon 610, sables de la séquence de base.

Sample 610, sands of the bottom sequence.



B1 : Grain d'apatite probable de 400 µm (x 200, LPNA).

Grain of probable apatite 400 µm long.

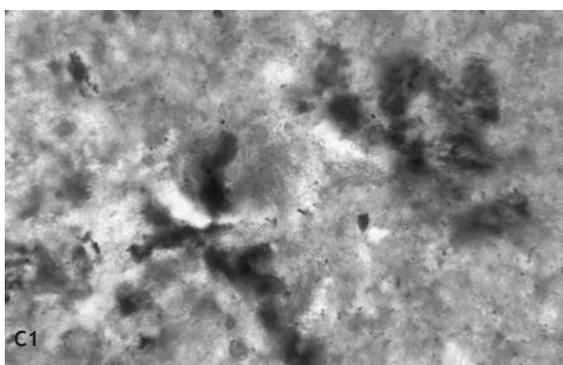


B2 : Biotite altérée (140 µm) et quartz bipyramidé (200 µm) (x 400, LPNA).

Altered biotite (140 µm) and bipyramidal quartz (200 µm).

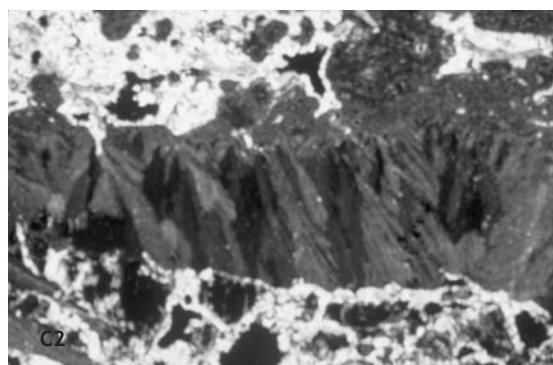
Photos B1, B2: Echantillon 615, niveau argilo-sableux de la séquence sommitale.

Sample 615, clayey-sandy layer of the top sequence.



C1 : Amas ferro-bactériens probables de 150 µm de diamètre (x 400, LPNA).

Probable bacterial-ferrous grains 150 µm diameter.



C2 : Bande de goethite (cristallites en faisceaux) de 1,7 mm d'épaisseur et calcite sparitique (x 25, LPNA).

Layer of goethite 1.7 mm thick and sparitic calcite.

Photos C1, C2 :
Echantillon 618, niveau calcité sommital.

Sample 618, top indurated layer.

Photo 379 : Coupe du remplissage détritique principal de la grotte de Liangfengdong (Panxian, Guizhou) (cf. fig. 168).

The main detrital deposit of Liangfengdong cave (Panxian, Guizhou) (cf. fig. 168).

Photo R. Maire 2000

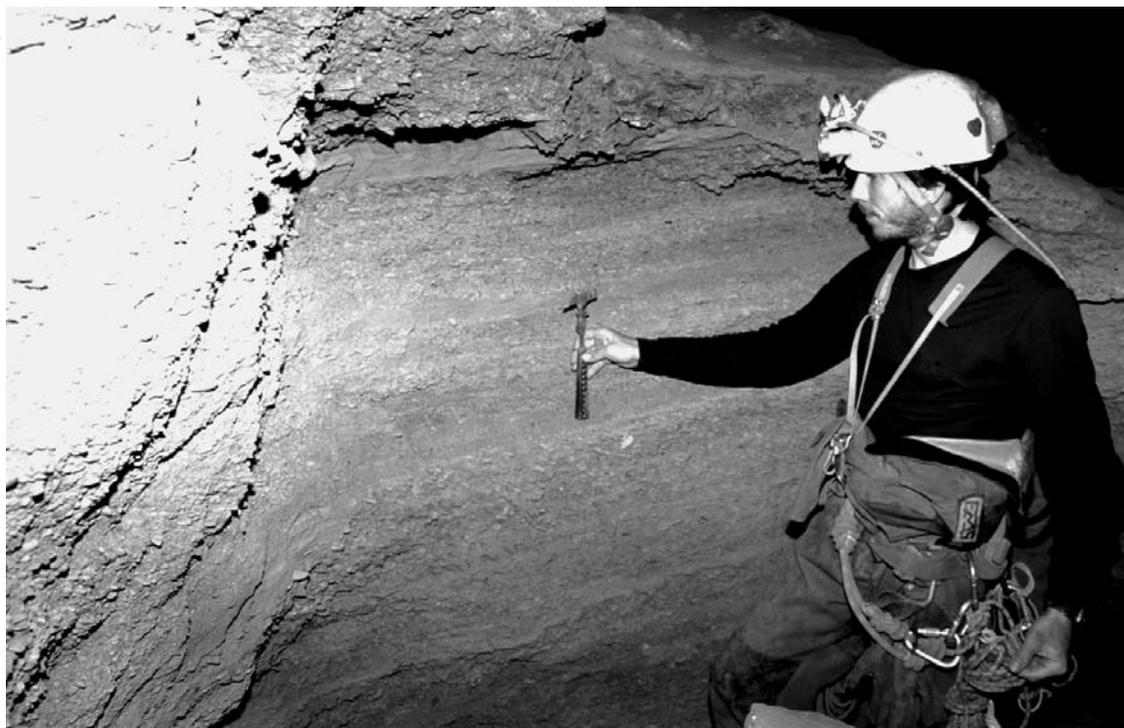


Photo 380 : Niveau fin dans les lits de graviers du remplissage de la grotte de Liangfengdong (Panxian, Guizhou) (cf. photo 379).

Clay layer into the gravel deposit of Liangfengdong cave (Panxian, Guizhou) (cf. photo 379)

Photo R. Maire 2000



lié à la gravité. Le réseau de Liangfengdong aurait pu fonctionner d'abord en trop-plein de la grotte-tunnel principale de Zhujiadadong. La succession de grosses séquences grossières indique un colmatage rapide. L'examen de la fraction sableuse des niveaux grossiers et fins montre dans tous les cas la prédominance des grains de sol et de cuirasses ferrugineuses. Cette érosion naturelle des sols est en liaison avec l'action des crues de paléomoussons. Le cortège minéral indique l'érosion des roches du bassin-versant allant du Trias au Permien. L'apatite pourrait provenir de débris organiques phosphatés (ossements, phosphorites) ou de l'altération des basaltes alcalins du Permien supérieur. La partie supérieure fine du colmatage montre un fonctionnement lacustre terminal.

En partant d'une chronologie relative depuis aujourd'hui, il est possible d'émettre des hypothèses chronologiques. La période holocène est responsable du concrétionnement fonctionnel, de l'induration sommitale du remplissage et de sa pédogenèse. La phase de colmatage fluviale et de décolmatage est très probablement en liaison avec

les phases de refroidissement climatique des stades isotopiques 2 et 4, voire 6. Seule la datation U/Th des concrétions les plus anciennes pourrait le préciser.

Le creusement phréatique et épiphréatique date probablement du Pléistocène moyen en raison de la chronologie relative évoquée et de la position faiblement perchée de la cavité par rapport à la rivière.

B. Enregistrement des crues dans une grotte de trop-plein (Laodong)

Située au sud de Baiguo, près de frontière du Yunnan, la grotte de Laodong est une émergence de trop-plein fonctionnant uniquement en saison des pluies. A l'aval, l'émergence pérenne présente un fort débit de 5 m³/s en moyennes eaux. Lors des crues de mousson, le niveau de l'eau remonte dans la cavité et s'écoule dans la galerie de sortie. Cet écoulement occasionnel a raviné un remplissage de 2 m d'épaisseur, révélant ainsi sa structure.

1. Litho-stratigraphie

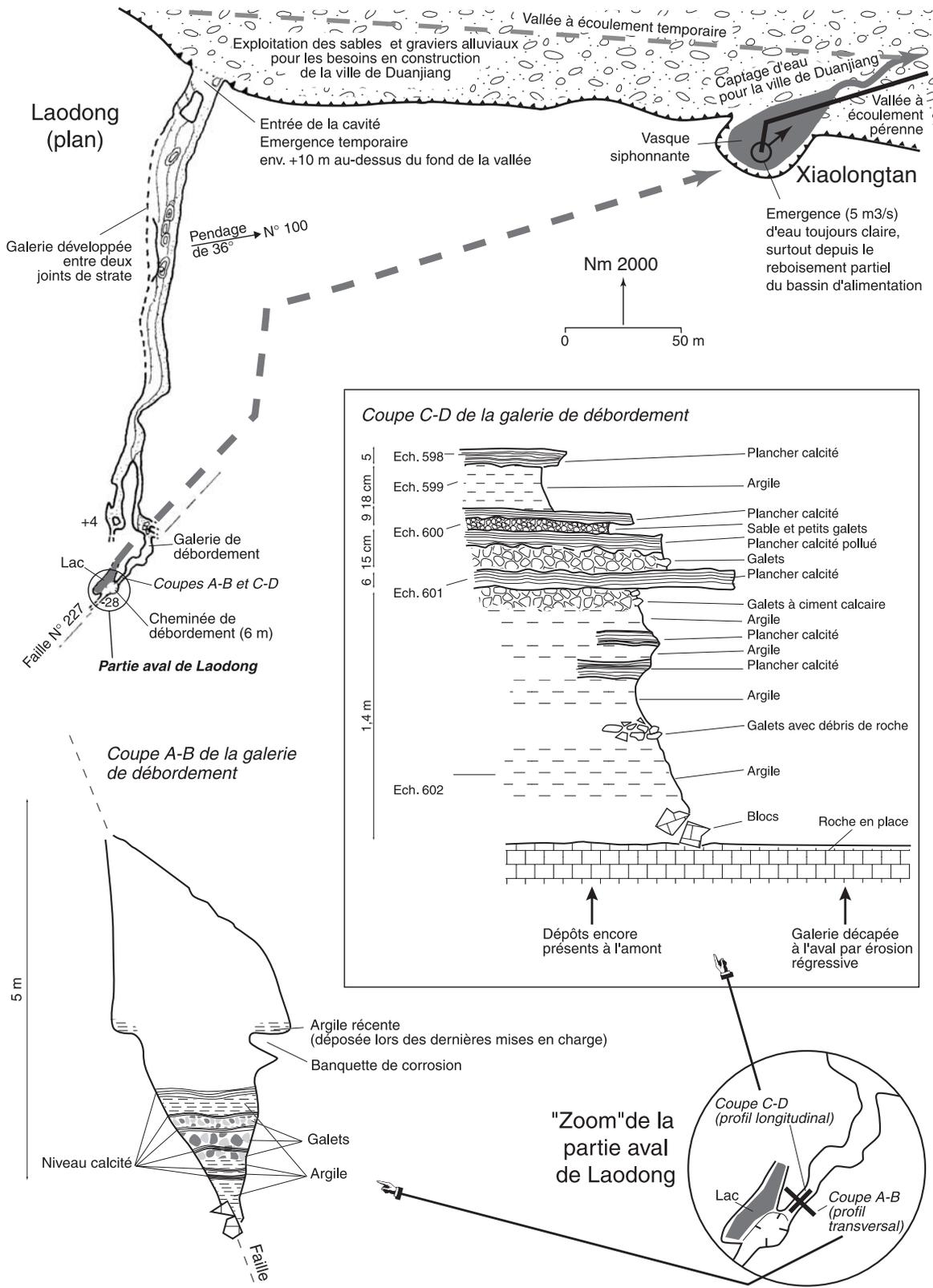
Le remplissage est constitué par une succession de couches argilo-limoneuses et parfois de sables et graviers séparés par des planchers détritiques calcités. De bas en haut, on observe (fig. 170) :

- la roche en place ;
- de petits blocs de base (0-20 cm) ;
- une couche argileuse assez épaisse (20-90 cm) avec un niveau intermédiaire de galets ;
- deux niveaux fins indurés par la calcite (90-120 cm) séparés une couche argileuse ;
- une couche argileuse surmontée par des graviers

Figure 170 : Enregistrement des crues dans la grotte de trop-plein de Laodong (district de Panxian, Guizhou).

Floods recorded in Laodong cave, overflow resurgence (Panxian County, Guizhou).

Figure N. Vanara topographie Panxian 2000 (p. 98).



de 1 à 2 cm de diamètre (120-140 cm) scellés par un mince plancher calcité (140-146 cm) formé par une calcite imprégnée d'impuretés (sables, argile) ;

- une nouvelle séquence (146-161 cm) constituée par une couche de graviers surmontée par un nouveau plancher détritique calcité ;
- une séquence identique, mais plus fine (161-170 cm) formée par un niveau de sables et graviers scellés par un mince plancher détritique calcité ;
- une séquence terminale constituée par une couche argileuse (170-188 cm) et un nouveau plancher calcité (188-193 cm).

L'argile de la dernière séquence (éch. 599, 170-188 cm) présente une fraction sableuse dont la détermination apporte des indications intéressantes sur l'environnement. On observe en majorité des grains de quartz et des grains limoneux, puis des grains de sols et de cuirasses accompagnés par des microdébris noirs correspondant à de microcharbons de bois. Le cortège minéral secondaire est constitué par du mica, du zircon, de la tourmaline, de la hornblende verte.

L'examen en lame mince d'un plancher calcité intermédiaire (140-146 cm, éch. 601) montre qu'il s'agit d'un grès, donc d'un niveau sableux induré. Le ciment calcitique est de nature microsparitique avec quelques géodes sparitiques (fente de dessiccation). Les grains sont de nature variée : débris de sols, quartz sédimentaire, microquartzite (1-3 mm), goëthite fibreuse (cristallites), roche calcaire, mica plus ou moins argilisé, chloritoïde (0,5 mm), apatite (1-2 mm, débris d'os). Cette diversité indique un transport d'éléments variés amenés par les crues.

2. Interprétation

On est en présence d'un dépôt typique qui a enregistré les crues de mousson. Ce remplissage n'est plus actif car il est raviné en période de crue, ce qui a mis en évidence sa structure interne par une coupe naturelle. Sa caractéristique est de présenter une succession de séquences détritiques de crue qui ont été déposées alors que la grotte fonctionnait en phase torrentielle et lacustre. Le processus d'induration des niveaux sableux a deux origines possibles :

- soit il se produit lorsque le conduit s'assèche entre deux phases de crue ;
- soit il se produit dans une période postérieure avec induration progressive des niveaux sableux, voire des niveaux à graviers (120-140 cm), par transfert de solutions saturées.

Dans les deux hypothèses, la grotte fonctionne en trop-plein, mais avec des phases noyées attestées par les argiles de décantation. La présence de micro-charbons de bois dans la séquence supérieure est un excellent indicateur d'une érosion des sols avec brûlis anthropiques très probables. Néanmoins ces brûlis peuvent être récents (XX^{ème} siècle) ou avoir plusieurs millénaires. Dans tous les cas, on est en présence d'un dépôt peu ancien, holocène à

récent, qui n'a pas encore été scellé par des stalagmites en raison du fonctionnement de trop-plein. Ce remplissage présente donc l'intérêt de représenter la phase de ravinement qui suit la phase de sédimentation dans un réseau fonctionnant en régime épinoyé.

Si on rapproche cet exemple de Laochang avec Liangfengdong, on peut conclure que la phase de ravinement qui a érodé le grand remplissage de Liangfengdong s'est produit lors d'une phase hydrologique de transition lorsque le conduit fonctionnait uniquement en trop-plein avec une faible capacité de sédimentation et une forte capacité érosive : écoulement libre avec effets de chasse d'eau pouvant décolmater un réseau.

C. Remplissages "récents" de crue de Daxiaodong à niveaux charbonneux

1. Lithostratigraphie

Située 20 km au sud-est de Panxian, Daxiaodong est une grande cavité fossile s'ouvrant par un puits d'effondrement incliné. Celui-ci donne accès à 110 m de profondeur à une vaste galerie fossile, de 40 m de large, dénommée la galerie du Biokarst.

Le fond de ce conduit est rempli par un colmatage de galets de plusieurs mètres d'épaisseur qui a été recoupé par un ruisseau à écoulement temporaire. Au sud, vers le fond de la galerie, le plancher est couvert par un dépôt argileux épais affecté par des entonnoirs de soutirage. Une coupe naturelle de 1 m montre de bas en haut (fig. 171) :

- une couche stratifiée d'argile brun-jaune (100-35 cm) ;
- une couche noire à microcharbons de bois de 2 à 3 cm d'épaisseur (35-32 cm) ;
- un niveau argileux marron lité (32-5 cm) ;
- une couche terminale argileuse avec fentes de dessiccation.

La fraction argileuse du dépôt argileux laminaire supérieur (éch. 643) montre en frottis de nombreux grains de sols, quartz et chailles. Le cortège minéral secondaire est pauvre : augite aciculaire, chlorite probable et minéral fibreux indéterminé (fig. 171, photo A). L'argile à fente de dessiccation (éch. 647) révèle la présence, outre des grains de sol habituels, de quartz très altérés avec des golfes typiques de corrosion (fig. 171, photos B1 et B2).

Un autre échantillon d'argile de décantation (éch. 639), prélevé à l'extrémité de la galerie, montre en frottis de nombreux agrégats de sols rouges ferrugineux (200-300 mm) à structure porphyrique. Chaque grain est constitué par des particules d'argile, de fer et de quartz noyées dans un plasma argilo-ferrugineux. On observe aussi des quartz dont certains sont très altérés (fig. 171, photos C1 et C2).

Figure 171 : Le remplissage de crue à niveau charbonneux de Daxiaodong (district de Panxian, Guizhou).

The flood deposit with charcoal layer of Daxiaodong (Panxian County, Guizhou).

Etude des minéraux en grains et photos R. Maire et N. Vanara, lab. Dymset-CNRS, topographie Panxian 2000 (p 109).

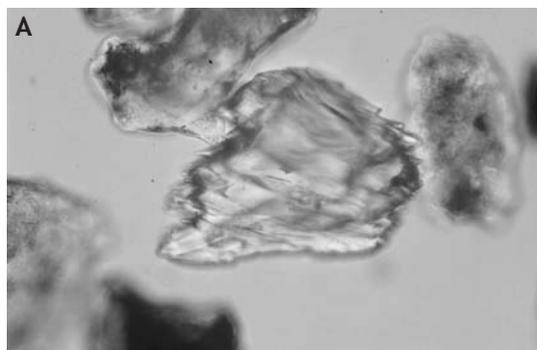
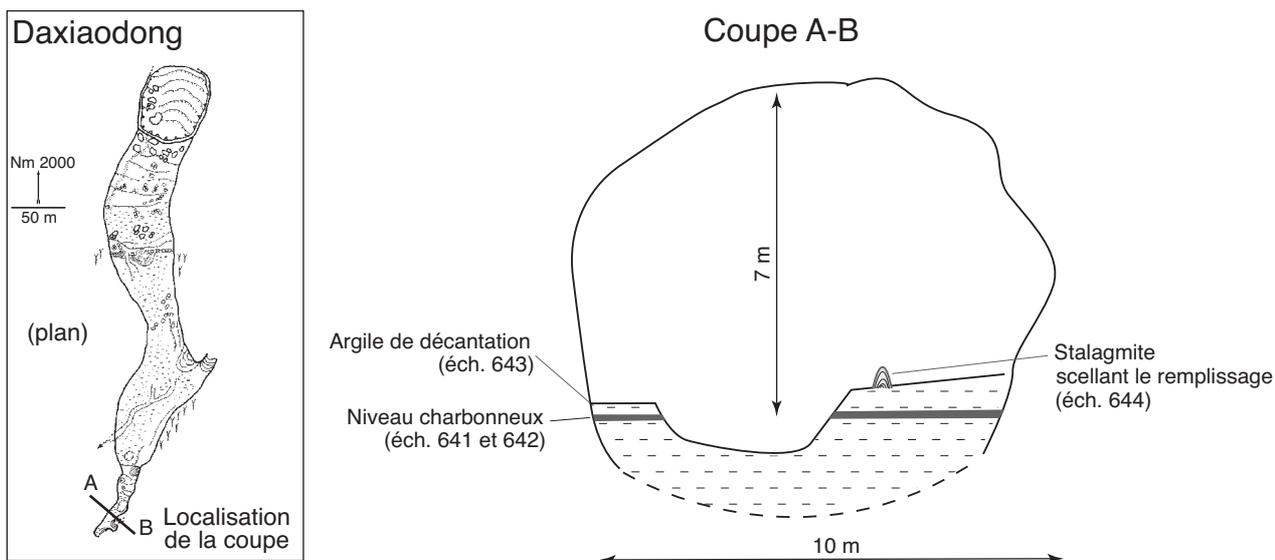
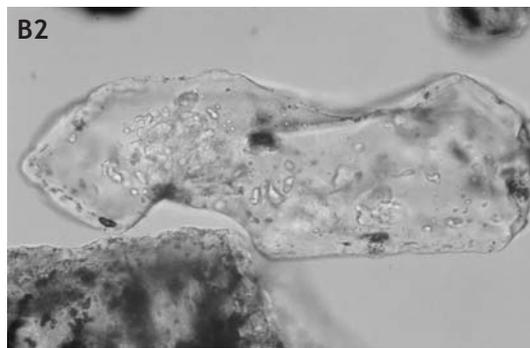
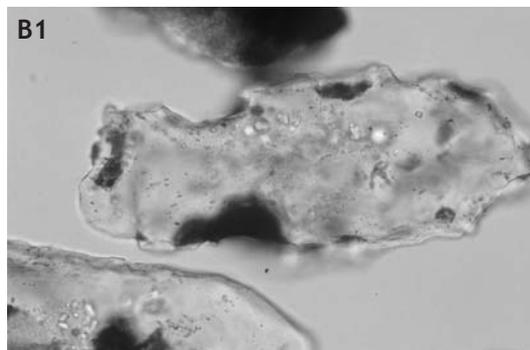
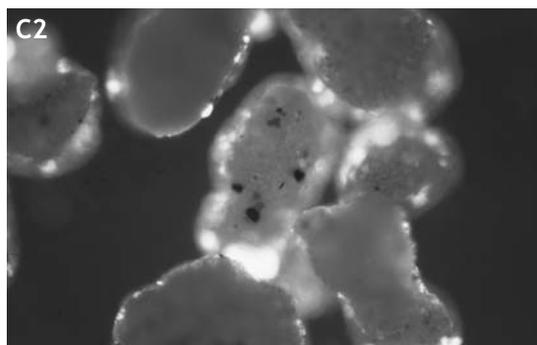
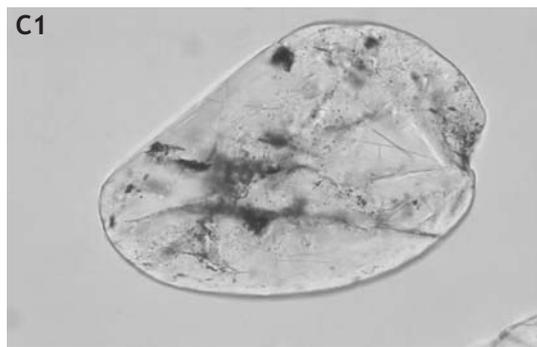


Photo A : Echantillon 643, dépôt argileux laminaire supérieur. Augite aciculaire de 160 μm (x 400, LPNA).

Sample 643, top clayey rhymite. Acicular augite 160 μm long.



Photos B1 et B2 : Echantillon 647, argile de fente de dessiccation. Quartz corrodés.

B1 : Quartz bipyramidé très altéré de 290 μm à golfes de corrosion incrustés d'oxyde de fer (x 400, LPNA).
B2 : Autre quartz bipyramidé altéré (x 400, LPNA).

Sample 647, clay of shrinkage crack. Corroded quartz.

B1 : Bipyramidal quartz very altered (290 μm) with corrosion gullies.
B2 : Other altered bipyramidal quartz (320 μm).

Photos C1 et C2 : Echantillon 639, autre exemple d'argile de décantation.

C1 : Remarquable exemple de quartz arrondi et usé par l'altération pédologique, longueur 240 μm (x 400, LPNA).
C2 : Grains argilo-ferrugineux de 200 μm de diamètre (x 200, LPNA).

Sample 639, other example of decantation clay.

C1 : Remarkable example of rounded and worn quartz by pedologic alteration, 240 μm long.
C2 : Clayed-ferruginous grains 200 μm diameter.

2. Interprétation

Le niveau à charbons de bois, situé vers 30-40 cm de profondeur, correspond à une phase récente de déforestation et brûlis. Il s'agit probablement de l'enregistrement de la phase 1978-80 marquant la réforme agraire de Deng Xiao Ping. Le même exemple est connu pour les niveaux à charbons de bois de poljés décrits par exemple dans le Yunnan, au nord de Lijiang (photo 326, p. 295). L'étude des minéraux en grains de la fraction sableuse de la séquence supérieure et des argiles de décantation montre des minéraux divers. Certains quartz présentent des faciès très altérés : golfes de corrosion tapissés d'hydroxyde de fer ou usure régulière par altération. Ces indices témoignent du remaniement de très anciennes altérites qui ont digéré les anciennes couvertures de roches non carbonatées. La présence d'augite aciculaire témoigne du rôle de la couverture volcanique d'Emeishan.

IV. Les dépôts chimiques souterrains

Les concrétions des karsts de Chine constituent un sujet d'étude très vaste. Nous insisterons uniquement sur certains aspects remarquables comme les concrétions algaires des entrées de grottes liées à la lumière, certains dépôts d'aragonite et enfin les concrétions actives qui renseignent sur l'évolution actuelle et historique de l'environnement avec conjonction des impacts climatiques et anthropiques.

A. Les concrétions algaires phototropiques

Ces types de concrétions sont remarquables et très répandues dans les karsts de Chine subtropicale et tropicale où elles ont été décrites sous le vocable de concrétions phytokarstiques [Zhang Shouyue, 1988]. Plusieurs types morphologiques et micromorphologiques ont été partiellement étudiés, notamment au microscope, après l'expédition Gebihe 89 [Maire, 1991].

Ces concrétions ont un point commun fondamental : elle sont dirigées vers l'extérieur, vers la lumière du jour. Ce phototropisme n'est pas minéral, mais d'origine biologique, en l'occurrence algaire. On observe :

- des concrétions de sommet de porche décimétriques à métriques, inclinées vers l'extérieur ;
- des concrétions algaires plus petites, toujours directionnelles, situées à l'intérieur des grottes, mais dans la zone influencée par la lumière ;
- des formes d'altération algaire sur paléoconcrétions internes exposées à la lumière du jour.

1. Les concrétions algaires se nourrissant de l'altération de la roche : exemple de Hujidong

- **Site.** La grotte étudiée est celle de Hujidong qui se situe dans le sud du district de Panxian. Cette grotte sèche, longue de 800 m, s'ouvre à 1 650 m dans les calcaires stratifiés du Trias. La grande galerie d'entrée descend à 20-25° dans la direction du pendage. A 70 m du porche, la paroi de droite est couverte de milliers d'aiguilles grisâtres de 2 à 5-7 cm de long, toutes inclinées en direction de la lumière du jour (fig. 172, photo A). On est apparemment en présence d'une surface calcaire très altérée et découpée.

Si l'on casse une aiguille au niveau de sa base, on constate que la partie allongée, de teinte grise, repose sur un substrat clair correspondant à la roche en place. Découpée longitudinalement à la scie, la section polie montre mieux l'organisation générale (fig. 172, photo B). La partie grise présente une organisation fruste avec des plages amorphes et des secteurs laminés. Le contact avec le substrat calcaire révèle la présence de petits golfes de dissolution et parfois de petits éléments calcaires résiduels flottant dans la masse de la calcite amorphe.

En lame mince (éch. 627), le contact calcaire clair et calcite grise est également très net et se présente comme un front d'altération. En épifluorescence, on observe une opposition remarquable entre une calcite grise très luminescente (à cause de la matière organique) et une calcite claire (roche en place) non luminescente (fig. 172, photo C). Les zones laminées se présentent sous la forme de bourgeons allongés. Les lamines de croissance ont des dimensions allant de 15 à 75 μm d'épaisseur. En fait, il faut décomposer ces lamines en doublets. Chaque doublet est formé par une lamine grise très luminescente et une lamine claire non luminescente. La lamine luminescente mesure 1 à 3-4 μm d'épaisseur. Dans certaines séquences, les doublets de 15 μm d'épaisseur montrent à fort grossissement des microdoublets de 2 à 3 μm bien séparés par de vrais microlamines de 1 μm d'épaisseur également luminescente (fig. 172, photos F et G). Un examen attentif permet de découvrir de nombreux filaments noirâtres de 10 à 100 μm de long sur quelques μm de large. Ces algues traversent notamment les zones laminées et microlaminées (fig. 172, photo D).

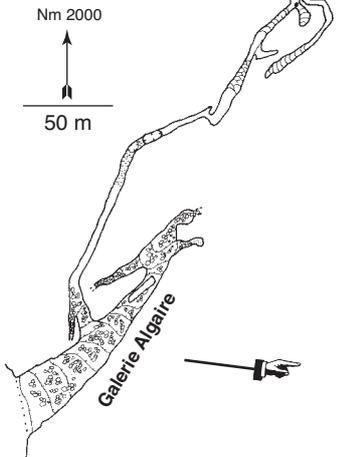
- **Genèse.** La morphologie directionnelle et l'examen micromorphologique montrent que l'on a bien affaire à des concrétions algaires sensibles à la lumière du jour. Ce sont des algues microscopiques filamenteuses qui altèrent la roche calcaire, puis la redéposent sous une forme amorphe, en oncolites ou localement en bourgeons finement laminés. En outre, la matière organique de la trame algaire est attestée par la forte fluorescence de la calcite grise

Figure 172 : Les concrétions algaires phototropiques de Huijiaodong (district de Panxian, Guizhou).

The algal speleothems in Huijiaodong (Panxian County, Guizhou).

Figure et photos R. Maire, lab. Dymset-CNRS, topographie Panxian 2000 (p. 116).

Huijiaodong (Plan)



**Coupe de la galerie Algair
Section of Algal gallery**

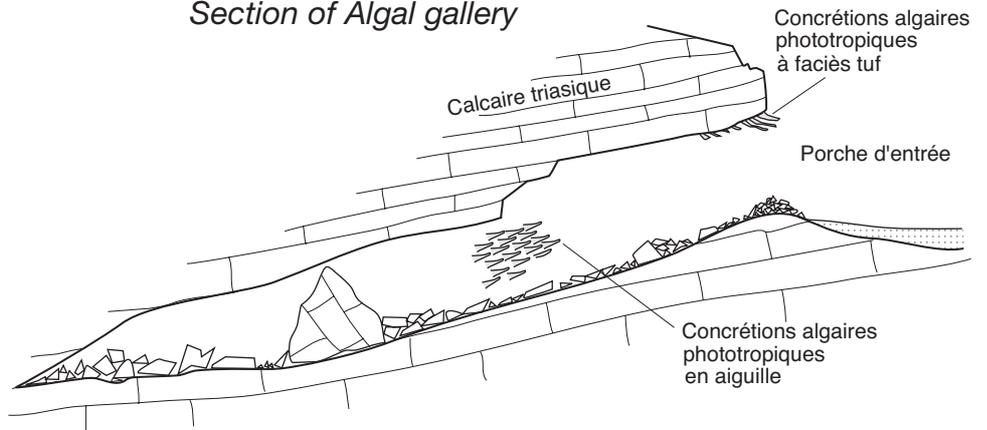


Photo A : Concrétions algaires en aiguilles orientées vers la lumière (dimension des aiguilles : 3 à 7 cm).
Algal concretions oriented because of daylight (needles 3 to 7 cm long).

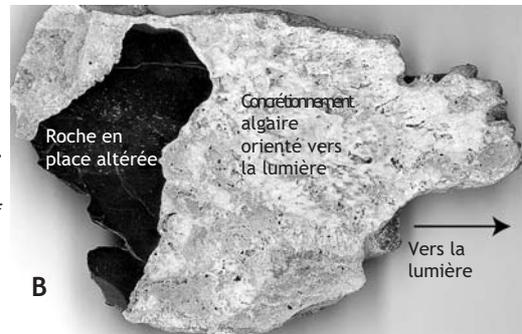


Photo B : Section polie d'une concrétion algair.
Polished section of a algal speleothem.

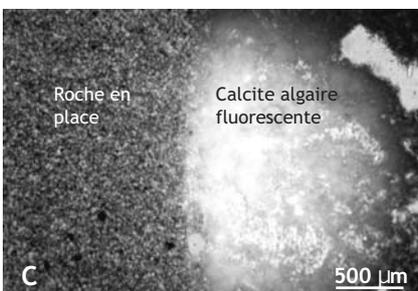


Photo C : Contact entre la roche en place altérée et la calcite algair (lame mince observée en épifluorescence).
Contact between limestone and algal calcite (thin section in epifluorescence).

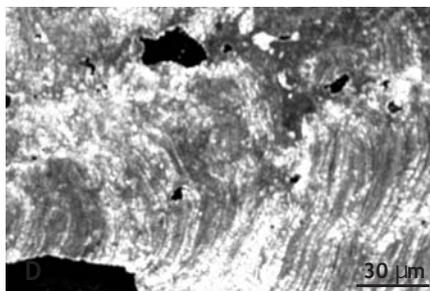


Photo D : Filaments algaires au sein de la calcite micritique.
Algal filaments in the micritic calcite.

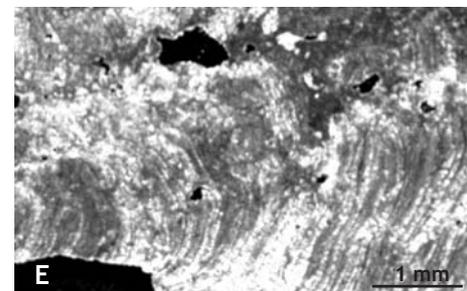


Photo E : Bourgeon de calcite microrhythmée.
Bud of microlaminated calcite.

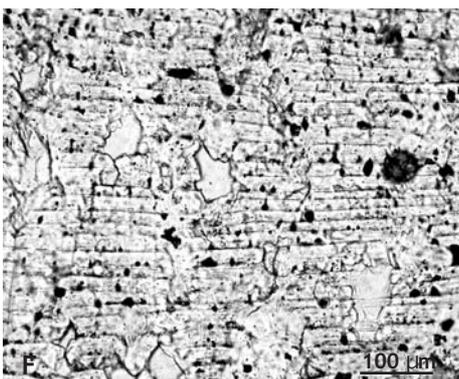


Photo F : Microlamines de calcite algair.
Microlaminites of algal calcite.

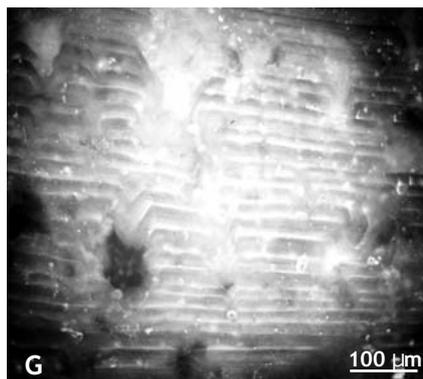


Photo G : Même photo que F vue en épifluorescence. Chaque lamine est constituée par une partie fluorescente (en blanc, car contenant de la matière organique) et une partie non fluorescente (partie sombre).
Like photo F, in epifluorescence. Each laminite has a white part (with organic material) and a dark part.

amorphe, mais également des lamines grises. Ainsi la photosynthèse algale provoque d'abord une biocorrosion de la paroi exposée à la lumière, puis une bioconstruction de calcite phototropique de nature variable. Les grosses stalactites tuffacées de sommet de porche, de morphologie inclinée, ont une origine identique.

Les séquences laminées sont d'un intérêt particulier. Les doublets de 15 à 75 μm pourraient avoir une signification annuelle et saisonnière. Les subdivisions en microdoublets soulignés par des microlamines de 1 μm sont remarquables par leur finesse. Leur signification hydro et bioclimatique cyclique suggère une répétitivité intersaisonnière : épisodes pluvieux, de condensation, etc., soulignés par des apports de matière organique en gel bien visible en épifluorescence.

2. La biocorrosion algale des concrétions : le cas de Tianshengqiao

- **Site et micromorphologie.** La grotte-tunnel perchée de Tianshengqiao est située au nord du district de Panxian. Elle constitue un tronçon asséché de l'ancien parcours de la Gedahé souterraine localisé plus de 100 m au-dessus de la rivière hypogée actuelle à cause de la surrection tectonique. L'éro-

sion du plateau a provoqué deux effondrements sous la forme de deux avens qui ont isolé un pont naturel. Dans la galerie, 40 m en amont du pont naturel, un massif stalagmitique blanchâtre et d'aspect ancien, de 3 m de haut, est présent à la base de la paroi sud. La concrétion, d'aspect altéré, présente une surface irrégulière à petites dépressions coalescentes ressemblant à des taffonis. Ce secteur est baigné par la lumière du jour issue du premier aven dont le diamètre mesure 20 m (fig. 173).

En lame mince (éch. 595), on observe un contact d'altération remarquable entre la calcite blanche fibreuse, peu ou pas altérée et une calcite désorganisée très particulière formée par des amas irréguliers de calcite amorphe grise et des boulettes de micrite séparés par des plages de calcite sparitique. A fort grossissement, on observe des filaments algaires de quelques micromètres de large s'infiltrant dans la calcite blanche (photo 383). La matière organique est attestée par sa forte luminescence en lumière bleue (épifluorescence) (photo 382). Cette luminescence est visible aussi en lumière verte, mais pas avec la lumière UV.

- **Genèse.** Le type d'altération observé au microscope est exemplaire. Il constitue un modèle d'altération d'une concrétion souterraine soumise à une biocorrosion par des algues se développant grâce à la pénétration de la lumière du jour. La digestion de la calcite colonnaire en calcite amorphe ou micritique n'a pas donné lieu à des concrétions phototropiques dirigées vers la lumière comme dans l'exemple de Hujiaodong. Cette activité de biorecristallisation, par des micro-organismes à activité photosynthétique, provoque une micritisation que l'on pourrait comparer à des "boulettes de déjection". Une calcite macrocristalline, de type mosaïque (sparite), s'est formée ultérieurement entre les amas biomicritiques. Le processus se résume donc à une altération directe de la surface de la roche par biodissolution algale et à une redéposition des carbonates sous forme amorphe ou sous forme oncolitique.

B. Les concrétions actives

Les stalagmites actives des karsts subtropicaux de Chine sont d'un grand intérêt car leur étude microséquentielle permet d'analyser les signaux de l'évolution de l'environnement enregistrés au cours des dernières décennies et derniers siècles à une époque marquée par le croisement des incidences climato-anthropiques.

1. Croissance rapide en milieu peu filtrant (rhéxistase) : stalagmite active récente de Liangfengdong

Une stalagmite active haute de 9 cm a été prélevée dans le réseau inactif de Liangfengdong dans le sud du district de Panxian (éch. 620). La concrétion scelle un remplissage alluvial qui a été

Photos 381-382-383 :
Echantillon 595, coulée
stalagmitique de
Tianshengqiao
biocorrodiée par les algues
(influence de la lumière).

Sample 595, biocorroded
flowstone of
Tianshengqiao (Panxian,
Guizhou).

Photos R. Maire et N. Vanara,
lab. Dymset-CNRS

Photo 381 : Niveau sombre
dans la calcite sparitique
(x 200, LPNA).

Dark layer in the sparitic
calcite.

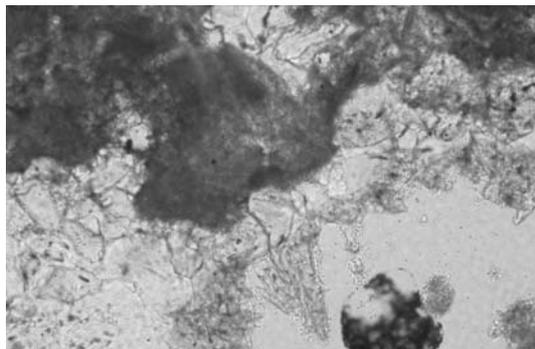


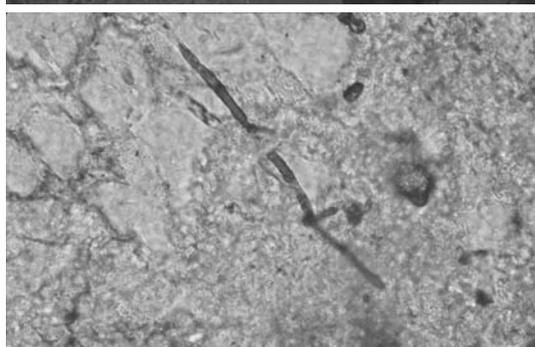
Photo 382 : idem, mise en
évidence de la matière
organique par
épifluorescence
(x 200).



Idem, the organic matter is
visible by epifluorescence.

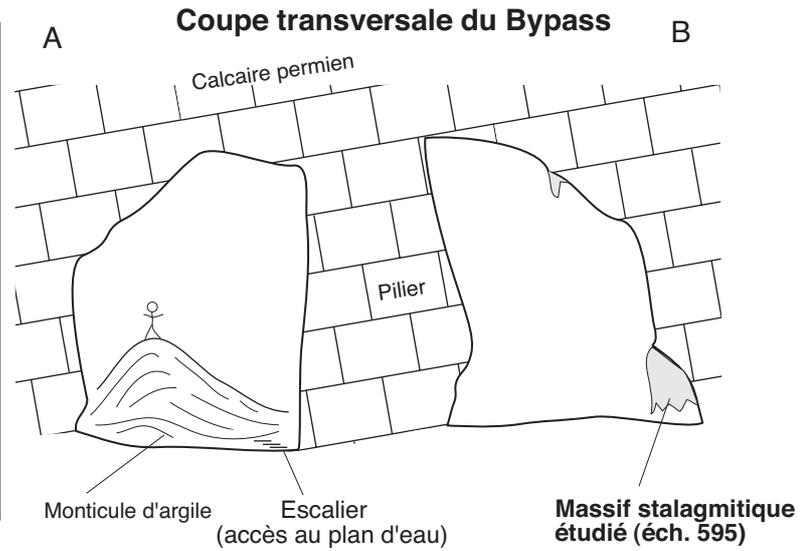
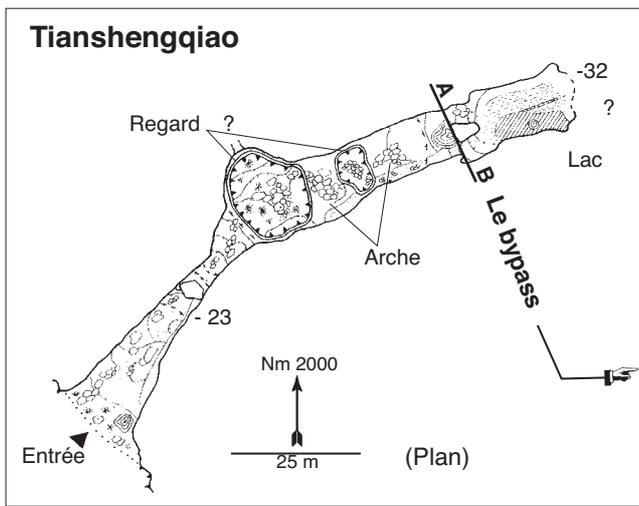
383 : Filament algair de
220 μm dans la calcite
sparitique (x 400, LPNA).

Algal filament in the
sparitic calcite
220 μm long.



**Figure 173 : Biocorrosion algale dans les spéléothèmes de Tianshengqiao (Panxian, Guizhou).
Algal biocorrosion in speleothems of Tianshengqiao (Panxian County, Guizhou).**

Figure N. Vanara et photos R. Maire, lab. Dymset-CNRS, topographie Panxian 2000 (p. 66).



**Etude de l'échantillon 595.
Microscopic study of sample 595.**

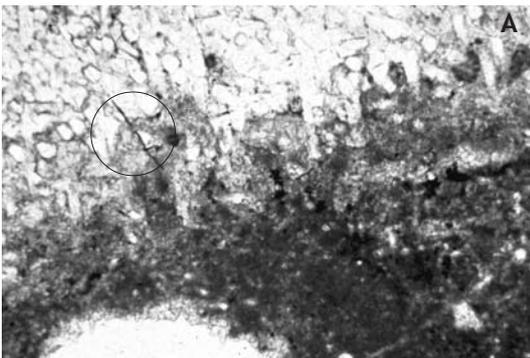


Photo A : Contact entre la calcite blanche saine et la calcite algale grise (cercle de diamètre 200 μ m).
Contact between white calcite and grey algal calcite (circle 200 μ m diameter).

Photo D : Calcite algale micritique grise de la recristallisation séparée par de la calcite sparitique secondaire.
Recrystallized micritic algal grey calcite separated by secondary sparitic calcite.

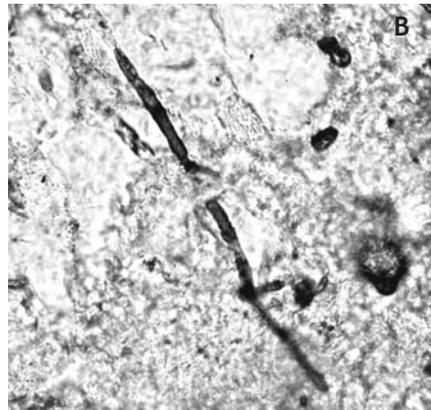
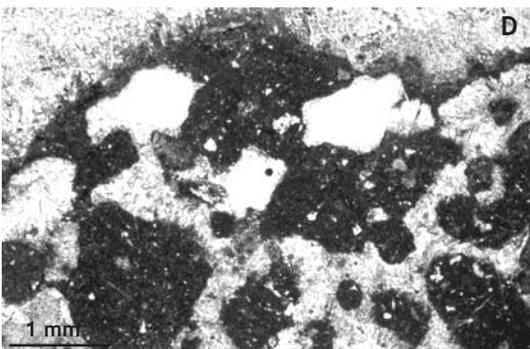


Photo B : Filament algale pénétrant dans la calcite saine (carré = 200 μ m).
Algal filament into the non altered calcite (square = 200 μ m).

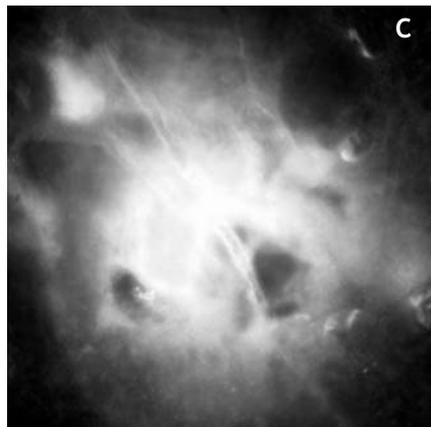


Photo C : Même photo que B en épifluorescence. Présence de matière organique en gel autour du filament algale (carré = 200 μ m).
Same photo as B in epifluorescence. Gel of organic material around the algal filament (square = 200 μ m).

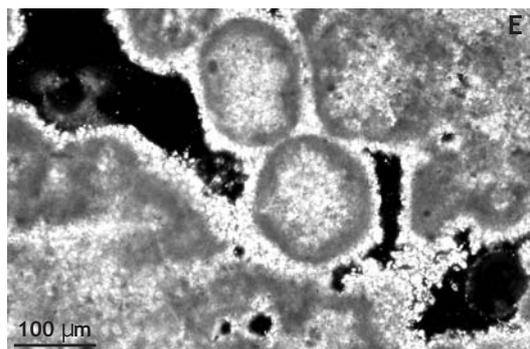
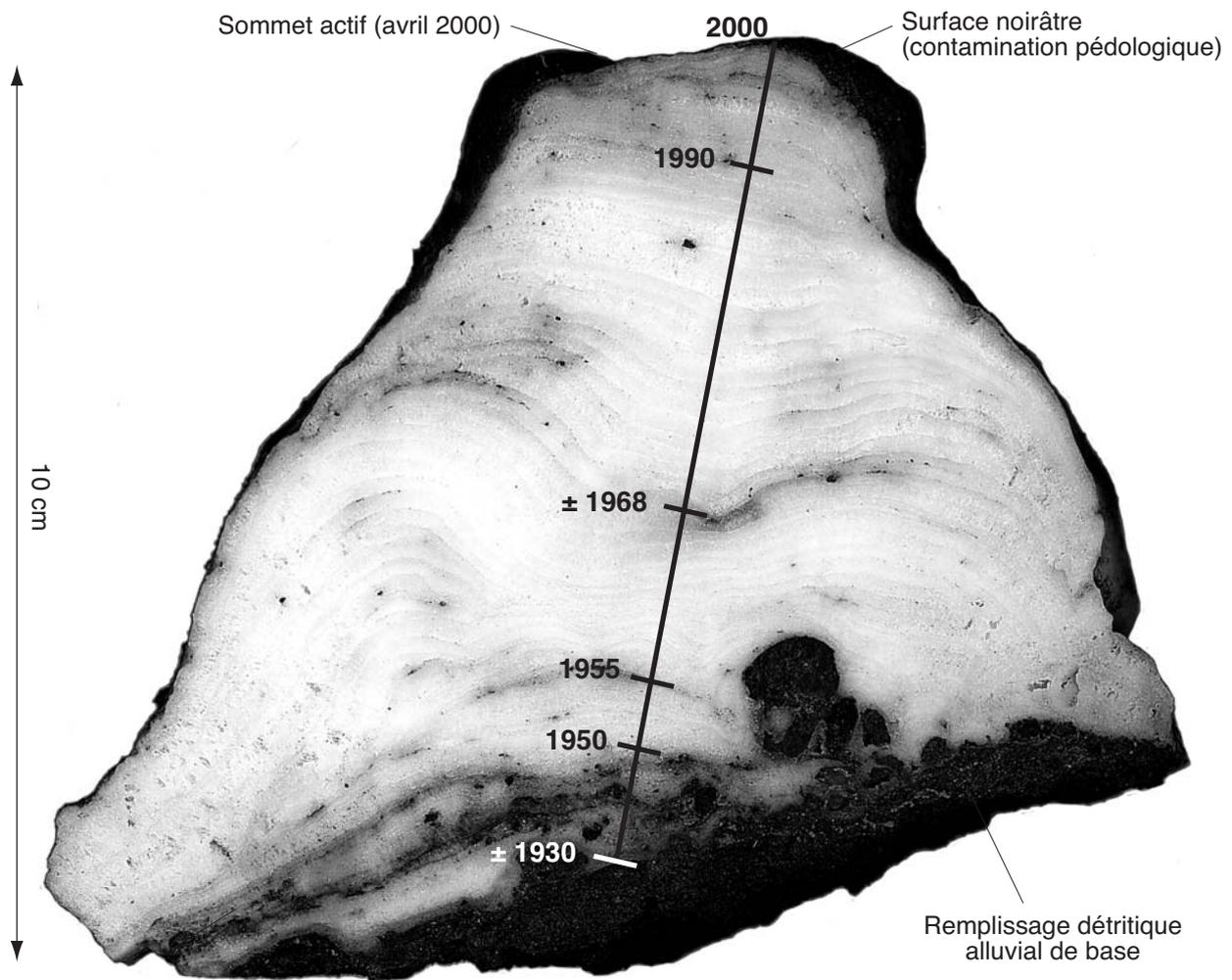
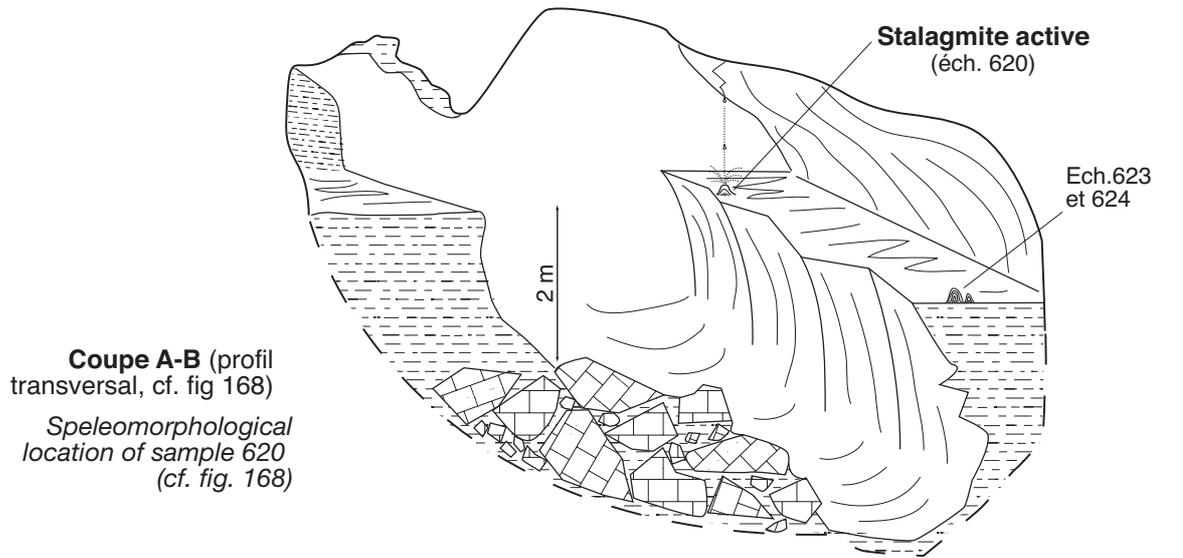


Photo E : Boulettes de micrite formées par biodissolution de la calcite et recristallisation.
Micritic pellet formed by biocorrosion of calcite and recrystallization.

Figure 174 : Stalagmite active à croissance rapide dans Liangfengdong (Panxian, Guizhou).
Exemple of active stalagmite with quick growth in Liangfengdong cave (Panxian, Guizhou).

Figure R. Maire et N. Vanara, lab. Dymset-CNRS



Début du concrétionnement
 vers 1925-1930

Section polie de la stalagmite active (éch. 620)
Polish section of the active stalagmite (éch. 620)

raviné par une ancienne rivière souterraine (supra : III.A.).

a. Structure de la croissance

Coupée dans le sens longitudinal, la section polie montre une structure rythmée remarquablement nette (fig. 174). Le caractère laminé est marqué par la succession de doublets de lamines apparaissant déjà à l'oeil nu. Au vidéomicroscope (examen direct de la surface polie), on constate que chaque doublet de 1 mm d'épaisseur moyenne est formé par :

- une lamine grise, épaisse et poreuse, formée par un entrelacs de cristaux columnaires. Comme la lumière est en partie piégée par cette structure poreuse, la lamine prend une teinte grisâtre ;
- une lamine blanche fine, dense, qui reflète toute la lumière.

En lame mince, la nature des doublets est confirmée (photo 384). La lamine épaisse montre une structure colonnaire poreuse plus ou moins entrecroisée. La porosité est de l'ordre de 20 à 30 %. La lamine fine correspond à une calcite identique, mais non poreuse, séparant deux lamines poreuses épaisses. Bien que formée par une calcite très blanche, la concrétion a capté des contaminations détritiques isolées ou concentrées sur des niveaux.

b. Chronologie et signification environnementale

Le sommet de la stalagmite démarre en l'an 2000 (prélèvement avril 2000). Par comptage des lamines, on constate que cette concrétion a enregistré pratiquement tout le XX^{ème} siècle. Chaque doublet de lamine a une signification annuelle. La lamine épaisse poreuse (0,4 à 1,2 mm) correspond à la saison humide de mousson à croissance rapide. On ne discerne pas ici de microlamines correspondant aux épisodes pluvieux. La lamine fine (0,1-0,2 mm), non poreuse, traduit la saison sèche hivernale. En partant du sommet daté, on observe les phases suivantes :

- de 2000 à 1990, doublets annuels relativement irréguliers avec contaminations pédologiques sur 5 à 6 lamines ;
- de 1990 à 1970-69, ensemble de doublets épais avec des contaminations pédologiques entre 1974 et 1978 ;
- de 1969 à 1949-1950, doublets épais à dilatés ; nette contamination pédologique vers 1968 et 1955 ;
- de 1949-50 vers 1920-25, base contaminée à doublets de calcite moins épais.

Les grains observés, isolés ou formant des niveaux contaminés, sont constitués par des particules de sol (argiles), de cuirasses (fer) et par un cortège minéral à base de quartz, calcite, chaille, mica. En épifluorescence, on constate que la matière organique en gel est associée à ces intrusions pédologiques.

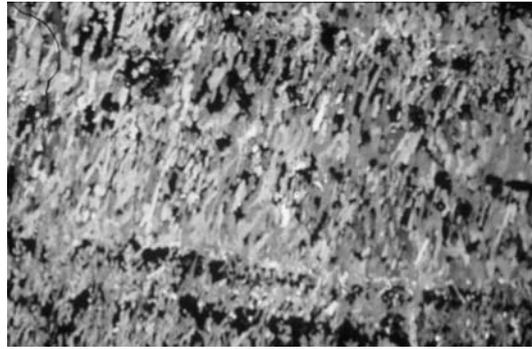


Photo 384 : Echantillon 620, stalagmite active de Liangfengdong. Mise en évidence des couples de lamines annuelles. Les lamines poreuses épaisses (1,2 mm) correspondent à la saison humide (croissance rapide). Les niveaux fins et non poreux (100 µm) correspondent à la saison sèche (interruption ou croissance lente). (x 25, LPA).

La présence de contaminations pédologiques, dispersées ou sur des niveaux précis dans l'ensemble du concrétionnement, indique que l'environnement externe (sol, végétation) a été en condition plus ou moins rhexistasique pendant le XX^{ème} siècle. Le milieu étant peu filtrant, il a laissé passer des débris pouvant atteindre 0,2 à 0,5 mm. Ces signaux enregistrés sur cette concrétion donnent d'abord une indication locale. Par contre, le fonctionnement général est conforme à l'état de déséquilibre du milieu rural des karsts du Guizhou au cours du XX^{ème} siècle en raison des phases successives de déforestation, déjà très avancée il y a un siècle.

Sample 620, active stalagmite of Liangfengdong cave with annual doublets. Porous laminae 1.2 mm thick (wet season) and non porous and thin laminae 100 µm (dry season).

Photo R. Maire et N. Vanara, lab. Dymset-CNRS

2. Croissance en milieu filtrant (biostasie) : stalagmite de Bianfu

Une stalagmite active récente bifide a été prélevée (éch. 590) dans la galerie sismique de la grotte fossile de Bianfudong (fig. 175). Le contexte géomorphologique correspond à l'anticlinal faillé de Biyun, armé par les calcaires du Permien inférieur, situé au sud-est de Panxian (fig. 21, p. 70). Haute de 15 cm, la stalagmite montre en section polie une calcite laminée blanche non contaminée. Sur lame mince, on constate que la rythmicité est

Photo 385-386 : Photos Ua, Ub : Echantillon 590, stalagmite active de Bianfudong (Panxian, Guizhou).

Sample 590, active stalagmite of Bianfu cave.

Photos R. Maire et N. Vanara, lab. Dymset-CNRS



Photo 385 : Autre exemple de couples de lamines annuelles avec lamines poreuses de saison humide et lamines fines de saison sèche (x 25, LPA).

Other example of annual doublets with porous laminae (wet season) and thin laminae (dry season).

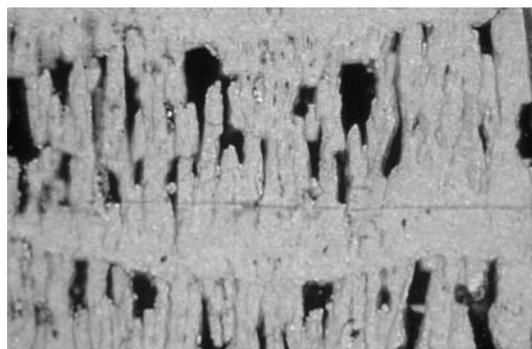


Photo 386 : Détail montrant la structure d'un doublet annuel de 500 µm d'épaisseur. La lamine poreuse épaisse correspond à une croissance rapide. La partie intermédiaire non poreuse marque une interruption de saison sèche (x 100, LPA). *Structure of an annual doublet. The porous laminae (quick growing) is separated by an interruption because of dry season.*

formée par une succession de doublets de 0,5 à 0,7 mm d'épaisseur chacun. Un doublet est constitué comme précédemment par :

- une lamine poreuse épaisse, grise ;
- une lamine dense fine soulignée au centre par une discontinuité.

Cette concrétion présente une calcite pure à croissance rapide symbolisée par les doublets à lamine poreuse. L'absence de contamination pédologique suggère un milieu bien filtrant lié à un milieu extérieur, non cultivé, recouvert par la végétation.

V. Les indicateurs sismo-tectoniques

Les phénomènes sismo-tectoniques visibles sous terre ont un immense avantage pour le spécialiste car ils ont généralement une apparence de grande fraîcheur et leur netteté peut être remarquable. Là encore est vérifié le concept de milieu enregistreur à l'abri de l'érosion externe. Ces indices vont des sismes instantanés (dépôts modifiés par les séismes) aux figures de tension (cisaillement) et d'éclatement de la roche et des concrétions qui sont la manifestation d'effets progressifs et/ou retardés.

Les phénomènes sismo-tectoniques regroupent tous les effets instantanés ou décalés dans le temps liés aux ruptures de contraintes tectoniques : tremblements de terre ou bien cisaillements, éclatements et élargissement des fissures au contact ou au voisinage des vides karstiques par libération mécanique de l'énergie tectonique. Des phénomènes mécaniques liés à la gravité peuvent aussi provoquer des déplacements et des cisaillements au sein des concrétions : affaissement du plancher, rupture par poids excessif d'un massif stalactite, décompression d'une paroi par appel au vide ou par déblaiement d'un remplissage, etc. Un examen attentif permet généralement de déterminer si l'origine est sismo-tectonique ou purement gravitaire. Mais des confusions sont possibles. Ainsi un léger affaissement du plafond peut provoquer l'éclatement du sommet d'un pilier stalagmitique.

A. Processus sismo-tectoniques et géologie

1. Rappel de sismo-tectonique

Les contraintes tectoniques libérées en profondeur par relaxation brutale le long des plans de faille séparant deux blocs provoquent des secousses instantanées se répercutant en surface. Ce "rebond élastique" induit des ondes sismiques de différentes natures, d'abord des ondes de volumes affectant toute la masse rocheuse. Ce sont les ondes longitudinales (ou ondes P) et les ondes transversales

(ou ondes S). Les ondes P (sonores) sont des vibrations principales ou primaires liés aux processus de compression ou de distension. Les ondes S, ou secondaires, sont des ondes de cisaillement. Ces ondes qui affectent l'ensemble du volume des terrains sont ensuite relayées en surface par des ondes superficielles qui se propagent comme des ondes circulaires à la surface d'un plan d'eau.

Les ondes de surface sont de deux types : les ondes de Rayleigh qui fonctionnent comme une houle et les ondes de Love qui ont un déplacement latéral, perpendiculaire à la propagation. Dans les cavernes, on a souvent dit que les séismes n'ont pas d'action. Cependant, de nombreuses observations effectuées dans des cavités du monde entier, notamment en zone sismique, montrent qu'il existe un lien inductif à partir des chutes de spéléothèmes : cisaillement directionnel de stalagmites, chute de stalactites et fistuleuses produisant notamment des cimetières de concrétions. On sait aussi qu'il existe des effets de site liés aux conditions géologiques et géomorphologiques locales.

Ainsi chaque cavité, en fonction de sa situation et de sa morphologie, ne réagit pas de la même façon aux ondes sismiques. Un débat est en cours. En effet, des personnes présentes dans des cavités lors d'un séisme, disent n'avoir rien observé, concluant donc que les séismes n'ont pas d'influence dans les cavernes. D'autres ont entendu des grondements, probablement l'effet sonore des ondes P dans l'atmosphère d'une caverne. Comme d'habitude, la réalité est plus complexe.

En plus de l'incidence des séismes, il faut ajouter les processus non instantanés que l'on peut regrouper sous l'appellation de phénomènes sismo-tectoniques. Généralement, il s'agit de cisaillements de parois et de concrétions liés aux rejeux de faille et à des mouvements compressifs ou distensifs. La libération de l'énergie tectonique au voisinage d'un vide va permettre une ouverture des fractures de cisaillement par décompression. Ce mouvement n'est pas instantané, mais il est rapide à l'échelle géologique ou de l'histoire de la spéléogénèse d'un réseau. Le mélange des processus gravitaires purs et des processus sismiques et sismo-tectoniques pose parfois des problèmes d'interprétation.

2. Les conditions sismo-tectoniques dans le Yunnan et le Guizhou

La carte sismique de la zone Yunnan-Guizhou montre une grande disparité entre les deux provinces. L'ensemble du Yunnan est très sismique car il est au contact de la chaîne himalayenne ; notamment pour le territoire situé à l'ouest de la longitude de Kunming où les épicentres de séismes (magnitude de 5 à 8-9) sont très nombreux le long des axes faillés et de plissement, en relation avec le "poinçonnement" himalayen contre le bloc stable asiatique.

Dans le Guizhou, la sismicité est beaucoup plus faible. Le cas du district de Panxian et des environs, localisé à la frontière du Yunnan, en bordure du plateau du Yunnan, présente néanmoins une certaine sismicité avec des tremblements de terre récents (depuis 1990) dont la magnitude peut atteindre 6. C'est d'ailleurs dans ce secteur, riche en grandes cavités, que les indices sismo-tectoniques souterrains sont les plus visibles. Des séismes majeurs ont donc pu se produire au cours de l'Holocène et du Pléistocène supérieur. Nous étudions deux sites endokarstiques, alignés sur la grande faille de Panxian, montrant des indices sismo-tectoniques de différentes natures.

B. Les sismites du réseau de Liangfeng-Xingsuo-Bianfu

- **Contexte tectonique.** La grotte de Bianfu fait partie du réseau de Liangfeng-Xingsuo-Bianfu (2,5 km) situé 6 km au sud-ouest de Panxian. Cette cavité fossile perchée est axée, comme le système actif de la perte de Biyun, sur un grand accident tectonique transverse appelé faille de Panxian. Cette fracture affecte le rebord sud-est de l'anticlinal de Biyun qui s'allonge de la frontière du Yunnan (Lemin) à Panxian. Dans la partie centrale, au sud de Panxian, le rejeu de cette faille majeure est estimée à 2 km à partir des données de terrain ; elle met en contact directement les calcaires du Permien inférieur avec les calcaires au niveau de Biyun et Bianfu. On est en présence d'un anticlinal faillé dissymétrique montrant un mouvement de compression, voire de chevauchement, vers l'est-sud-est. La structure s'ennoe au nord-est sous les terrains du Trias. Les phénomènes de cisaillement de concrétions observés dans ce réseau sont localisés dans deux endroits : la galerie Sismique de la grotte de Bianfu au sud-ouest et la galerie Diana dans la grotte de Xingsuo au nord-est.

- **Les sismites.** Dans la grotte de Bianfu, la galerie Sismique constitue un appendice d'une centaine de mètres de développement situé au nord. Les cisaillements observés affectent les parois et de multiples concrétionnements. On observe différents types de concrétions cisailées (fig.175) :

- cimetières de concrétions brisées ;
- coulées stalagmitiques brunes et massives anciennes cisailées et en place ;
- coulées stalagmitiques brisées gisant sur le plancher ;
- stalagmites et stalactites cisailées avec morceaux à terre ;
- piliers stalagmitiques cisailés au milieu et éclatement de la concrétion à proximité du toit ;
- chutes de fistuleuses.

Ces sismites sont accompagnés par des cisaillements et des éclatements de paroi affectant les calcaires massifs du Permien. Il existe aussi des blocs effondrés.

Dans la grotte fortement concrétionnée de Xingsuo, les chutes de spéléothèmes sont présentes dans toute la cavité. Au fond, à partir du puits de 27 m qui rejoint le réseau de Liangfengdong, débute la galerie Diana. Celle-ci correspond à un conduit sec de 120 m de long présentant de multiples concrétionnements cisailés : quelques stalagmites brisées et surtout des colonnes et des coulées fracturées.

- **Interprétation.** L'examen des lieux n'indique pas un affaissement gravitaire, par exemple à partir d'un remplissage sous-jacent. Les stalagmites brisées ne sont pas liées à une action anthropique. Le fait que les parois et les concrétions soient affectées par des cisaillements indique un lien avec des processus sismo-tectoniques. Compte tenu du contexte géologique, ces indices sont le témoignage probable du rejeu de la faille transverse de Panxian. Les indices purement sismiques sont les chutes de fistuleuses et de stalagmites, avec une probabilité pour des séismes d'âge historique. De légers déplacements relatifs des parois (rapprochement) ont provoqué des écrasements se manifestant par des éclatements au sommet de piliers stalagmitiques.

C. Les indices sismo-tectoniques dans le réseau de Panlongdong

- **Contexte tectonique.** Le réseau de Panlongdong est situé dans le massif de Dabashan formé par des conglomérats éocènes à ciment calcaire. Celui-ci est localisé au sud-ouest de Panxian le long du grand accident SW-NE de Panxian qui passe également le long des réseaux de Liangfeng-Xingsuo-Bianfu et Biyun.

- **Les effondrements sismo-tectoniques.** Le réseau présente un site d'étude privilégié avec une salle d'effondrement, axée sur une faille, située à 350 m de l'entrée principale. La paroi sud-est est

Photo 387 : Chute de spéléothèmes d'origine sismo-tectonique probable dans la galerie Diana (grotte de Xingsuo, Panxian), rejeu quaternaire de la faille de Biyun.

Broken speleothem in Diana Gallery (Xingsuo cave) because of reactivation of Biyun fault (probable sismo-tectonic origin).

Photo R. Maire 1997

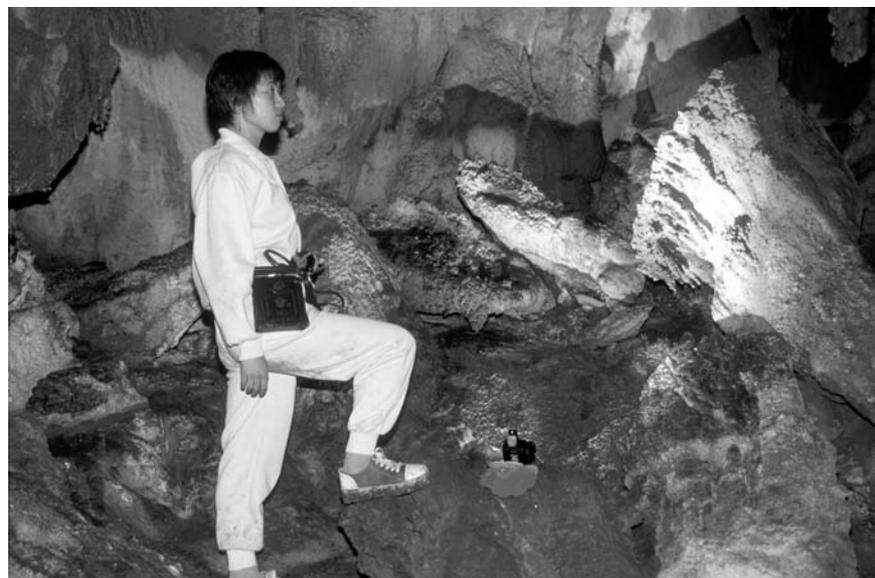
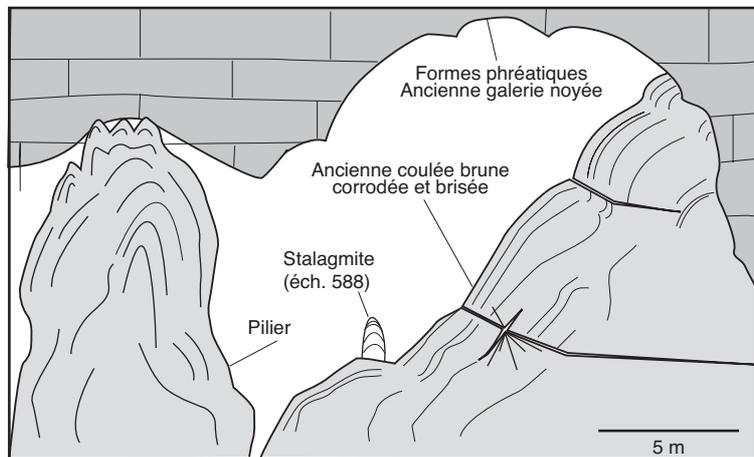


Figure 175 : Phénomènes sismo-tectoniques dans le réseau de Liangfengdong-Xingsuodong-Bianfudong (district de Panxian, Guizhou).

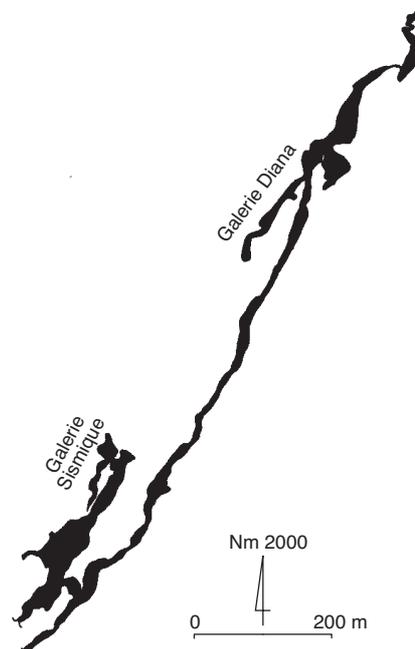
Sismotectonic phenomena in Liangfengdong-Xingsuodong-Bianfudong (Panxian County, Guizhou).

Figure N. Vanara, topographie Shilin'97 et Panxian 2000 (p 73).

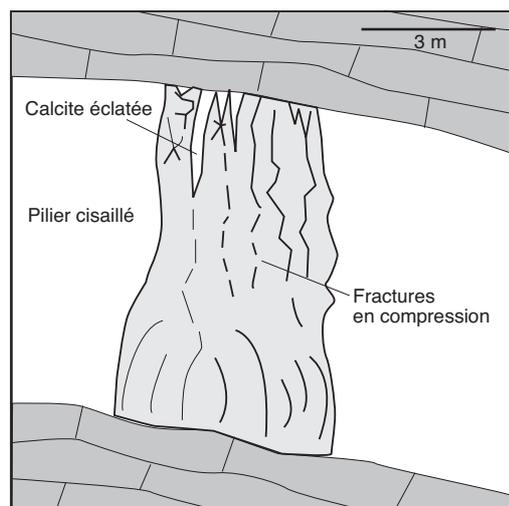
Observations dans la galerie Sismique
Observation in the Sismic Gallery



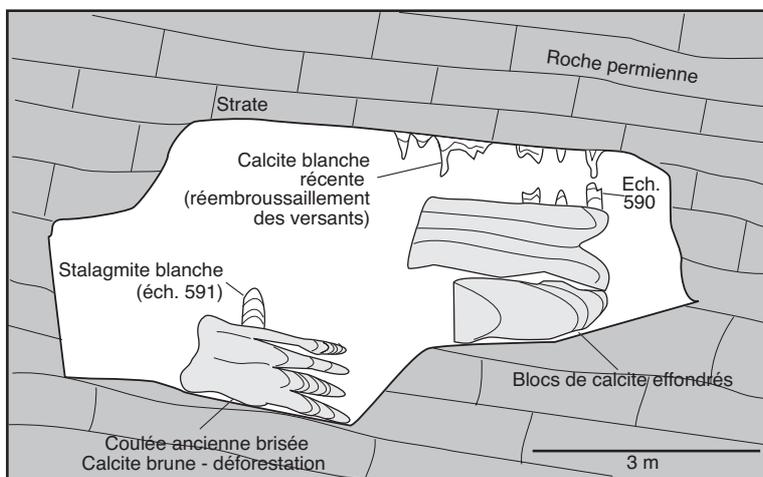
A. Grande coulée stalagmitique cisailée
Shearing of a big flowstone



Liangfeng-Xingsuo-Bianfudong
(plan)

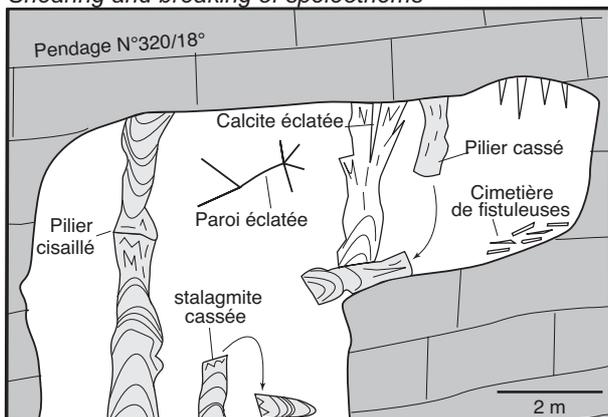


B. Cisaillement de pilier stalagmitique
Shearing of a stalagmitic pillar

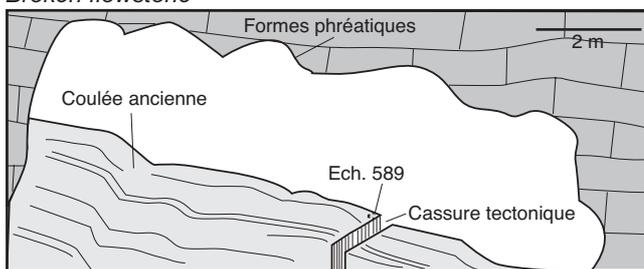


C. Chute de spéléothèmes
Breaking of speleothems

D. Cisaillement et chute de spéléothèmes
Shearing and breaking of speleothems



E. Cisaillement d'une coulée
Broken flowstone



longée par la rivière souterraine. De 60 m de diamètre, cette salle est caractérisée par un puissant chaos de blocs, dont la plupart mesurent 100 à 500 m³, voire plus. La faille NNE-SSW se poursuit au nord-nord-est par un puits-faille profond d'une douzaine de mètres.

- **Interprétation.** La fraîcheur du chaos, la présence visible d'une faille dans la salle et la situation tectonique de la cavité à proximité de la grande faille de Panxian plaident en faveur d'un rejeu de cette faille majeure en association avec des fractures secondaires. Les trémies et chaos sur faille peuvent avoir deux origines :

- une origine ancienne par désagrégation d'une zone préalablement broyée, alors que le drain karstique n'existait pas. La cavité a ensuite exploité cette zone de faiblesse ;

- une origine plus récente liée à un rejeu de la faille, par exemple en compression décrochante, qui a provoqué des cisaillements transverses et des éclatements de paroi. Ce processus s'effectue par relaxation des contraintes tectoniques au voisinage du vide, induisant une décompression et une ouverture des fractures, puis une chute des blocs. Nous n'avons pas de preuve permettant d'affirmer qu'un séisme puisse provoquer ici des chutes de blocs immédiates.

VI. Les dépôts végétaux piégés dans l'endokarst

Les débris végétaux piégés dans l'endokarst sont des indicateurs précieux du fonctionnement du milieu : couverture végétale, régime hydroclimatique, impact des activités humaines. Les systèmes-perles-résurgences de Chine sont affectés par de multiples dépôts ligneux (branches, troncs, souches) emportés par les crues de mousson (photos 388, 389). Quant la perte est de faible dimension, les débris végétaux tendent à colmater l'entrée en provoquant un lac lors des crues estivales. Ce processus est classique dans l'évolution des poljés dans l'ensemble des karsts du monde. En Chine subtropicale, le débit de crue des rivières allochtones qui disparaissent dans l'endokarst peut atteindre des dizaines, voire des centaines de m³/s. Le maximum connu est de 1 777 m³/s à la perte de la Gesohe (chap. 1), d'où la formation d'un lac d'entrée de 60 à 70 m de profondeur en raison du refoulement de la perte causé par un siphon à 300 m de l'entrée (exploration en mars 2003).

Le cas de la Gesohe, exceptionnel par l'ampleur des débits de crue, est cependant révélateur du fonctionnement des grottes-tunnels de Chine. On est en présence d'un système de grandes dimen-

sions, en cours d'évolution, d'âge quaternaire. Les dernières explorations, en mars 2003, ont montré que le canyon souterrain de 80 à 100 m de haut présentait des rétrécissements, encore inexplicables, à l'origine de siphons interrompant le parcours libre de la rivière. Dans le siphon 1 amont, la galerie bute sur une haute paroi sous laquelle disparaît la rivière dans une zone noyée profonde encombrée de troncs d'arbres. Les débris de bois et les troncs sont également coincés dans la paroi sur plus de 20 m de haut. Ce type d'obstruction diminue le potentiel d'évacuation du conduit en hautes eaux et favorise une mise en charge locale.

Les débris de bois présentent un grand intérêt quand ils sont présents à l'intérieur d'un remplissage détritique fin ou grossier. Ils constituent alors un jalon chronologique datable par la méthode du radiocarbone. Le meilleur résultat a été obtenu dans la mégaséquence des Fausses Varves Marrons de Dadong grâce à un ancien bois flotté retrouvé à la base du dépôt de 30 m d'épaisseur (Wufeng, Hubei) (fig. 160). Des fragments de troncs ou de branches peuvent être rencontrés dans les remplissages de galets. C'est le cas des échantillons prélevés dans la terrasse grossière principale du réseau amont de la Shuanghe dénommée Longtanzi (Suiyang, Guizhou) (chap. 4). En l'absence de datations C¹⁴, le ravinement actuel du dépôt par les crues de mousson suggère une période d'intense alluvionnement suivi par une phase d'érosion du dépôt (travaux en cours).

Les charbons de bois découverts dans les grottes sont des indicateurs précieux, surtout quand ils sont d'origine anthropique. C'est le cas des débris de bois brûlé résultant de la combustion des torches de bambou utilisées par les populations locales depuis des siècles, voire des millénaires (photo 390). Ces charbons de bois constituent alors un jalon remarquable pour l'archéologie. En effet, les grottes de Chine, même profondes et présentant des obstacles importants (puits), ont été parcourues par l'homme depuis longtemps. Les raisons sont multiples : découverte du milieu, refuge, exploitation des nitrates, etc. Les charbons de bois accompagnent des traces de pas présumées anciennes car situés loin des entrées actuelles. C'est le cas des découvertes effectuées dans les districts de Liuzhi (chap. 2) et Suiyang (chap. 4) (travaux en cours).

Conclusion

L'analyse multi-scalaire des dépôts souterrains, en particulier le décryptage des signaux environnementaux, a pour but de caractériser les processus périodiques, les discontinuités et les processus d'accélération. En étudiant les archives du passé à haute et basse résolution, on constate des lois générales, en particulier les effets de la non linéarité de la flèche du temps. En d'autres termes, le temps n'est pas symétrique dans ses effets.

Photo 388 : Souche coincée sous un bloc dans le réseau de la Gesohe (district de Panxian).

Stump trapped by flood under a large block into the Gesohe tunnel-cave (Panxian County, Guizhou).



Quand un seuil est franchi, il y a accélération, puis décélération, avec périodicité ou pseudo-périodicité. Cet aspect, valable pour les processus naturels, l'est aussi pour les impacts homme / milieu.

Cette connaissance intime du passé proche et lointain aide à mieux comprendre les processus en cours à l'interface Nature / Sociétés et à départager l'impact des paramètres locaux et globaux. Le concept de forçage doit être retenu quand des facteurs locaux ou globaux deviennent dominants et imposent parfois des seuils. Il y a forçage local quand les paramètres locaux effacent les influences externes, il y a alors effet de confinement, le milieu fonctionne en isolat, en milieu fermé. Il y a forçage global quand les paramètres globaux transcendent les influences locales, cas des changements climatiques en grande partie d'origine astronomique, mais phénomène valable pour les sociétés dans le cas de la mondialisation.

Le problème du *Global Change* actuel est contenu dans les concepts de forçage. Le but est de faire le distinguo entre forçage anthropique (CO₂ anthropogène), forçage naturel (CO₂ volcanique) et forçage complexe additionnant les effets des impacts humains et du fonctionnement de l'environnement naturel (paramètres astronomiques, volcanisme).

Exemples de débris ligneux déposés dans l'endokarst.

Examples of lignous debris found in cave (natural and human origin).

Photo 389 : Débris de bois encastrés sous un massif stalagmitique dans le réseau de la Gesohe (district de Panxian, Guizhou).

Wood debris trapped by flood under a stalagmitic massif in the Gesohe tunnel-cave (Panxian County, Guizhou).



Photo 390 : Charbons de bois provenant de la combustion de torches de bambou dans la grotte de Daxiaodong anciennement exploitée pour les dépôts de nitrate (district de Shuicheng, Guizhou).

Charcoals coming from bamboo torches in Daxiaodong (Shuicheng County, Guizhou).

Photos R. Maire 2003.