



HAL
open science

Les karsts à l'épreuve du temps

Nathalie Vanara, Richard Maire, Dan Wenhong, Zhang Shouyue, Jean-Pierre Barbary, Jean Bottazzi, Laurent Bruxelles, Li Po

► **To cite this version:**

Nathalie Vanara, Richard Maire, Dan Wenhong, Zhang Shouyue, Jean-Pierre Barbary, et al.. Les karsts à l'épreuve du temps. *Karstologia*, 2019, 74, pp.1-14. hal-04696180

HAL Id: hal-04696180

<https://hal.science/hal-04696180v1>

Submitted on 12 Sep 2024

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

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



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

Nathalie VANARA¹,
Richard MAIRE²,
Dan WENHONG³,
Zhang SHOUYUE⁴,
Jean-Pierre BARBARY⁵,
Jean BOTTAZZI⁶,
Laurent BRUXELLES⁷
et Li PO⁸

Les karsts à l'épreuve du temps: l'exemple de la Chine du sud-ouest

RÉSUMÉ: Cet article montre l'intérêt de la mémoire du passé enregistrée dans les paysages superficiels et souterrains des milieux karstiques. Les karsts de la Chine du sud-ouest renferment une grande variété de milieux étagés de 200 à 5000 m d'altitude. Parmi ces milieux, ceux de la moyenne montagne (entre 500 et 1500 m d'altitude) se distinguent car ce sont eux qui ont été les plus fortement perturbés par l'homme: pour cette raison, nos exemples s'intéresseront plus particulièrement aux provinces du Guizhou et du Hubei. Remonter la flèche du temps permet de comprendre l'évolution des paysages (§ I) avec l'homme, (§ II) sans l'homme et (§ III) de reconstituer les paléo-paysages. I- Le temps des hommes s'inscrit dans le temps court depuis la période contemporaine jusqu'au temps des premières sociétés (0-11 000 ans). Deux exemples ont été retenus: 1) pour l'exokarst, l'étude des dents de pierre comme indicateur d'une érosion des sols d'origine anthropique (Guizhou); 2) pour l'endokarst, une coupe sédimentaire dans le réseau de Dadong permet d'estimer un début d'agriculture sur brûlis légèrement antérieur à 10 000 ans BP (Hubei). II- Le temps de la géomorphologie est celui des paysages fonctionnels.

Il correspond au temps moyen à mi-long (11 000 ans à 1-5 Ma). Les principaux moteurs qui régissent l'évolution des milieux sont 1/ le climat: une stalagmite active du Hubei à faible croissance a enregistré, au stade isotopique 3, une phase de type biotassique et 2/ la tectonique: les grottes-tunnels étagées du Guizhou représentent les jalons de la phase himalayenne. La transition du temps moyen au temps long (1-5 Ma) doit être recherchée au niveau de la haute surface et ses jalons karstiques (ponts naturels, mégadolines d'effondrement, couloirs résiduels et paléo-pertes perchées).

L'abaissement des surfaces a fait disparaître les couches les plus récentes, notamment les basaltes du Permien. De ces roches, aujourd'hui disparues, il reste les altérites. III- Le temps de la géologie est celui du temps long (>5 Ma). La succession des cycles orogéniques a provoqué la disparition d'une colonne sédimentaire de plusieurs kilomètres, soit la disparition complète de paysages karstiques enregistrés désormais dans les sédiments marins, lacustres et continentaux. La fonction conservatrice des archives karstiques joue encore un certain rôle avec le maintien de deux types d'archives: les bassins rouges et les paléokarsts. Aujourd'hui, l'un des problèmes majeurs de ces régions réside dans l'érosion accélérée des altérites, consécutive des déboisements. Cette érosion constitue une perte irréversible à l'échelle de l'homme (temps court) car les calcaires sous-jacents (temps long) sont trop pauvres en insolubles pour permettre la reconstitution des sols (temps moyen).

MOTS-CLÉS: Chine du sud-ouest, environnement, paléoenvironnement, spéléo-karstologie, échelle de temps.

ABSTRACT: KARSTS UNDER THE TEST OF TIME: SOUTH WEST CHINA EXAMPLE. This article shows how karsts of the Southwestern China recorded the past according several scales. They represent a wide variety of environments ranging from 200 to 5.000 m asl, one of the most remarkable on Earth. From a geological point of view, all these karsts belong to the Yangtse platform, one of the main geotectonic chinese unit, which extends from the Himalaya to the Chinese Sea. Low and middle altitude subtropical karsts underwent a dramatic human destabilization of the

environment during XXth century: for example, Guizhou and Hubei Provinces are areas being impacted to varying degrees. A long trip back in time is necessary to determine the landscape evolution (§ I) with men, (§ II) without man and (§ III) to reconstitute the palaeolandscapes. I- The Time of Men belongs to short time, from the contemporary period to the first civilizations (0 - 11.000 years). Two examples were selected: 1/ for exokarst, "teeth stone" (shiya) are indicators of rural ecological disaster (recent deforestation, Guizhou); 2/ for endokarst, a sedimentary section studied in Dadong network allows to confirm that slash-and-burn agriculture beginnings about 10.000 years BP (Hubei). II- The Time of Geomorphology can be exemplified by functional landscapes; it corresponds to middle time scale (11.000 years - 1-5 Ma). The evolution is both controlled by the tectonic uplift and the climate changes: 1/ a speleothem recorded climatic conditions during OIS 3: the ecological balance was undisturbed (Hubei); 2/ tunnel-caves with staged levels are illustrated by the famous Gebihe system in Ziyun County (Guizhou); it crosses a fengcong karst with dry staged tunnels which recorded the Himalayan multiphase uplift. The transition from Middle Time to Long Time is marked by the uneven high surface (natural bridges, collapse megadolines, eroded tunnel without roof looking like a dry valley, former shafts located on the top of crests). In the Guizhou karsts, the alterites and pedologic soils were formed from ancient non-carbonated sedimentary covers from Paleozoic and Trias. These alterites result from a long geochemical evolution dating from the Tertiary. III- The Time of Geology (long time scale, > 5 Ma) is not visible in the present landscapes. The succession orogenic cycle

(1) Université Paris 1 - Panthéon-Sorbonne et laboratoire TRACES - UMR 5608 - nathalie.vanara@gmail.com
(2) Université Bordeaux 3 - richard.maire49@gmail.com
(3) Guizhou Normal University, Guiyang - danwenhong2000@yahoo.fr
(4) Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing - syzhangjin822@yahoo.com.cn

(5) Plongée spéléo-club Jeunes années - jean.barbary@wanadoo.fr
(6) Club Ursus, Venissieux - jean.bottazzi@gmail.com
(7) Institut national de Recherches archéologiques préventives, Institut français d'Afrique du Sud (IFAS) et université du Witwatersrand, Johannesburg (GAES) laurent.bruxelles@inrap.fr
(8) Guiyang Institute Mountain Resources, Guiyang - lipo_cn@aliyun.com

caused the disappearance several kilometers of deposits. This erosion is recorded in the marine, lacustrine and continental sediments. The conservative function of karsts allows two types of archives: the red basins and the paleokarsts.

Today, one of the major problems of this area is the ongoing soil erosion. The disappearance of the karstic soils due to deforestation, thus represents an irredeemable loss on a human scale (Time of Men) because the limestones are particularly

lacking in insoluble matter (Time of Geology) to allow the soil regeneration (Time of Geomorphology).

Key-words: South-West China, environment, palaeo-environment, speleo-karstology, time scale.

Introduction

Le terrain reste le meilleur laboratoire pour expérimenter des concepts comme ceux d'enregistreur et d'indicateur de l'environnement, d'autant que le karst est également un des rares milieux de notre planète où l'exploration est encore possible en raison de sa dimension souterraine (endokarst) et de l'existence de régions (Nouvelle-Guinée, Patagonie) et de zones (karst profond) particulièrement difficiles d'accès. Le karst est sensible aux variations environnementales de tous ordres, d'où l'utilisation des marqueurs karstiques pour appréhender les modifications environnementales récentes. Mais le karst est aussi un milieu conservateur capable d'enregistrer et de conserver à l'abri de l'érosion externe certains paramètres de l'évolution de l'environnement. L'érosion chimique – car elle est aussi souterraine – préserve les reliefs calcaires superficiels plus longtemps que ne le fait l'érosion mécanique dans les terrains non carbonatés d'où la notion d'immunité karstique vérifiée, par exemple, dans les paysages des Grands Causses et leurs réseaux souterrains hérités du Tertiaire [Camus, 2003].

Les karsts de la Chine du sud-ouest, les plus vastes du monde, renferment une grande variété de milieux étagés de 200 à 5 000 m d'altitude depuis les célèbres karsts de Guilin (Guangxi) jusqu'aux karsts himalayens du Yunnan [Maire et al., 2004]. Parmi ces milieux variés, ceux de la moyenne montagne (entre 500 et 1 500 m d'altitude) se distinguent car ce sont eux qui ont été récemment les plus fortement perturbés par l'homme : pour cette raison, nos exemples s'intéresseront plus particulièrement aux provinces du Guizhou et du Hubei. Remonter la flèche du temps permet donc de comprendre l'évolution des paysages actuels avec l'homme (§ I), sans l'homme (§ II) et de reconstituer les paysages du passé (§ III).

I. Le temps des hommes : karst et archives environnementales

Le temps des hommes s'inscrit dans le temps court depuis la période contemporaine jusqu'au temps des premières sociétés sédentaires (le Néolithique). Si, à l'échelle des temps géologiques, l'importance de l'homme est à relativiser,

il en est autrement de son action récente sur les milieux. Travailler sur les archives contenues dans les substrats calcaires permet de remonter dans le temps court en discriminant les effets des différents paramètres pour mieux comprendre les rythmes d'évolution des écosystèmes au gré de l'opposition ou de la conjonction des forces naturelles et anthropiques. Le choix de la Chine du sud-ouest comme terrain d'étude n'est pas le fruit du hasard. Épais substrat calcaire, pentes fortes, climat agressif, civilisation plurimillénaire [Pomel, 1995 ; Fairbank et Goldman, 2006] et populations nombreuses sont les ingrédients qui font de cette zone un cas d'école pour l'étude des archives karstiques ayant enregistré ou enregistrant les modifications des milieux imputables à l'homme [He, 1991 ; Vanara et Maire, 2006].

A. Les archives exokarstiques de l'érosion des sols (Guizhou)

La dégradation des sols tropicaux et subtropicaux causée par la déforestation est un des problèmes préoccupants de notre époque [Puig, 2001 ; Ehrenstein, 2014]. Dans le Guizhou, les montagnes représentent 87 % de la superficie. Les reliefs calcaires et dolomitiques couvrent 73 % du territoire (figure 1). La région est soumise à un climat subtropical de mousson. La densité du Guizhou est de 222 habitants/km². Le taux de couverture forestière se serait stabilisé aux environs de 12 % dans les années 1980 ; ce pourcentage officiel masquait l'ampleur du déboisement car les statistiques comptabilisaient comme « forêts » les bois de repousse et les broussailles. Depuis, suite aux mesures prises par le gouvernement, les surfaces couvertes par la végétation tendent à augmenter doucement comme le montrent les études à partir des images satellites [Zhang et al., 2017] mais il s'agit de forêts secondaires plus pauvres que les forêts primaires originelles.

Sur les pentes dénudées des montagnes, le processus d'érosion des sols s'amorce avec la coupe des arbres ; la

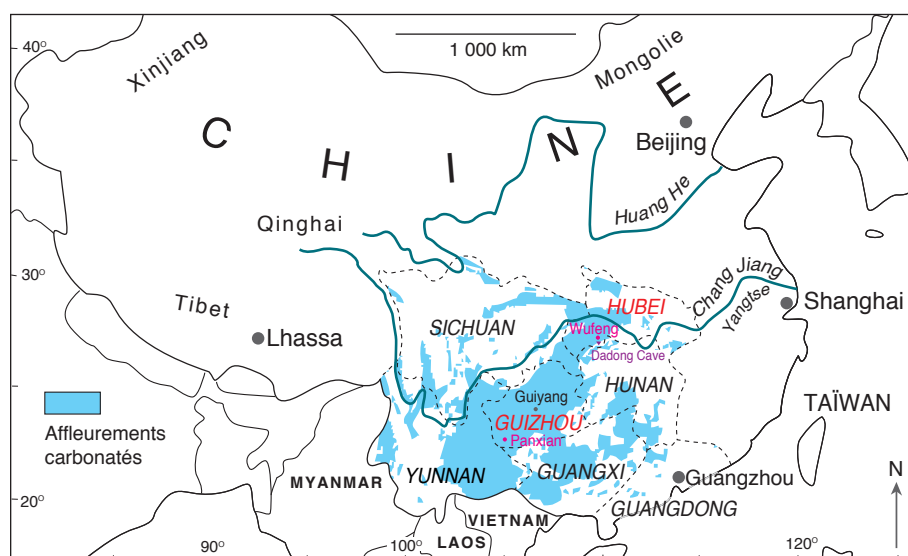


Figure 1 : Extension des affleurements carbonatés en Chine et localisation des zones étudiées (Guizhou et Hubei).

Extension of carbonate outcrops in China and location of studied areas (Guizhou and Hubei).



Photo 1 : Cette dent de pierre a enregistré une période d'érosion importante des sols (vallée de la Gesohe vers 1750 m, Panxian, Guizhou). Cliché N. Vanara. *Gesohe valley (1750 m high), Panxian district, Guizhou province: this stone tooth recorded one major soil erosion stage.*

mise en culture des terres accélère le processus. L'impact des gouttes de pluie fragilise les horizons supérieurs, la quantité d'eau qui s'infiltré diminue, le ruissellement augmente. Les glissements de terrain sont les premiers signes de dégradation, rapidement suivis par les ravinements incontrôlables et d'importants phénomènes de colluvionnement. La descente des matériaux entraîne : 1) le tronçonnage des sols ; 2) l'amincissement des sols puis des formations superficielles ; 3) la réactivation du karst (multiplication des soutirages) une fois les épaisseurs des altérites devenues trop faibles pour assurer l'étanchéité ; 4) la disparition des couvertures meubles. La roche est mise à nu sous la forme de modelés calcaires irréguliers et émoussés. Formés initialement par corrosion sous couverture semi-perméable, ces crypto-lapiés prennent progressivement l'aspect de dents de pierre. Dans le Guizhou, rondeur des formes et taille inférieure à un mètre s'associent couramment, signe sans équivoque d'une érosion efficace sur un intervalle de temps court : ces dents de pierre sont attribuées aux phases de déforestation du XX^e siècle (photo 1), ce que confirment les témoignages locaux.

Les dents de pierre témoignent d'une crise de l'environnement sans précédent dans des terroirs surpeuplés aux forêts dévastées, preuve d'une crise rhéxistatique de type climato-anthropique, l'impact humain (« forçage » social) étant péjoré par le climat de mousson et le substrat karstique fragile (photo 2).

B. Les archives endokarstiques de la déstabilisation des milieux (Hubei)

La déstabilisation du milieu exokarstique a un impact direct sur le milieu endokarstique en raison du transfert souterrain de l'eau. Dans le Hubei (figure 1), la région de Wufeng

présente un paysage montagneux culminant à 2320 m. Les séries des roches carbonatées, plissées ouest-est et puissantes de 2000 m, sont datées du Cambrien au Trias (figure 2). Le climat de type subtropical humide présente une nuance montagnarde accentuée. La Songjiahe (7 km) est une vallée aveugle qui présente deux tronçons distincts : 1) un haut bassin versant, culminant à 1900 m, sur clastes siluriennes imperméables (érosion linéaire) ; 2) un bas bassin d'alimentation, culminant à

Photo 2 : Erosion des sols et apparition des dents de pierre après le « Grand bond en avant » (depuis 1958), au-dessus du village de Baiguo, vers 2 000 m d'altitude, district de Panxian, Guizhou. Cliché R. Maire. *Baiguo village (2 000 m high), Panxian district, Guizhou province: soil erosion and stone teeth appearance since 1958.*



1 220 m, dans des calcaires ordoviciens perméables « en grand » (érosion karstique). Les eaux se perdent définitivement dans le porche de Dadong à la cote 780 m mais comme des pertes diffuses existent dès que le lit recoupe les calcaires ordoviciens, la grotte-tunnel n'est atteinte par les écoulements que durant les hautes eaux et les crues (photo 3).

Dans la salle des Varves Marron de Dadong, une séquence détritique sédimentaire de 14 mètres d'épaisseur a été ravinée par la rivière souterraine et un affluent latéral. Ces surcreusements ont aidé à l'établissement d'une coupe sur l'ensemble du remplissage qui

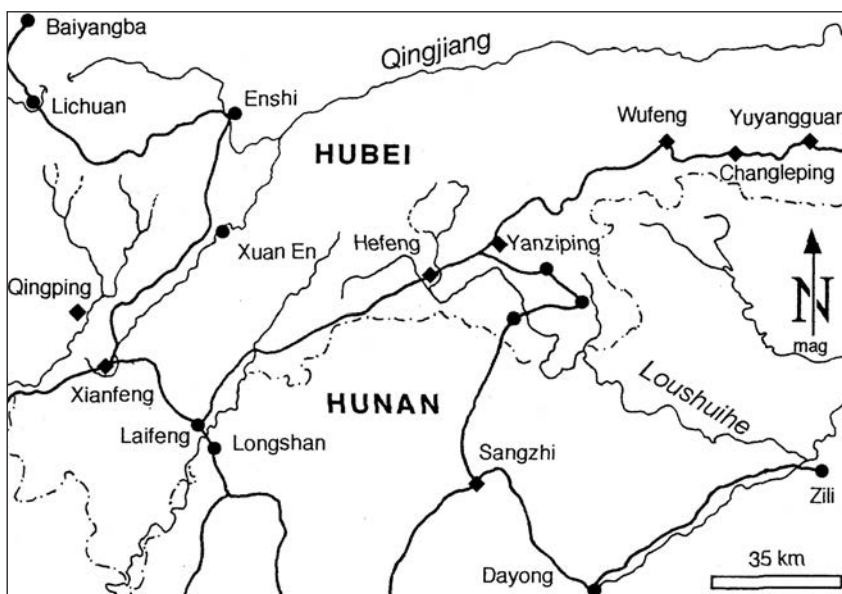
montre un dépôt argilo-limoneux reposant sur une séquence détritique grossière à galets et graviers de 2 m de puissance au moins. La sédimentation n'est pas horizontale mais inclinée vers le centre de la salle, en raison du fonctionnement de vidange lacustre progressif lors de chaque grande crue de mousson (figure 3). La description détaillée s'intéresse au remplissage fin marron, de bas en haut (figure 4):

- de 0 à 1 m, une séquence argilo-limoneuse à lamines gris-orange datée sur charbon de bois de 14 100-13 780 cal. (datation calibrée) B.P. et sur microdébris carbonisés de 11 170-10 760 cal. B.P. ;
- de 1 à 6,8 m, une épaisse séquence bien laminée, avec nombreux charbons de bois et débris ligneux ;
- de 6,8 à 11 m, une épaisse séquence massive de limon marron dont les lamines de crue ne sont pas visibles, sans charbon ni débris organiques sauf au sommet daté à 220-140 cal. B.P. ;
- de 11 à 11,7 m une couche sableuse reposant en discordance (surface de ravinement) sur la séquence précédente ;
- de 11,7 à 12 m, une couche sableuse et limoneuse sommitale recouverte localement par des troncs d'arbre.

La séquence inférieure de 1 à 6,8 m présente de nombreux charbons dont les âges, qui fluctuent entre 11 150-10 710 cal. BP et 10 810 et 10 580 cal. B.P., indiquent la remobilisation par les crues de ces témoins de feux naturels ou anthropiques. L'impact climato-anthropique est donc probable à la fin du stade isotopique 2 et au début de l'Holocène. L'absence de débris de bois et charbons dans la séquence 6,8 - 11 m pourrait être en relation avec une déprise. L'impact des feux réapparaît pour la période historique récente des XIX^e et XX^e siècles.

En raison du transfert direct des particules dans l'endokarst par un très large conduit, ce dépôt lacustre souterrain joue le rôle de paléohydromètre de ce milieu subtropical de mousson avec un enregistrement en continu de milliers de hautes eaux estivales (mousson) de la fin du stade isotopique 2 à aujourd'hui. L'ensemble de la coupe est constitué par une puissante séquence de dépôts de crue à doublets limon / argile brun-rouge avec une forte contribution en microdébris pédologiques soulignant les conditions rhéxistatiques. Il est difficile de discerner avec précision les séquences annuelles car chaque doublet est l'enregistrement d'une montée des eaux. Or plusieurs hautes eaux peuvent se succéder durant une saison humide et être enregistrées par des dépôts de quelques millimètres. La succession de gros doublets et d'une série de petits doublets est l'expression typique d'un

Figure 2: A. Localisation de la zone de Wufeng (Hubei) [Zhang et Maire, 1995].
B. carte géologique simplifiée de la retombée périantclinale ouest de l'anticlinal de Changleping.
A. Location of the studied area in Wufeng district, Hubei province.
B. Geologic map: Western end of the Changleping anticline.



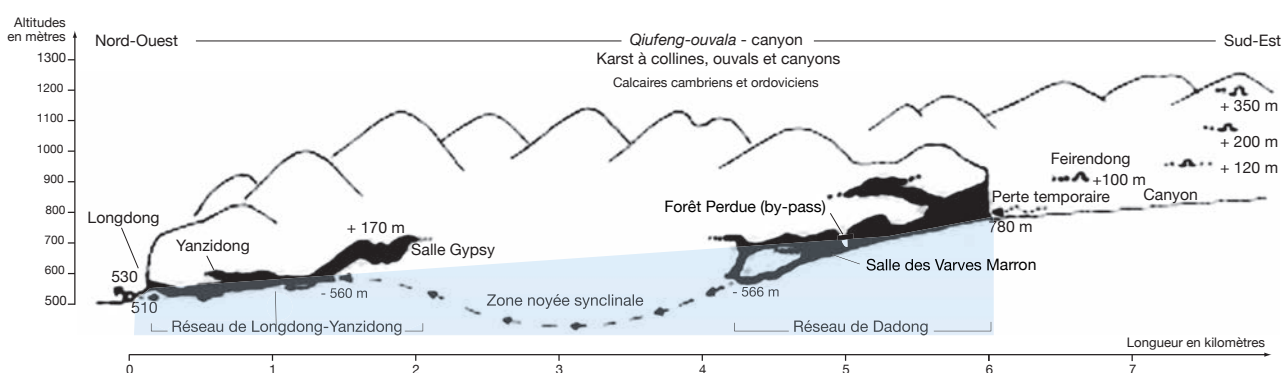
- T1d TRIAS. Daye. Calcaires
- P2w-2d PERMIEN SUPÉRIEUR. Wujiaping et Dacong. Calcaires
- P1q-1m PERMIEN INFÉRIEUR. Qixia et Maokou. Calcaires
- C1h-2h CARBONIFÈRE. Yanguan et Huanglong. Roches clastiques, calcaires et dolomies
- D2-3 DÉVONIEN. Yuntaiguan. Roches clastiques
- S SILURIEN. Roches clastiques
- O2m-2b-3l ORDOVICIEN SUPÉRIEUR Miapo, Baota et Linxiang. Calcaires
- O1n-1f-1h-d-1g ORDOVICIEN INFÉRIEUR. Nanjinguan, Fenxiang, Hunghuayuan, Dawan et Guniutan. Calcaires
- €3 CAMBRIEN. Sanyoudong. Dolomies
- €1-2sl-2qn CAMBRIEN Shilungdong et Qinjiamao. Dolomies et calcaires

Photo 3: Le porche de 110 m de la perte de Dadong à l'extrémité de la vallée aveugle de la Songjiahe (district de Wufeng, Hubei).
Clichés L. Bruxelles.

Dadong cave entrance is 110m high. It is located at the end of Songjiahe blind valley (Wufeng district, Hubei province).



Figure 3: Coupe synthétique de la grotte-tunnel de Dadong-Longdong (district de Wufeng, Hubei) [d'après Vanara et Maire, 2009]. L'aplat bleu indique le niveau des eaux, dans le réseau, lors des crues. Synthetic section of the Dadong-Longdong tunnel-cave (Wufeng County, Hubei). We notice a saturated level in the syncline part. Blue tint: level of waters during the underground Songjiahe floods [from Vanara and Maire, 2009].



ensemble de « crues » intra-annuelles. Ces microséquences continues et répétitives d'eaux turbides charrient des particules de sols riches en cendres et charbons de bois. La répétitivité et la position dans les lamines saisonnières indiquent des feux intentionnels: agriculture sur brûlis et élevage (premier stade de la mise en valeur du milieu). Le Néolithique chinois a commencé assez précocement, au moins vers 8000 BP [Chen and Yu, 2017]. La coupe de Dadong plaiderait pour un début d'agriculture sur brûlis légèrement antérieur à 10000 ans BP. (figure 4). L'analyse et la datation précise des remplissages de cavités chinoises pourraient ainsi contribuer à préciser les débuts de la révolution néolithique en Extrême-Orient.

II. Le temps des paysages fonctionnels: karst et archives géomorphologiques

Le temps géomorphologique est celui des paysages fonctionnels. Il correspond au temps moyen à mi-long: environ de 10000 ans à 1-5 millions d'années. Ces paysages dits « fonctionnels » par les géomorphologues constituent pour le géo-historien le décor géographique apparemment immuable: les paysages dit

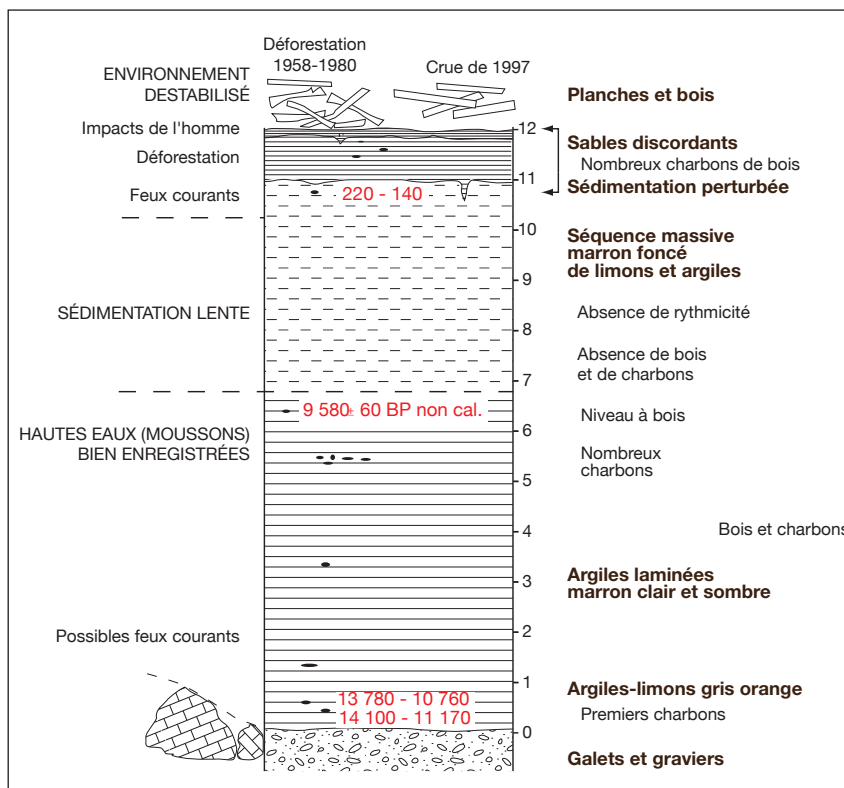


Figure 4: Détail de la séquence détritifique, salle des Varves Marron, réseau de Dadong-Longdong (Wufeng, Hubei), dates calibrées en BP. Detail of the detritic sequence of Varves Marron deposit, Dadong-Longdong cave system (Wufeng district, Hubei province). Calculated ages are cal BP.

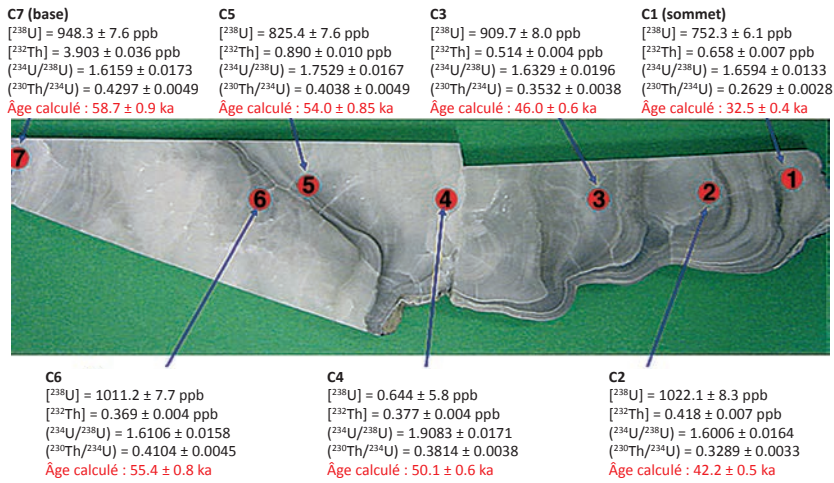


Photo 4 : Datations par U/Th en TIMS sur une stalagmite de la galerie Haute du réseau de Dadong - Hubei (B. Ghaleb, laboratoire GEOTOP, UQUAM, Montréal).
Speleothem of Haute Galerie (Dadong cave system, Hubei province): U/Th (TIMS) calculated ages (B. Ghaleb, GEOTOP laboratory, UQUAM, Montreal).

« immobiles » selon F. Braudel [1949]. Nos exemples ont été sélectionnés en fonction des deux paramètres essentiels qui régissent l'évolution de ces milieux : le climat et la tectonique.

A. Le contrôle climatique enregistré par les spéléothèmes (Wufeng)

Les spéléothèmes fonctionnels permettent généralement de remonter dans le temps court et moyen. Une stalagmite inactive de 37 cm de long sur 12-15 cm de diamètre a été prélevée dans la galerie Haute, conduit sec situé au-dessus de la salle des Varves Marron (grotte de Dadong, Wufeng - Hubei). Cette concrétion a fait l'objet de sept datations U/Th en TIMS (B. Ghaleb, laboratoire GEOTOP, UQUAM, Montréal). Les résultats géochimiques sont excellents en raison de la pureté de l'échantillon : quasi-absence de thorium détritique (^{232}Th) qui se traduit par des rapports $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$ élevés (échantillon C6 : 5531). Le taux d'uranium est assez important puisqu'il est proche de 1 ppm (1 $\mu\text{g.g}$). Les sept âges obtenus s'échelonnent de $58\,700 \pm 0,9$ BP (échantillon C7) à la base à $32\,500 \pm 0,4$ BP au sommet (échantillon C1), soit l'ensemble du stade isotopique 3 qui est reconnu comme une phase de réchauffement [Wang et al., 2001 ; Fleitmann et al., 2009 ; Genty et al., 2010]. Tous les âges intermédiaires sont en bonne concordance stratigraphique : $55\,400 \pm 0,8$ BP, $54\,000 \pm 0,85$ BP, $50\,100 \pm 0,6$ BP, $46\,000 \pm 0,6$ BP, $42\,200 \pm 0,5$ BP. Durant 26 200 ans, 33 cm de calcite se sont déposés, soit une vitesse moyenne de croissance de l'ordre de 13 $\mu\text{m/an}$ (photo 4). La lenteur de

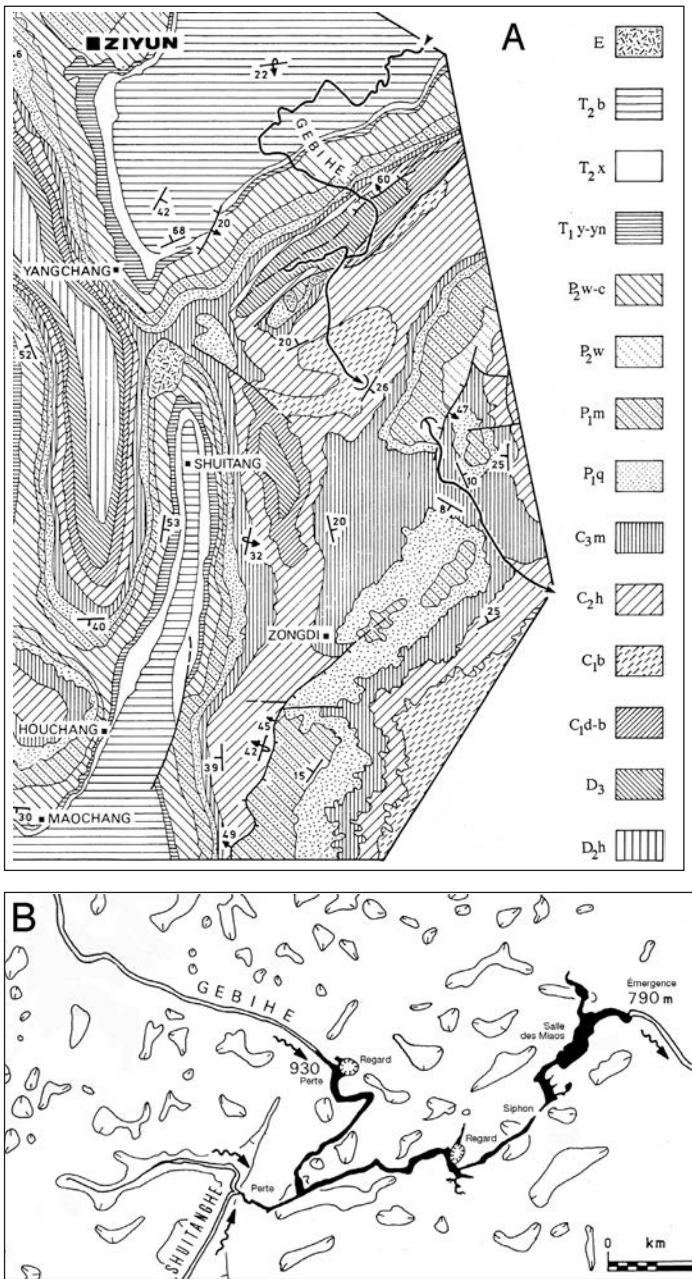


Figure 5 : A. Contexte géologique de la Gebihe, partie méridionale du comté de Zihun - Guizhou. B. Tracé souterrain de la Gebihe, Zihun-Guizhou. [d'après Barbary et al., 1991]. E: Tertiaire. T2b: Trias moyen (Bianyang). T2x: Trias moyen (Xingyuan). T1-yn: Trias inférieur (Yongningzhen). T1y: Trias inférieur (Yelang). P2C: Permien moyen (Changxin). P2W: Permien moyen (Wujiaping). P1m: Permien inférieur (Maokou). P1q: Permien inférieur (Qixia). C3m: Carbonifère supérieur (Maping). C2h: Carbonifère moyen (Huanglong). C1b: Carbonifère inférieur (Baizuo). C1d: Carbonifère inférieur (Datang). D3: Dévonien supérieur. D2h: Dévonien moyen (Huohong).
 A. Geologic map of the Gebihe river [from Barbary et al., 1991]. E: Tertiary. T2b: Middle Trias (Bianyang). T2x: Middle Trias (Xingyuan). T1-yn: Lower Trias (Yongningzhen). T1y: Lower Trias (Yelang). P2C: Middle Permian (Changxin). P2W: Middle Permian (Wujiaping). P1m: Lower Permian (Maokou). P1q: Lower Permian (Qixia). C3m: Upper Carboniferous (Maping). C2h: Middle Carboniferous (Huanglong). C1b: Lower Carboniferous (Baizuo). C1d: Lower Carboniferous (Datang). D3: Upper Devonian. D2h: Middle Devonian (Huohong).
 B. Underground Gebihe cave system, Zihun - Guizhou.

cette croissance est l'expression d'une transmissivité à fort filtrage lié à un effet de site: la faible perméabilité de la masse rocheuse (calcaires ordoviciens) formant le plafond de la grotte. L'enregistrement se place dans le temps moyen, au cœur du Pléistocène supérieur. Ce fort filtrage lisse le signal d'où une certaine prudence quant aux conclusions à tirer. L'absence de contaminations détritiques est-elle due à un milieu en biostasie ou à l'efficace filtration de la roche? La première hypothèse est plus probable car l'arrêt du concrétionnement pendant le stade 1 et 2 suggère une obturation du système poreux sus-jacent. Le stade 3 enregistré par la concrétion a donc été probablement une période de type biostasique.

B. Le contrôle tectonique enregistré par l'étagement des cavités (Ziyun)

Les karsts tropicaux de Chine sont la patrie des grottes-tunnels géantes. Une grotte-tunnel est un système perte - résurgence présentant une rivière hypogée importante circulant dans des conduits de grandes dimensions: par exemple, le réseau de la Gebihe situé dans le district de Ziyun, province du Guizhou. Deux rivières, la Gebihe et son affluent, la Shuitanghe, se perdent sur le flanc ouest du synclinal de Jiama, se rejoignent sous terre puis résurgent à l'est, près de l'axe du synclinal (dénivelé: 445 m). Le réseau, topographié sur 12 km, se développe d'abord dans les calcaires du Carbonifère, puis dans ceux du Permien, selon un pendage 27°E (figure 5). En surface, le karst est de type *qiuifeng* (basses collines) - ouvala avec des sommets vers 1 300-1 400 m et des fonds des vallées actives vers 930-950 m.

À l'amont, après un parcours de 7,7 km, la rivière disparaît dans une perte principale dont le porche en ogive atteint la hauteur de 116 m de haut et 25 m de large (photos 5A et 5B). La perte secondaire (Shuitanghe) donne accès à de grands lacs souterrains. Deux regards géants jalonnent le tracé: un de 370 m de profondeur, situé au début du réseau, et un de 210 m de profondeur, perforant le milieu du plateau (figure 6). Le réseau amont se termine à l'aval sur deux siphons: l'un dans la galerie active, l'autre dans un vaste conduit évacuant le trop-plein de la rivière. Pendant la mousson, les hautes eaux empruntent cette galerie mais quand le débit dépasse les 50 m³/s, la galerie s'envoie et refoule jusqu'à la perte de la Gebihe. L'eau remonte alors de 20 m dans le puits de 210 m comme l'attestent les laisses de crue limono-sableuses, soit une mise en charge de +50 m dans la partie intermédiaire du réseau.

À l'aval (4,2 km), la galerie d'entrée de 500 m de long donne accès à la salle des Miao qui est la deuxième plus grande salle connue du globe après celle de Sarawak à Mulu



(Malaisie). Elle mesure 700 m de long, 200 m de large et environ 100 m de haut. En crue, elle est parcourue en rive droite par le trop-plein de la rivière. Au milieu de la salle, plusieurs grandes cloches dépassent les 100 m de hauteur. Le plancher est formé par des amoncellements de blocs de 2 à 5 m de haut, arrondis et polis par l'eau. Les flancs ouest et est sont généralement recouverts par de puissantes coulées stalagmitiques, des gours imposants (0 à 60 m de haut et jusqu'à 100 m de large) et des stalagmites parfois hautes de 50 m. En étiage et moyennes eaux, la rivière coule sous les blocs mais pendant les hautes eaux estivales, la salle est traversée par un torrent qui cascade (100 m de dénivellation). La force du courant peut être importante: les ponts et l'installation électrique, installés pour de futures visites touristiques, ont été détruits entre l'été 1999 et le printemps 2000.

Six niveaux d'écoulement ont été reconnus (figure 6).

- Niveau 0. Le porche actif constitue la perte actuelle de la Gebihe.
- Niveau 1. À +100 m, les galeries hautes de la Gebihe (remplissages fluviaux consolidés) ont été abandonnées par les eaux qui empruntent actuellement les galeries basses siphonnantes; entre les pertes Shuitanghe et Gebihe, une vallée sèche présente

Photos 5 :

A. Vue d'ensemble des réseaux étagés de la Gebihe (Ziyun, Guizhou).

The staged (superimposed) Gebihe tunnel-caves (Ziyun county, Guizhou).

B. Niveau inférieur actif de la Gebihe; le porche atteint une hauteur de 116 m.

The Gebihe sinkhole entrance is 116m high.

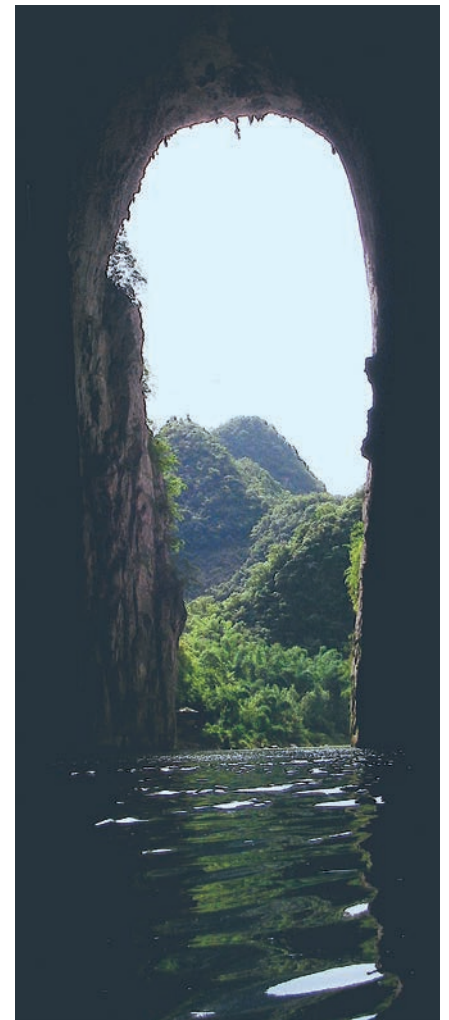
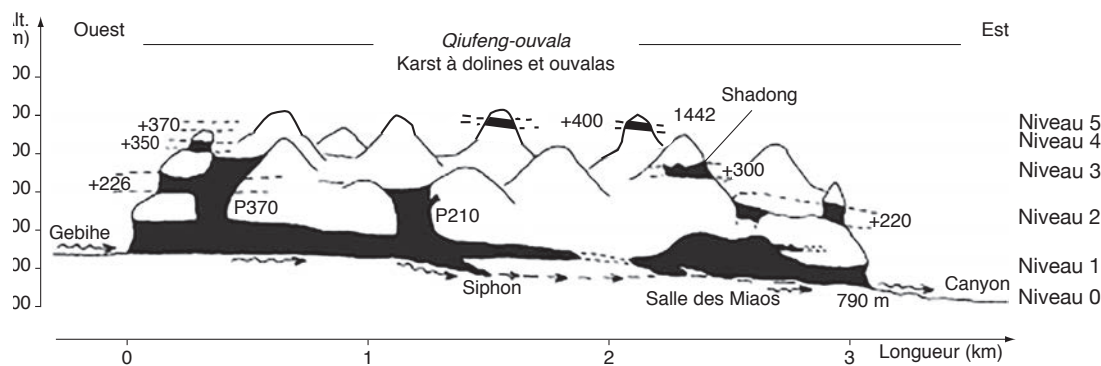


Figure 6: Coupe synthétique de la grotte-tunnel de la Gebihe (district de Ziyun, Guizhou) [Vanara et Maire, 2009; modifiée].
Synthetic section of the Gebihe tunnel-cave (Ziyun County, Guizhou).



des remplissages fluviaux, la pétrographie variée des éléments suggère une alimentation par une rivière allochtone.

- Niveau 2. À +226 m, à l'ouest, un pont-tunnel (137 m de long, 70 m de large et 50 m de haut) débouche dans un puits géant (200 m de diamètre, 370 m de profondeur) qui trépane le plateau et communique avec la rivière souterraine. La suite de cette ancienne grotte-tunnel est visible vers le sud-ouest sous la forme d'une gorge envahie par la forêt correspondant à une vaste galerie dont le plafond a disparu suite à l'abaissement, par érosion, des surfaces karstiques. À +220 m, à l'est, un pont-tunnel de 50 m de large sur 100 de long débouche sur une vallée sèche intérieure correspondant au plancher d'une ancienne grotte-tunnel trépanée par abaissement des surfaces. Cette

pseudo-vallée rejoint un puits d'effondrement colmaté.

- Niveau 3. À +350 m, à l'ouest, un pont-naturel traverse un piton calcaire. À +300 m, à l'est, la grotte de Chadong est occupée par un village troglodytique qui profite de l'abri offert par le vaste porche d'entrée.
- Niveau 4. À +370 m, à l'ouest, un plancher alluvial reste l'unique témoin des anciennes circulations.
- Niveau 5. À +400 m (1 300 m d'altitude), un pont-naturel traverse le sommet d'une haute butte (1 442 m, photo 6).

Ces différents conduits, étagés sur 400 m de dénivellation, sont les témoins de l'évolution du système perte-résurgence de la Gebihe au cours de la surrection himalayenne depuis le Néogène. Au cours des derniers millions d'années, l'érosion karstique du massif a

provoqué un abaissement relatif de la surface karstifiée pendant que cette dernière se soulevait. Cette érosion explique les conduits perchés, mais aussi les liaisons verticales avec la surface (puits de 210 et 370 m de profondeur). La chronologie relative étant comprise, il conviendrait maintenant de dater les différents stades d'encaissement afin de pouvoir proposer une chronologie absolue et une estimation de la vitesse de surrection.

La grotte-tunnel de la Gebihe a une durée de vie de l'ordre de plusieurs centaines de millénaires à plusieurs millions d'années. Son évolution dépend des conditions géologiques, géomorphologiques et bio-climatiques locales : intensité de la surrection, épaisseur du calcaire et débit d'eau agressive disponible. L'histoire se perpétue tant qu'il y a une masse calcaire suffisante et une force tectonique qui soulève la montagne. L'abandon d'une vallée par capture souterraine se réalise progressivement, le système réagissant avec un certain retard (hystérésis). Pendant les étiages, les galeries basses captent l'ensemble des écoulements. Durant les crues, les flux envoient les vides karstiques sur une hauteur de 50 m. L'assèchement définitif de la zone épinoyée interviendra quand les conduits noyés seront assez vastes pour absorber l'ensemble des débits, quelles que soient les conditions hydrologiques.

C. Les paysages hérités

Les racines de cavités et les altérites marquent la transition du temps moyen au temps long, ou le passage des paysages fonctionnels aux paysages hérités et incisés par l'érosion.

1) Les « racines » de cavités

Après le second épisode himalayen de la fin du Miocène, l'encaissement des principales rivières conditionne le progressif démantèlement des surfaces



Photo 6: Ce pont naturel est situé 400 m au-dessus du niveau de base actuel (massif de la Gebihe, district de Zihun-Guizhou). Cliché N. Vanara. The natural bridge is located 400 m above the actual river (Gebihe mountains, district de Zihun-Guizhou).

Photo 7: « Haute surface » à buttes dans le massif de la Geso-Wutuhe (Panxian, Guizhou). Cliché R. Maire. Geso-Wutuhe (Panxian, Guizhou) relief: cone karst "high surface".



anciennes mises en place à un moment où le massif était moins soulevé. Les surfaces subsistent dans le paysage actuel sous la forme d'une paléo-surface « en pointillés » passant par le sommet des champs de buttes, cônes et/ou pitons (photo 7). Ce paysage est disséqué, a quasiment disparu mais il se devine encore à perte de vue (échelle subcontinentale). Tous les paysages actuels de la Chine du sud-ouest résultent du défonçage de cette surface karstique tertiaire par abaissement relatif du niveau de base général.

Les cavités les plus hautes, donc les plus anciennes jalonnent cette « surface ». Décapitées ou recoupées par l'érosion, elles ne possèdent généralement plus ni amont, ni aval et leurs parois affectées par la décompression ne permettent pas la reconstitution des sens de circulation qui les ont façonnées, à l'aide des micromorphologies. La disparition d'une cavité est un processus lent. Par rapport à une tectonique discontinue (surrection saccadée), le système réagit avec un certain retard selon un phénomène d'hystérésis. Les cavités devenues « sèches », dites fossiles, sont inévitablement rattrapées par l'érosion qui a pour conséquence un abaissement des surfaces karstiques. Les effondrements par amincissement de la voûte génèrent des regards. La Chine du sud-ouest est la terre d'élection des ponts naturels géants dont la hauteur sous la voûte (≈ 100 m) peut dépasser la longueur du tunnel (< 100 m, arche). Le géographe chinois Xu Xiake (1587-1641) [édition 1993] est à l'origine de l'expression *Tianshengqiao*, littéralement « pont naturel ». Le *Tianshengqiao* de la Ganhe (Dafang, Guizhou) est le record du monde: son arche haute de 178 m permet le passage d'une route locale [Gabrovsek et al., 1998].

Les exemples de mégadolines (*tiankengs*, avens géants) – issues de

l'écroulement du plafond des grandes salles par abaissement du niveau du plateau – sont assez fréquents. Yangtianmawo est l'une des plus grandes du globe; elle se situe dans le district de Shuicheng, à 1 km au nord de la limite du district de Panxian et à 3 km au nord-est du village d'Huaga ($26^{\circ}06'10''$ N / $104^{\circ}56'07''$ E). La dépression s'ouvre entre 1 420 et 1 500 m d'altitude. Elle atteint un diamètre de 750 x 600 m, une profondeur de 200 m au minimum et de plus de 270 m à partir du bord le plus élevé. Les flancs sont subverticaux sauf au nord; le fond plat, situé à la cote 1 228 m, mesure 250 m de large. Cette mégadoline domine de 700 m le canyon de la Wutuhe en rive gauche.

L'ultime stade avant la destruction complète des anciens tracés souterrains est celle des couloirs résiduels. Les couloirs superficiels les plus longs ont été observés dans le

district de Lichuan (Hubei). Le plateau karstique qui surmonte le système actif porte les traces d'anciens niveaux avec des tronçons résiduels (ponts-tunnels) et de grands couloirs résiduels sans plafond que l'on peut suivre sur des centaines de mètres. La morphologie de ces couloirs suggère le tracé d'une ancienne grotte dont les galeries mesuraient 30 à 50 m de large et plusieurs dizaines de mètres de hauteur. Aujourd'hui ces couloirs prennent la forme de petites vallées sèches encaissées entre des parois de 30 à 60 m de hauteur (photo 8).

Photo 8: Vallée sèche correspondant à une ancienne grotte-tunnel dont le plafond s'est effondré par abaissement de surface: Tenglongdong, district de Lichuan, Hubei. Cliché R. Maire. Above Tenglongdong Cave, dry valley corresponding to an unroofed tunnel-cave (Lichuan County, Hubei).



L'étude des paléopertes perchées permet de mettre en évidence les importantes modifications géomorphologiques qu'a pu subir un massif. À titre d'exemple, une ancienne perte, appelée Baiyudong, est localisée actuellement à 2 000 m d'altitude sur l'axe sommital d'une des crêtes du karst de Baoji. La doline d'entrée couverte de végétation masque l'orifice d'un puits profond de 424 m, soit l'une des plus grandes verticales souterraines absolues du monde. Le palier d'éboulis à -424 m se poursuit par trois puits en cascade de 20, 40 et 73 m de profondeur. Le gouffre se termine sur un plancher caillouteux à la cote -560 m. Le gouffre – axé sur faille – n'est pratiquement pas concrétionné. Des fragments de roches gréseuses de la base du Permien inférieur (formation Lianshan) ont été identifiés dans la blocaille du gouffre alors que ces couches n'existent plus en surface à cause de l'érosion de la couverture sédimentaire. L'ancienne alimentation en eau de Baiyu provenait sans doute en partie des flancs imperméables de la montagne basaltique du Badashan (2 558 m) dont l'escarpement bordier a reculé par érosion de plusieurs kilomètres au cours du Plio-Quaternaire. Ce puits géant creusé dans la masse des calcaires du Carbonifère est une relique d'au moins plusieurs centaines de millénaires, voire de quelques millions d'années. Les logiques d'écoulement étant désormais différentes de

celles ayant prévalu lors de la genèse du gouffre, l'entrée de cette ancienne perte est maintenant inactive en raison de sa position perchée. Les inversions de relief mises en évidence par les pertes décapitées situées au sommet des crêtes prouvent enfin que le relief karstique ne s'est pas abaissé de manière homogène. La notion d'immunité karstique doit donc être nuancée : elle ne se vérifie plus sur une échelle de temps supérieure à environ 5 Ma dans un contexte de surrection active.

2) Signification des altérites

Dans le Guizhou, les zones déboisées laissent à nu des altérites aux épaisseurs variables. Ces formations sont épaisses et continues dans les secteurs les moins érodés, fines et discontinues (poches entre les dents de pierre, fond des dépressions) dans les secteurs décapés (cf. *supra* I.A) ; elles forment des horizons illuviaux, enrichis principalement d'argile et de fer (horizons B).

À proximité du village de Baoji, dans l'anticlinal de la Gesohe à 1 700 m d'altitude, les profils d'altérites en bordure de route montrent un horizon B argileux, rouge, en partie tronqué à cause de l'érosion. L'examen minéralogique au microscope de la fraction sableuse est la méthode la plus efficace pour reconnaître les signatures des roches disparues. La fraction sableuse montre

une masse de fond constituée par des grains de cuirasses d'oxydes de fer et de sols ferrugineux, quelques gros quartz, des débris de spicules, de rares micas et de petits verres volcaniques blancs, parfois bruns. La contamination volcanique nette renforce l'hypothèse que la formation d'Emeishan recouvrait autrefois cette région. Actuellement cette couverture basaltique se situe 5 km au nord-ouest où elle culmine entre 2 300 et 2 558 m (Badashan) ; elle constitue la source la plus probable pour la fourniture d'argiles en grande quantité. Lorsqu'une couverture de laves s'altère, elle donne des argiles rouges en raison de la présence de fer. Le verre étant formé par de la silice amorphe, non cristallisée, la molécule SiO_2 peut se dissocier 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 s'argilise donc relativement facilement. Si la présence des verres dans ces profils tronqués reste discrète, la raison est à rechercher dans l'ancienneté de l'altération qui a permis l'argilisation quasi complète de la silice amorphe.

III. Le temps des paysages disparus : karst et archives géologiques

Le temps long est plus celui du géologue que du géographe. Pourtant, il est nécessaire de remonter dans le temps à la recherche des archives karstiques les plus anciennes pouvant renseigner sur les paléoenvironnements et la paléogéographie d'où sont issus les paysages actuels. Ces indices sont pratiquement les seuls à notre disposition pour tenter d'appréhender les conditions qui ont prévalu durant ces périodes lointaines.

A. Les bassins rouges du Crétacé-Éocène

Les formations rouges des karsts chinois, déposées dans les bassins et sur les piémonts constituent un indice complémentaire en faveur d'une forte altération au cours du Crétacé, longue période de karstification encore méconnue. Ces séries détritiques et lacustres, importantes en Chine du sud, sont connues grâce aux sondages effectués pour des travaux de génie civil. Le grand « bassin rouge » du Sichuan est le plus connu avec une superficie de 200 000 km². Deux exemples sont cités.

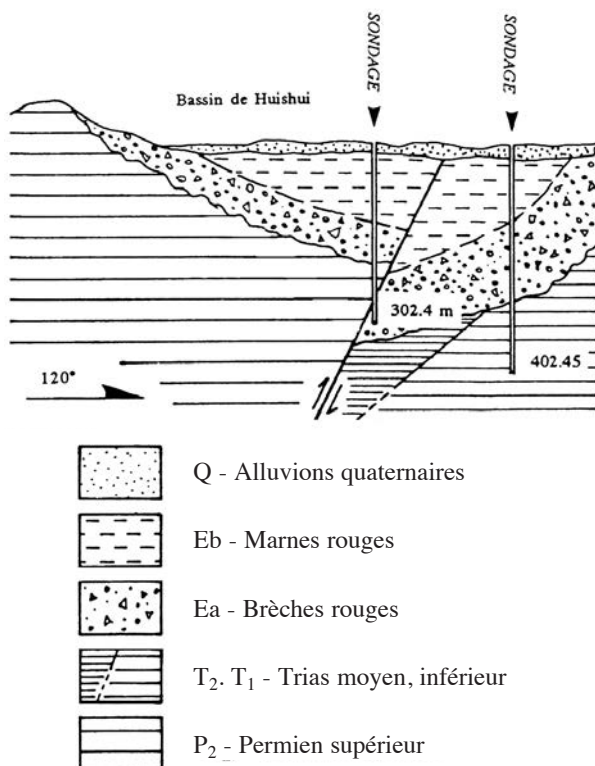


Figure 7: Coupe du petit bassin rouge de Huishui (Guizhou). Ces dépôts résultent de l'érosion des reliefs et du décapage des altérites rouges probablement à la suite de la dernière phase tectonique de Yanshan (Y3) [Song Shixiong, communication écrite modifiée].
Cross section of the Huishui red basin (Guizhou). Conglomerates and red silts fed by erosion of reliefs and alterites following the last tectonic activity of Yanshan (Y3).

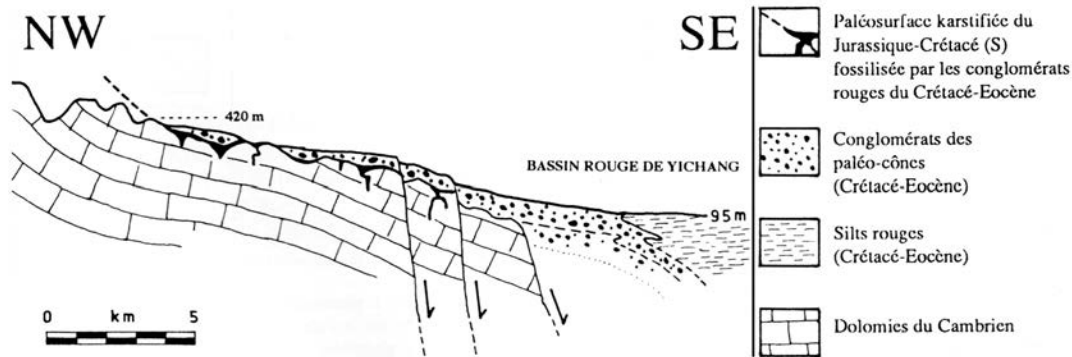


Figure 8: Coupe schématique de la bordure nord-ouest du bassin rouge de Yichang. Paléosurface karstique du Crétacé fossilisée par les conglomérats (à gauche). Schematic cross section of the Yichang red basin (NW border). The cretaceous karstic surface is fossilized by the conglomerates (on the left).

1) Le bassin de Huishui (Guizhou) d'une superficie de 22 km² est situé à 60 km au sud de Guiyang (figure 1). Ce petit bassin rouge intramontagnard – localisé au sein d'un karst à *fenglin*-ouvala – est connu grâce à plusieurs sondages (figure 7) [Maire, 1991]. Au sommet, la couche de marnes rouge-pourpre a une épaisseur maximum de 115 m. Elle renferme un peu de craie et une dizaine de passées gypseuses de 10 à 20 mm d'épaisseur chacune. La granulométrie diminue de la base au sommet. Ces dépôts renferment également des graviers et galets de quartz vers le sommet. La couche inférieure, de nature conglomératique, affleure sur les bordures. Sa puissance peut atteindre 140 m. Les éléments calcaires et dolomitiques enrichis de quelques silex mesurent 2 à 20 cm de diamètre. Le ciment est carbonaté. Le classement est variable et la granulométrie diminue de la base au sommet. D'après la faune, les marnes rouge-pourpre appartiennent au début du Crétacé supérieur (*Talicypridea* sp., *T. Latiovata*, *Cypria* sp., *Tangxiell* sp.) (d'après Song Shixiong, comm. écrite).

2) Le bassin de subsidence de Yichang, d'une superficie de plusieurs milliers de km², constitue le piémont proximal du bassin versant du Yangtse à la sortie des Trois Gorges. Des conglomérats sur les bordures et des silts rouges au centre – épais de plusieurs centaines de mètres – reposent en discordance sur la surface karstifiée des calcaires et dolomies du Paléozoïque vers 400-450 m d'altitude. Ce contact est visible au nord de Yichang et à l'ouest de Zhicheng sur les dolomies cambriennes (figure 8). Cette série continentale, appelée localement « formation de Donghu » est datée de la fin du Crétacé et du début de l'Éocène.

Les conditions de sédimentation sont typiques de cônes-deltas et de zones

lacustres. Ces formations rouges, attribuées soit au Crétacé/Crétacé supérieur, soit au début de l'Éocène (ou au deux), sont des dépôts détritiques (conglomérats, grès et silts) provenant de l'érosion des reliefs et du décapage des altérites rouges (sols riches en fer) pendant la dernière grande phase tectonique de Yanshan.

Dans le cas du bassin rouge de Yichang, le schéma de l'évolution est le suivant :

- au Jurassique-Crétacé, lente et puissante altération-karstification des reliefs karstiques et non karstiques (paraplatforme du Yangtse) sous climat chaud et humide pendant les périodes de quiescence tectonique ;
- au Crétacé (troisième phase tectonique de Yanshan), décapage des altérites rouges (sols ferrallitiques ou ferrugineux), érosion générale des reliefs et sédimentation déritique dans les bassins et sur les piémonts ;
- au Tertiaire (depuis l'Oligo-Miocène), surrection de la paraplatforme du Yangtse (orogénèse himalayenne), subsidence du bassin de Yichang et alluvionnement ;
- au Plio-Quaternaire, poursuite du soulèvement et de l'alluvionnement ; cinq terrasses étagées ont été dénombrées à la sortie des gorges du Yangtse et plusieurs sont également visibles dans les gorges de cette même rivière [Maire, 1991].

La coupe de Yichang montre une dépression remplie par un poudingue très altéré. La pétrographie des éléments des poudingues indique à la fois une origine locale et lointaine des matériaux. La présence de graviers de quartz porphyrique prouverait que la vallée du Changjiang (Yangtse) et la zone des gorges ont commencé à se former au Jurassique-Crétacé lors de l'orogénèse polyphasée de Yanshan [Wang, 1984]. Les gorges du Changjiang seraient donc des gorges antécédentes qui

se seraient fortement approfondies au cours de la surrection tertiaire (tectonique himalayenne) entraînant l'épirogenèse de la paraplatforme du Yangtse.

B. Paléokarsts du Précambrien au Mésozoïque

Les forages, les tunnels et les puits de mine ont apporté des indications précieuses sur les paléokarsts, en particulier ceux du Paléozoïque. Les karsts de la Chine du sud-ouest présentent un éventail important d'indices paléokarstiques qui sont les témoins des multiples phases de karstification qui se sont succédé depuis le Précambrien. Ces phases anté-tertiaires ont une incidence faible sur le relief actuel mais elles présentent un intérêt important sur le plan paléogéographique et au niveau des processus mis en jeu.

1) Karstification au Précambrien

En Chine, plusieurs lacunes sédimentaires à l'intérieur du Sinien (850-570 Ma) et entre le Sinien et le Cambrien – correspondant à des phases d'émersion et d'orogénèse – ont permis des karstifications [Daoxian, 1991]. En Chine du sud, dans le comté de Kaiyang (Guizhou), un sondage dans les pélites du Cambrien a atteint une surface d'érosion située sur le substratum carbonaté du Sinien. Ce dernier renferme une cavité qui a nécessité plusieurs tonnes de ciment pour son colmatage. En Chine du nord, l'épaisseur du Sinien est réduite à cause d'une forte érosion au Précambrien ; par exemple dans le comté de Xushui (Hebei), les dolomies du Sinien moyen (photo 9) sont recouvertes en discordance par des dépôts ferrugineux du Sinien supérieur [Zhang, 1989]. Les formes karstiques fossilisées sont des dépressions de taille décimétrique (figure 9). Le Protérozoïque supérieur a été suffisamment long et les surfaces concernées suffisamment vastes

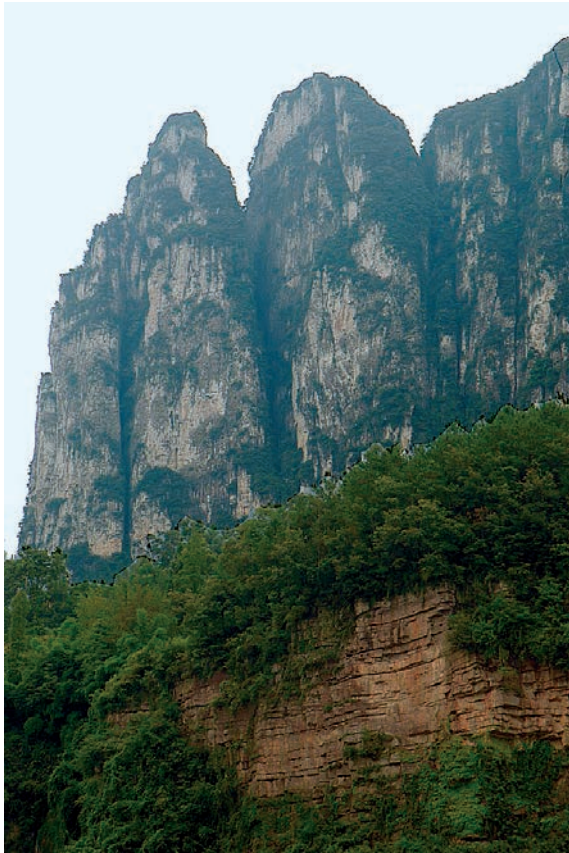


Photo 9: Les dolomies du Sinien (700 - 800 Ma) présentent localement des paléokarsts datant du Précambrien, partie aval des Trois Gorges du fleuve Yangtsé. Cliché R. Maire. *Sinian dolomites (700 - 800 Ma) with Precambrian paleokarsts, downstream sections of Three Gorges (Yangtse).*

pour permettre des types de karstification très différents, aussi bien dans des conditions tropicales (ferralites de Xushui/Hebai) que glaciaires ou périglaciaires (varves fluvio-glaciaires du Sinien, Yangtse).

2) Karstification au Paléozoïque

Le Paléozoïque a connu de très importantes phases de karstification à la suite des orogénèses calédonienne (Paléozoïque inférieur) et varisque (Paléozoïque supérieur).

Les formes paléokarstiques affectant les roches carbonatées de l'Ordovicien (Paléozoïque inférieur) sont typiques de l'orogénèse calédonienne sur la paraplata-

forme de Chine-Corée. Ainsi, dans le Shanxi (gorge du Huanghe), la surface karstifiée de l'Ordovicien moyen est fossilisée par les roches clastiques du Carbonifère moyen. Ce paléokarst est caractérisé par des dépressions (ponors, dolines), des cavités, des altérites et dépôts métallifères (bauxite, argile réfractaire, poches de fer). L'une des plus grandes paléodépressions mesure 60 x 120 m de large et

20 m de profondeur ; elles sont remplies par de la bauxite et des sédiments clastiques. Les cavités proches de la surface ordovicienne sont fossilisées par des sédiments détritiques du Carbonifère. Dans le Guizhou central, bauxite et fer se sont accumulés sur le sommet des terrains carbonatés du Cambrien et sont recouverts en discordance par les dolomies du Carbonifère moyen. En Chine occidentale, sur la marge nord de la plateforme Talimu, l'Ordovicien moyen carbonaté, épais de 200 m, présente une paléoplain karstique de dénudation (paléotopographie ondulée) qui a été dégagée en divers points. Dans le comté de Huanghua (Hebei), à 90 km au sud

de Tianjin, un forage profond a recoupé une cavité dans l'Ordovicien calcaire situé à 1 000 m sous le niveau marin actuel. L'eau rejetée par artésianisme contenait une grande quantité de fragments de stalactites [Daoxian, 1991]. Ce type de paléocavité karstique, situé très bas sous le niveau marin actuel, s'explique par les mouvements tectoniques de subsidence.

Les phases karstiques sont nombreuses pendant l'ensemble du cycle hercynien (orogénèse varisque, paléozoïque supérieur). Des paléokarsts ont été découverts entre le Dévonien et le Carbonifère, à la fin du Carbonifère et du Permien. Mais la phase karstique la plus importante se situe entre le Permien inférieur et supérieur au cours de l'épisode tectonique Dongwu. Les indices paléokarstiques du Permien sont largement répandus dans les roches carbonatées de la fin du Permien inférieur de la Chine : dépôts de bauxite et d'argile réfractaire dans les paléodépressions, cavités jouant le rôle de réservoirs pour le gaz naturel. D'après les statistiques minières, pour la partie sud du bassin du Sichuan, 25 % environ des forages dans le Permien inférieur (gaz naturel) ont recoupé des cavités (une quarantaine). Dans l'un des puits, à 2 900 m de profondeur (soit 2 400 m sous le niveau marin), une cavité non colmatée a été recoupée sur 4,5 m de haut. Le forage a ensuite fonctionné en puits artésien [Daoxian, 1991]. Ces réservoirs de gaz naturel du Sichuan méridional concernent la série Yangxin du Permien inférieur et sont du type cavité-fracture karstique. Ce paléokarst s'est formé à la fin du mouvement épirogénétique Dongwu. Mais ces réservoirs karstiques contiennent également des cavités formées au cours du Tertiaire lors de l'orogénèse himalayenne [Huang et Wu, 1985].

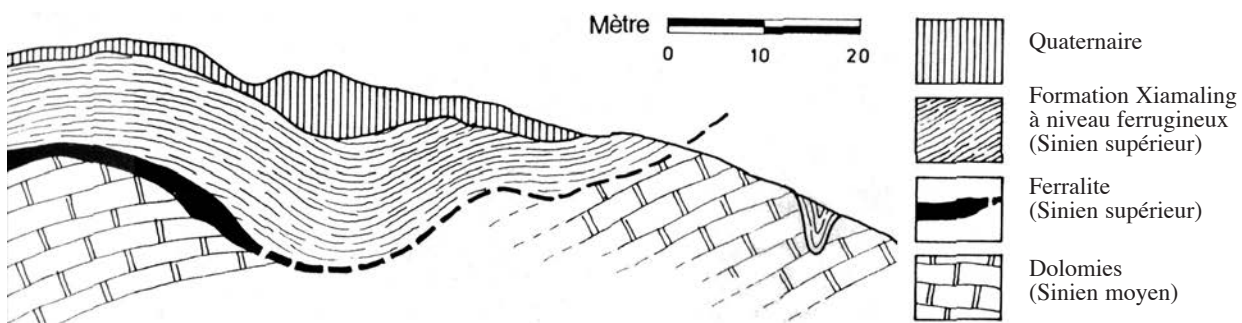


Figure 9: Paléokarst précambrien (Sinien) de Xushui (Hebei). Paléodépressions fossilisées par des dépôts ferrugineux du Sinien supérieur. *Sinian paleokarst of Xushui (Hebei). Old depression fossilized by ferruginous deposits from Upper Sinian.*

3) Karstifications au Mésozoïque

Au Trias moyen, les mouvements liés à la tectonique du cycle indo-chinois sont à l'origine d'une surface karstifiée qui a été préservée par les sédiments clastiques du Jurassique. Dans le bassin du Sichuan, des cavités fossilisées ont été recoupées par forage à 40 m sous la paléosurface triasique. Quand les terrains détritiques du Trias supérieur ne sont pas complètement érodés, les couches de gypse sont relativement bien conservées. Des brèches de dissolution se sont formées près de la paléosurface karstique durant la dissolution du gypse [Zhang, 1989]. Dans le sud du Hunan, des paléokarsts sont liés à la phase tectonique indosinienne et au début de l'orogénèse de Yanshan. Les dépôts sont piégés dans des fractures, des conduits et des dépressions (uranium, cuivre, plomb, zinc...). Les concentrations d'uranium et de cuivre dans ces dépôts karstiques sont liées à un environnement hydrologique confiné et noyé [Liu et al., 1985].

La karstification au Jurassique et au Crétacé est mal connue. La Chine était alors émergée et faisait partie d'un ancien continent sino-australien. Cette très longue période a été caractérisée par le cycle orogénique de Yanshan qui se subdivise en trois phases tectoniques : deux au Jurassique (Y1 et Y2, entre 190 et 137 Ma) et une au Crétacé (Y3, entre 137 et 67 Ma) [Lee, 1989], la dernière s'étant poursuivie à l'Éocène. Ces puissants mouvements, liés à la fermeture de l'ancien océan thétysien, sont responsables en grande partie de la structure plissée observable aujourd'hui. Ils ont été accompagnés par des mouvements de subsidence dès le Jurassique, cas du bassin du Sichuan qui a servi de réceptacle aux épaisses séries détritiques et lacustres du Jurassique et du Crétacé (grès, couches

rouges, évaporites) sur une épaisseur de plusieurs milliers de mètres.

Pendant les phases de quiescence tectonique, sans doute fort longues, les terrains carbonatés et non carbonatés de la paraplatforme du Yangtse ont été profondément altérés. Chaque phase tectonique a permis le nettoyage de la couverture d'altérites et l'accumulation des sédiments sur les piémonts. Le processus de « fantômisation » et de crypto-karstification a dû se développer largement pendant des dizaines de millions d'années entre chaque crise tectonique dès lors que l'on était en position de niveau de base proche, la roche « baignant » dans la nappe phréatique.

Les arguments géomorphologiques et géochimiques permettent de penser que l'érosion post-triasique est responsable de la disparition d'une colonne sédimentaire de près de 2000 m d'épaisseur. Cette érosion est prouvée par le degré d'évolution de la vitrinite dans les couches de charbon du Permien comme dans le district de Zhijin - Guizhou [Mouret, 1991]. Les relations morphogénétiques entre tectonique et niveau de base sont difficiles à apprécier. Compte tenu de la succession des phases tectoniques de Yanshan, on peut supposer que des paysages karstiques à *qiufeng* (karst à collines basses), *fenglin* (karst à cônes, tours et pitons) et *shilin* (karst à forêt de pierre) du même type qu'aujourd'hui, se sont développés, puis ont totalement disparu par dissolution et érosion mécanique. Seule la morphologie karstique fini-crétacée/éocène, fossilisée en bordure des bassins par les conglomérats et formations rouges, constitue un témoignage de la fin de cette période comme sur la bordure du bassin de Yichang. Cette évolution morphologique de la paraplatforme du Yangtse au cours du Mésozoïque s'est

effectuée dans le cadre complexe de la résorption de l'océan thétysien, avec le rapprochement des domaines eurasiatique et gondwanien qui va donner naissance, au Tertiaire, au domaine himalayen.

Conclusion

Cette succession de cycles morphogénétiques présente, dans le détail, de multiples possibilités d'évolution. Le schéma davisien (phases de jeunesse, maturité, sénilité), longtemps rejeté en bloc, reprend une partie de sa pertinence dans la compréhension de l'évolution des karsts chinois. Par exemple, le passage d'un stade de jeunesse à un stade de maturité puis de sénilité morphologique se marque :

- dans les séries sédimentaires, où alternent roches imperméables et carbonates, par les stades de creusement fluvial puis fluvio-karstique et enfin karstique (figure 10) ;
- dans une série carbonatée très épaisse, par les stades des karsts à collines basses, puis karsts à cônes, tours et pitons et enfin karsts à inselbergs et plaine fluvio-karstique.

Nos travaux montrent l'intérêt des explorations spéléologiques : les cavités recèlent des coupes naturelles qui permettent des observations inédites. Ce voyage dans le temps constitue un des privilèges du karst, du fait de sa fonction conservatrice, de transmettre la mémoire du passé qu'il convient de déchiffrer avec les concepts et les outils adéquats. Au sein de la géomorphologie, la karstologie occupe donc une place originale.

Enfin, nous montrons que le temps long de la géologie et moyen de la géomorphologie conditionnent le temps court des hommes. Dans la Chine du sud-ouest, les altérites, support nourricier

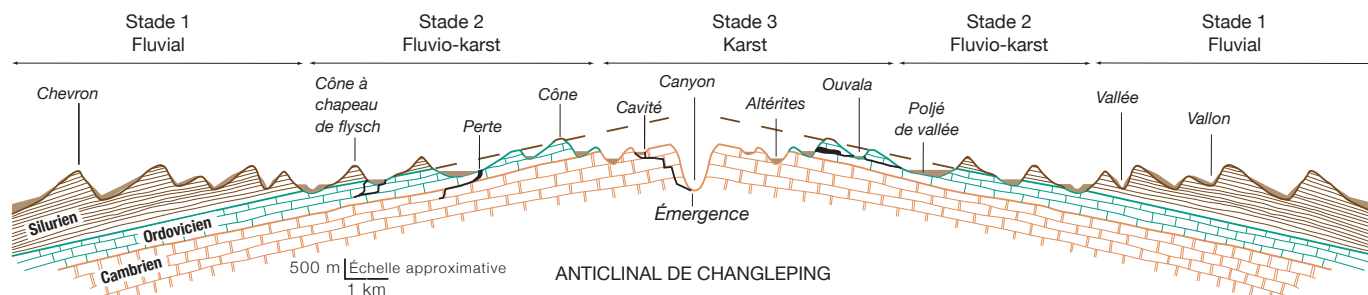


Figure 10: Suite aux déforestations et en fonction de l'importance du décapage de la couverture non carbonatée silurienne, les paysages montrent un fonctionnement fluvial (altérites épaisses), fluvio-karstique (altérites de moyenne à faible épaisseur) ou karstique (altérites résiduelles) (anticlinal de Changleping, cf. figure 2A pour la localisation). Cover clay erosion: the landscapes show an evolution from fluvial stage (youth stage) to karst stage (maturity stage) (Changeling anticline, location: figure 2).

de l'agriculture, résultent d'une longue évolution géochimique remontant au Tertiaire. Ces couvertures meubles sont issues essentiellement de l'altération d'anciennes couvertures non carbonatées du Paléozoïque et du Trias. La disparition anthropo-climatique (déforestation et climat subtropical) des sols en terrains karstiques représente donc une perte irréversible à l'échelle humaine (photo 10).

Mais l'étude d'une région karstique n'est pas simple d'emblée car des entités qui répondent à des logiques d'évolution différentes peuvent coexister sur le même plan. De plus, dans l'évolution des milieux, le passage progressif d'une organisation à une autre n'existe pas forcément. J.-J. Delannoy [1997] montre la succession des phases de quiescence puis d'accélération de la morphogenèse du Vercors à travers le concept de « brisure temporelle » ou « brisure de la symétrie du temps » emprunté à I. Prigogine



Photo 10: Les « paysages lunaires » du district d'Anlong, Guizhou. Karst conique déforesté à couverture pédologique fortement érodé (désertification). Cliché R. Maire.

Anlong district, Guizhou province: the "moon landscapes". Deforested cone karst landscape with highly eroded soil (desertification).

[1996]. Ces ruptures enregistrées dans la « mémoire » du karst ont été générées par des événements paléogéographiques ou morphologiques majeurs : crises tectoniques, climatiques, anthropiques, etc. Chaque archive karstique morphologique

et sédimentaire est un indicateur du fonctionnement d'un environnement particulier qu'il faut savoir replacer dans son contexte, d'où la nécessité de travailler à différentes échelles d'espace et de temps [Vanara, 2011].

Bibliographie

BARBARY J.-P., BOTTAZZI J., COLLIGNON B., ZHANG D., MAIRE R. MOUDOUD J.-L. et CHEN S., 1991 - Le système de la rivière Gebihe (Ziyun, Guizhou). In BARBARY J.-P., MAIRE R. et ZHANG S. - *Grottes et karsts tropicaux de Chine méridionale. Gebihe 89. Karstologia mémoires* n° 4, p. 42-54.

BRAUDEL F., 1949 - *La Méditerranée et le monde méditerranéen à l'époque de Philippe II*. Armand Colin édit., Paris, 1160 p.

CAMUS H., 2003 - Vallées et réseaux karstiques de la bordure carbonatée sud cévenole. Relations avec la surrection, le volcanisme et les paléoclimats. Thèse, centre national de la Recherche scientifique. 438 p.

CHEN S. and YU P.-L., 2017 - Early « Neolithics » of China: variation and evolutionary implications. *Journal of anthropological research*, 73 (2), p. 149-180.

DAOXIAN Y., 1991 - *Karst of China*. Geological Publishing House, Beijing, 224 p.

DELANNOY J.-J., 1997 - *Recherches géomorphologiques sur les massifs karstiques du Vercors et de la transversale de Ronda (Andalousie). Les apports morphogéniques du karst*. Thèse de doctorat d'État, université de Grenoble 1, 678 p.

EHRENSTEIN V., 2014 - *Géopolitique du carbone: l'action internationale pour le climat aux prises avec la déforestation tropicale*, thèse École nationale supérieure des Mines de Paris, Paris, 538 p.

FAIRBANK J.K. and GOLDMAN M., 2006 - *China: a new history*. Belknap press of Harvard university press, Cambridge, 750 p.

FLEITMANN D., CHENG H., BADERTSCHER S., EDWARDS R.L., MUDELSE M., GOKTURK O.M., FANKHAUSER A., PICKERING R., RAIBLE C.C., MATTER A., KRAMERS J. and TUYSUZ O., 2009 - Timing and climatic impact of Greenland interstadials recorded in stalagmites from northern Turkey. *Geophysical research letters*, vol. 36, 5 p.

GABROVSEK F., MIHEVC A., OTONICAR B. and ZUPAN HAJNA N., 1998 - Speleological exploration at Tianshengqiao natural bridge, Shuicheng. In CHEN Xiaoping coord. - *South China Karst. Ljubljana: Znanstvenoraziskovalni center, Slovenske akademije znanosti in umetnosti, Zalozba ZRC*, p. 161-169.

GENTY D., COMBOURIEU-NEBOUT N., PEYRON O., BLAMART D., WAINER K., MANSURI F., GHALEB B., ISABELLO L., DORMOY I., GRAFENSTEIN VON U., BONELLI S., LANDAIS A. and BRAUER A., 2010 - Isotopic characterization of rapid climatic events during OIS3 and OIS4 in Villars Cave stalagmites (SW-France) and correlation with Atlantic and Mediterranean pollen records. *Quaternary Science Reviews* n° 29, p. 2799-2820.

HE B., 1991 - *China on the edge. The crisis of ecology and development*. China books and periodicals, San Francisco, 208 p.

HUANG H. and WU B., 1985 - Origin of karstified gas reservoirs of the Lower Permian (Yangxin series) and their distribution in Southern Sichuan (en chinois). *Carsologica Sinica*, vol. 4, n° 4, p. ?

LEE K.-Y., 1989 - Geology of petroleum and coal deposits in the North China Basin, Eastern China. *U.S. Geological Survey Bulletin*, Denver n° 1871, 36 p.

LIU L., LI Y., ZHU K. and WANG Z., 1985 - Karstification stages of mesozoic era and tertiary period in south Yunnan, China /résumé en anglais/. *Carsologica Sinica*, vol. 4, n° 4, p. 307-314.

MAIRE R., 1991 - Les remplissages karstiques. In BARBARY J.-P., MAIRE R. ET ZHANG SHOUYUE - *Grottes et karsts tropicaux de Chine méridionale. Gebihe 89. Karstologia mémoires* n° 4, p. 132-149.

MAIRE R., BARBARY J.-P., ZHANG S., VANARA N. et BOTTAZZI J., 2004 - Spéléo-karstologie et environnement en Chine (Guizhou, Yunnan, Liaoning). *Karstologia mémoires* n° 9, 560 p.

MOURET C. - 1991 - Le degré d'évolution diagénétique de la matière organique sédimentaire (indicateur de la couverture érodée en région karstique, application au district de Zhijian, Guizhou). In BARBARY J.-P., MAIRE R. ET ZHANG SHOUYUE - *Gebihe 89. Grottes et karsts tropicaux de Chine méridionale. Karstologia mémoires* n° 4, p. 187-191.

POMEL S., 1995 - Le karst et l'évolution des paysages agraires (rappel de l'histoire rurale en Chine et donation des cultures dans les montagnes du Hubei-Hunan). In BARBARY J.-P., MAIRE R.; ZHANG S., POMEL S. ET COLLIGNON B. - *Donghe 92. Karsts de Chine centrale. Karstologia mémoires* n° 6, p. 175-198.

PRIGOGINE I., 1996 - *La fin des certitudes*. Odile Jacob édit., Paris, 226 p.

PUIG H., 2001 - *La forêt tropicale humide*. Belin édit. Paris, 447 p.

VANARA N. et MAIRE R., 2006 - Des processus naturels et anthropiques à l'archivage sédimentaire: les indicateurs du milieu enregistrés dans les karsts subtropicaux de Chine. *Table-ronde en l'honneur de R. Neboit-Guilhot: l'érosion entre société, climat et paléoenvironnement, CERAMAC, Presses universitaires Blaise Pascal, Clermont-Ferrand*, p. 151-158.

VANARA N. et MAIRE R., 2009 - Typology, genesis and evolution of tunnel-caves in Southwestern China. *15th International Congress, I.C.S.: "Karst hydrogeology and geomorphology symposia", July 19-26, 2009, Kerrville, Texas, E.U.*, p. 998-1002.

VANARA N., 2011 - *Diversité et sensibilité des archives karstiques. Application aux montagnes calcaires humides (Pyrénées, Caucase et Chine)*. Thèse d'Habilitation à diriger des recherches, université Paris 1 - Panthéon-Sorbonne, volume 3, 283 p.

WANG Y.-J., CHENG H., EDWARDS R.L., AN Z.S., WU J.-Y., SHEN C.C. and DORALE J.A., 2001 - A high-resolution absolute-dated late Pleistocene Monsoon record from Hulu Cave, China. *Science*, vol. 294, p. 2345-2348.

XU X., 1993 - Randonnées aux sites sublimes. Traduit du Chinois présenté et annoté par Jacques DARS. *Coll. Connaissance de l'Orient, UNESCO d'œuvres représentatives, Gallimard édit.*, Paris, 392 p.

ZHANG S., 1989 - Paleokarst in China. In *Paleokarst: a systematic and regional review. Elsevier and Acad., Amsterdam and Prada*, p. 297-311.

ZHANG S. et MAIRE R., 1995 - Répartition et contexte géographique des karsts du Hubei et du Hunan. In *Donghe 92. Karsts de Chine centrale. Karstologia* n° 6, p. 1-16.

ZHANG C., QI X., WANG K., ZHANG Y. and YUE Y., 2017 - The application of geospatial techniques in monitoring karst vegetation recovery in southwest China. A review. *Progress in Physical Geography*, p. 1-31.