Chapitre 12

Aspects hydrogéologiques et spéléogénétiques de la rivière souterraine de Benxi Shuidong (Liaoning, Chine)

Zhang Shouyue [1], Shen Lingmei [2] et Richard Maire [3]

Résumé : Cet article fait le point sur les données disponibles à propos du karst de Benxi Shuidong. Cette région se développe dans les terrains paléozoïques de plate-forme de Chine du Nord. Le climat est de type tempéré assez humide (1 000 mm/an) à saisons thermiques très contrastées (juillet + 24,3°C, janvier – 14,3°C). Creusée dans les calcaires du Cambrien et de l'Ordovicien, la grotte de Benxi est un exemple de capture hypogée partielle d'une rivière (Tanghe) au profit d'une autre (Taizihe). Ce système perte-résurgence, d'une extension totale de 4,75 km, présente une rivière souterraine aménagée sur plus de 2 km et une partie noyée à semi noyée qui a été explorée sur 616 m de développement. Les traçages indiquent une vitesse de transit de 68 m/h pour toute la partie noyée à semi-noyée (extension 3,15 km, pente de 0,4 %) et de 100 m/h pour la rivière souterraine aménagée (extension 1,6 km, pente 0,37 %). En basses eaux, les analyses hydrochimiques montrent une forte dissolution dans la zone noyée et semi noyée (et dans la zone de percolation) et une faible dissolution dans la zone d'écoulement libre. La nette augmentation de la pCO_2 dans la grotte (de 400 à 3 000 ppmv) est liée à la fréquentation de 300 000 à 500 000 touristes par an. Les datations U/Th sur les spéléothèmes donnent des âges s'échelonnant entre l'Holocène (9 300 ans BP) et le stade isotopique 6 (145 000 ans BP). Les âges de la génération de concrétions la plus ancienne datent la phase de passage du régime phréatique au régime d'écoulement libre. Le système karstique s'est donc formé probablement au cours du Pléistocène moyen. Les premières concrétions attribuées au stade 6 correspondent à des stalagmites modestes situés 17 m au-dessus du niveau de la rivière. Le stade 5 (interglaciaire majeur), caractérisé par un climat tempéré humide, se traduit par un alluvionnement souterrain important et par d'importants spéléothèmes. Durant la dernière phase froide (stade 2), la croissance des spéléothèmes s'arrête, puis reprend vers 13 700 ans et se développe largement à partir du début de l'Holocène vers 10 000 ans BP.

Mots-clés : hydrogéologie, spéléomorphologie, spéléogenèse, Benxi, Liaoning, Chine.

Abstract: Hydrogeologic and speleogenetic features of Benxi Water Cave (Liaoning, China).

The karsts of Benxi area develop in the paleozoic carbonated rocks of North China Platform. The temperate climate is characterized by very contrasted seasons (+ 24.3°C in july, - 14.3°C in january). Benxi Water Cave is a typical subterranean piracy of a surface river (Tanghe) by another one (Taizihe) formed in Cambrian and Ordovician limestones. This sink-resurgence system (length = 4.75 km) presents an underground river of 2.2 km long and a saturated and half saturated part explored on 616 m long.

The water tracings indicate a speed of 68 m/h for all the saturated zone (length = 3.15 km, slope = 0.4 %) and of 100 m/h for the underground river (length = 1.6 km, slope = 0.37 %). In low waters, the hydrochemical analyses show a strong dissolution in the saturated zone (and in the percolation zone) and a weak dissolution in the vadose zone. The pCO_2 increase into the cave (from 400 to 3 000 ppmv) is related to the 300 000 to 500 000 tourists per year.

Eleven U/Th datings on various speleothems, indicate ages between Holocene (9 300 years BP) and the isotopic stage 6 (145 000 years BP). The oldest concretion indicate the beginning of the vadose flow. So the karstic system probably formed during Middle Pleistocene. The first concretions of stage 6 are small stalagmites located 17 m above the river level. Characterized by a wet and warm climate, the stage 5 (main interglacial) provokes a significant underground aggradation and a strong calcite precipitation. During the last cold phase (stage 2), the calcite precipitation stops ; it begins again around 13 700 years and develops during Holocene period.

Key-words: hydrogeology, speleomorphology, speleogenesis, Benxi, Liaoning, China.

1. Karst and Groundwater Research Division, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing.

2. Benxi Water Cave, Benxi, Liaoning.

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

Photo 405 : Le lit de la rivière Tanghe présente des pertes qui alimentent la grotte de Benxi Shuidong. Le système perte-résurgence a une extension totale de 4,75 km.

The sinkholes of Tanghe river form the Benxi Shuidong system. The distance between sinks and resurgence is 4.75 km.

Photo R. Maire 1997

第十二章　辽宁本溪水洞水文地质和洞穴成因特征

本溪地区喀斯特发育在中朝地块寒武—奥陶纪碳酸盐岩中，温带气候特征是季节反差很大，七月份平均温度 24.3℃，一月份为零下 14.3℃。水洞是典型的一条地表河（汤河）被另一条地表河（太子河）地下袭夺的例子，进出水口系统直线距离 4.75 km，呈现出 2.2 km 长的暗河及探查了 615 m 的充水和半充水洞段。暗河示踪试验表明在充水、半充水洞段及其上游地下水流速 68 m/h（直线距离 3.15 km），而直线距离 1.6 km 暗河旅游洞段的流速为 100 m/h。在非洪水季节，水化学分析表明，渗流带水强烈的溶解，饱水带的水具较低的溶解组分。洞内 pCO_2 的增大（从 400 到 3000 ppmv）与年游客量 30—50 万人有关。对 11 件各类洞穴钙质沉积物铀系测年得悉年令在全新世（距今 9500 年）和西太平洋 V28－239 深海岩心同位素记录第六古气候期（距今 145,000 年）之间。该洞穴系统可能形成于中更新世时期。最老的距今 128 000 至 195 000 年的第六古气候期钙质沉积物是位于暗河水面以上 17 m 处的小石笋。以暖湿气候为特征的第五古气候期（主要的间冰期，距今 75 000 至 128 000 年）引发重要的地下堆积和强烈的钙质沉积。在最近一次寒冷期（第二古气候期，距今 13 000 至 32 000 年），钙质物停止沉积，再次开始沉积约距今 13 000 年，并且于全新世时期发育。

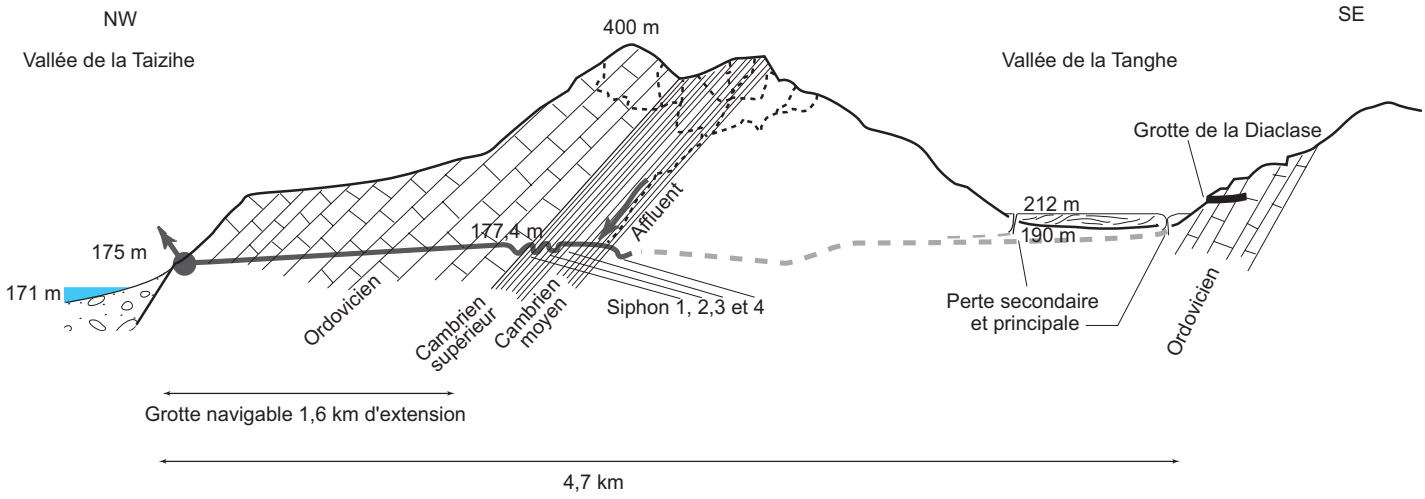


Figure 176 : Coupe hydrogéologique schématique montrant les relations entre les pertes sous-fluviales de la Tanghe et la résurgence de Benxi Shuidong située dans la vallée de la Taizihe.

Hydrogeological section showing the relation between the sinks of Tanghe and the resurgence of Benxi Shuidong.

Figure R. Maire (d'après les données de Benxi Water Cave).

Introduction

Benxi Shuidong est un exemple de recoupement souterrain d'un massif, avec capture partielle d'une rivière de surface (Tanghe) par une autre rivière (Taizihe). Le processus est identique à un recoupement souterrain de méandre, mais en plus complexe car le système perte-résurgence mesure presque 5 km d'extension. Située sur la partie occidentale des montagnes du Liaoning oriental, dans le bassin de la rivière Taizihe, ce secteur karstique de basse altitude est contrôlé par un climat de type tempéré humide (41° 18N et 124° 05E) avec des précipitations annuelles de 800 à 1 000 mm.

De nombreuses recherches et investigations ont été menées à Benxi Shuidong : fouilles archéologiques, études hydrogéologiques, recherches karstologiques et explorations en plongée. La grotte a été ouverte au public en 1983. En 1994, elle a obtenu le statut de site touristique d'intérêt national et est devenue membre de l'I.S.C.A. (*International Show Cave Association*). Le nombre de visiteurs varie de 300 000 à 500 000 par an. Les nouvelles explorations effectuées en 1997 sont présentées dans le chapitre 7. Dans ce chapitre, nous faisons un bilan succinct des connaissances hydrogéologiques et spéléogénétiques, notamment à partir des travaux conduits par les chercheurs locaux [Pan, Gao and Wei, 1993 ; travaux de Shen Lingmei] et par les collaborations avec d'autres laboratoires comme l'Institut du Karst de Guilin (1996) et l'Institut de Géologie de Pékin.

I. Contexte géologique

Les karsts de la région de Benxi se développent dans des terrains carbonatés anciens (Précambrien supérieur à Ordovicien) inclus dans la plate-forme de Chine du Nord (ou plate-forme de Chine-Corée). La série carbonatée d'origine marine (sédimentation épicontinentale) présente :
- des calcaires oolithiques du Cambrien moyen ;
- des calcaires et niveaux argileux du Cambrien supérieur ;
- des calcaires massifs de l'Ordovicien inférieur et des calcaires à pyrite et dolomie de l'Ordovicien moyen (formation Majiogou).

La grotte est creusée à la base de la formation Majiogou, dans une couche grise de calcaires et dolomies stratifiés, épaisse de 60 à 70 m. La partie supérieure est formée par une série de plus de 550 m de puissance comportant des calcaires noirs et tachetés, des calcaires dolomitiques et des brèches.

Du point de vue structural, la région de Benxi appartient à la partie nord du bloc faillé du Liaoning, unité tectonique triangulaire comprenant au sud les montagnes de la péninsule de Shandong et au nord le bloc montagneux de la partie orientale du Liaoning. Le massif de la grotte de Benxi est situé dans la partie sud d'un long synclinal orienté est-ouest. Les terrains carbonatés de l'Ordovicien moyen présentent un pendage nord-ouest de 15 à 40°. La fracturation majeure est d'orientation NW-SE.

Les échantillons de roches prélevés et analysés en 1997 (chap. 7) ont permis de préciser le contexte litho-stratigraphique de la grotte, en particulier au-delà du siphon 1. La partie visitable en bateau est creusée dans les calcaires ordoviciens sur les premiers 1 800 m (faille NW-SE), depuis le porche d'entrée jusqu'au grand coude terminal. Au-delà le réseau se développe dans les calcaires sombres du Cambrien. Dans la partie située après le siphon 1, le calcaire à lits argileux est attribué au Cambrien supérieur, puis le réseau se poursuit au contact du Cambrien supérieur et du Cambrien moyen.

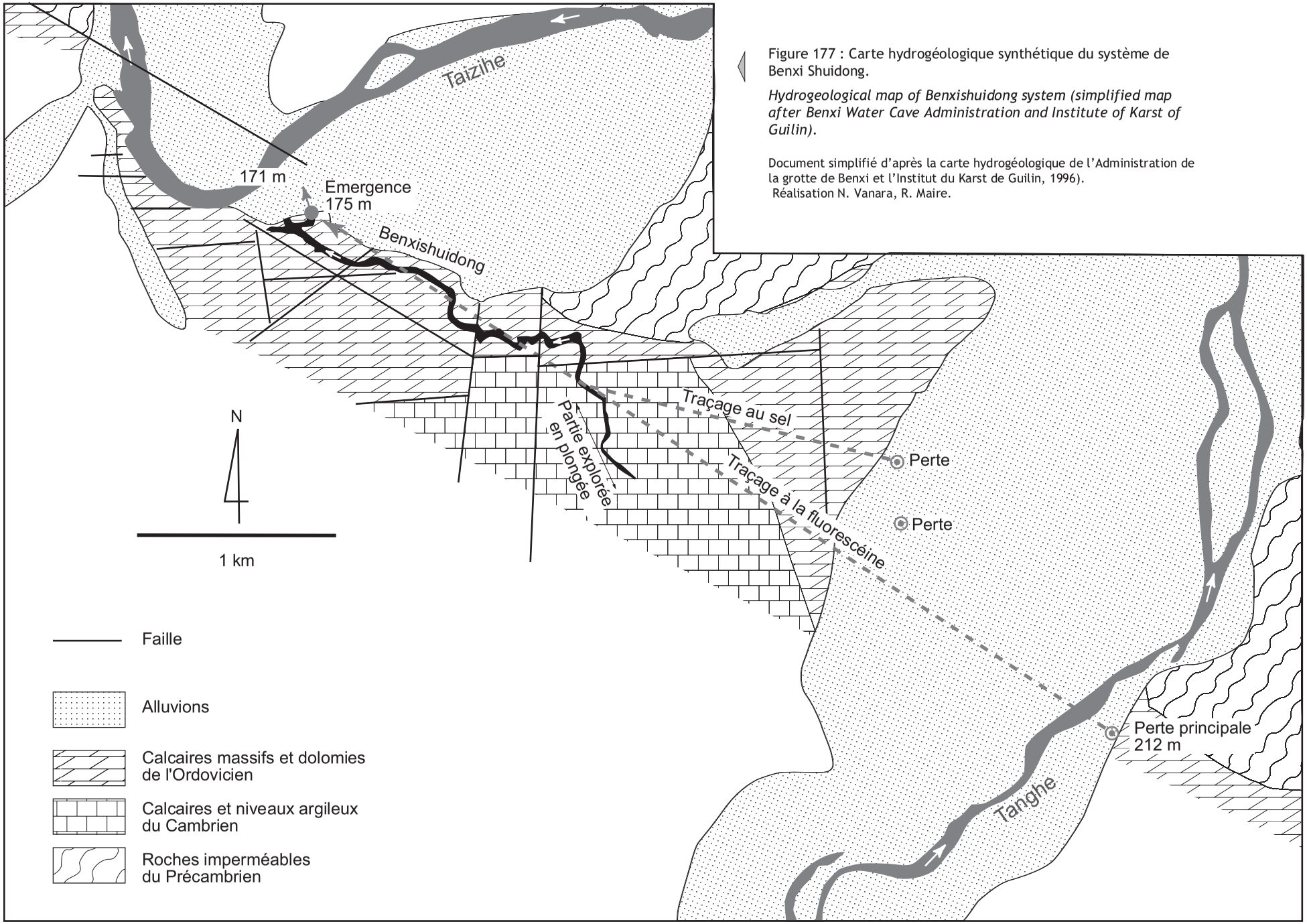


Figure 177 : Carte hydrogéologique synthétique du système de Benxi Shuidong.

Hydrogeological map of Benxishuidong system (simplified map after Benxi Water Cave Administration and Institute of Karst of Guilin).

Document simplifié d'après la carte hydrogéologique de l'Administration de la grotte de Benxi et l'Institut du Karst de Guilin, 1996).
Réalisation N. Vanara, R. Maire.

II. Contexte hydrogéologique

A. Hydrologie

Le climat régional est de type tempéré assez humide à saisons thermiques très contrastées (lat. 41°20'). Les précipitations moyennes sont de 800 à 1 000 mm/an et tombent à 75 % en été (juillet-août-septembre). La température moyenne annuelle est de 7°C. Juillet est chaud (moy. 24,3°C, max. 35°C) et janvier est très froid (moy. - 14,3°C, min. - 37,9°C). Les rivières sont gelées entièrement pendant quinze jours.

La vallée de la rivière Tanghe, large de 0,8 à 2 km, présente une couche de sables et de graviers de 20 à 30 m d'épaisseur. Les trois quarts de l'alimentation de la rivière souterraine se font dans le lit principal de la rivière. En saison sèche, le bras de rive droite de la Tanghe, localisé à proximité du versant, absorbe toute l'eau à la cote 212,5 m. En raison de l'épaisse couche d'alluvions, le niveau du substratum rocheux de l'Ordovicien est vers la cote 190 m (fig. 176). Comme la cote du siphon 1 est à 177,4 m, il existe un potentiel hydraulique de 12,60 m pour la partie supposée noyée d'une extension de 3,15 km, soit une pente de 0,4 %. La partie aménagée (extension 1,6 km), entre la résurgence (175 m) et le siphon 1 (177,4 m), a une pente apparente plus faible de 0,16 % en raison de la remontée artificielle du niveau de la rivière permettant la navigation. En réalité, les griffons sont situés quelques mètres plus bas, au nord, entre 175 et 171 m. La pente réelle est donc de l'ordre de 0,37 %.

La perte de la cote 212,5 m a servi de point d'injection de 43 kg de fluorescéine pour l'expérience principale de traçage [Benxi Water Cave *et al.*, 1996]. L'étude hydrogéologique a également montré que d'anciennes pertes existaient en plusieurs points de cette large vallée alluviale, notamment en rive gauche, à proximité du petit massif montagneux culminant vers 500 m d'altitude. Certains effondrements ont été rebouchés.

Le niveau de la Taizhihe est à l'altitude de 170,9 m au droit de la grotte de Benxi. La résurgence principale plonge jusqu'à - 13 m (cote 162 m), donc 8 m sous le niveau actuel de la rivière.

Dans la grotte, une porte écluse de 1,5 m de hauteur facilite l'embarquement sur la rive gauche de la rivière et assure le tiers de l'évacuation du cours d'eau par une galerie en méandre dans laquelle l'eau cascade en direction des griffons nord. En hautes eaux le niveau général remonte de 1,20 m et le débit dépasse plusieurs m^3/s. Dans la partie explorée en plongée, 440 m en amont du siphon 1, la vitesse du courant est de 0,8 m/s et le débit est estimé à 0,670 m^3/s (fin septembre 1997). En utilisant un débit-mètre dans les sections endiguées les plus étroites, on trouve des débits aval et amont de 0,730 et 0,722 m^3/s. Compte tenu de la moindre précision de la mesure de débit effectuée entre les siphons 3 et 4, on constate que la rivière souterraine ne reçoit aucun affluent notable dans sa partie connue.

D'après les traçages, la vitesse de l'écoulement

Echantillon *Sample*	Ca^{2+}	Mg^{2+}	$Na^+ + K^+$	HCO_3^-	SO_4^{2-}	Cl^-	pH	TH(H°)	TDS(mg/l)
Avril mai 1996									
Tanghe river	21.93	4.00	8.70	62.53	29.00	6.17	8.0	8.1	100.70
Dripping water in vadose zone of touring section	62.85-78.90	6.15-8.60	4.40-17.25	225.32-279.90	2.0-41.00	3.55-8.80	8.1	19.8-25.8	189.65-267.80
Underground river of touring section	35.40-37.29	8.35-9.44	13.43-16.57	112.7-115.11	48.29-51.67	8.27-10.38	8.0-8.1	14.5-15.5	172.29-176.23
Septembre 1997									
Conduit water in vadose zone of diving section	80.0	9.76	8.54	204.96	55.41	10.80	7.86	13.40	242
Mars 1992									
Rain water	12.05	1.18	0.92	28.79	0.93	9.09	7.96	1.96	56.10
Dripping water in vadose zone	74.87	6.12	0.00	241.98	6.97	8.18	7.92	11.90	204
Underground river	44.98	7.42	0.00	132.82	5.30	9.80	7.90	7.85	147
Taizihe river	41.60	6.37	0.00	120.68	13.95	10.90	8.16	7.29	151

Tableau 23 : Données des analyses chimiques des eaux. Analyses : Benxi Water Cave et Institut du Karst de Guilin (1996), Institut de Géologie de Pékin.

Results of the hydrochemical analyses (after Benxi Water Cave and Karst Institute of Guilin, 1996 ; Institute of Geology, Beijing).

Photo 406 : Elément corrodé de paroi dans le calcaire cambrien prélevé dans la galerie semi-noyée située entre les siphons 3 et 4 de Benxishuidong (prélèvement J. Bottazzi).

Corroded sample of wall in the Cambrian limestone taken in the active gallery between sump 3 and sump 4 of Benxi Shuidong (sampling J. Bottazzi).

Photo R. Maire 1997

est de 68 m/h dans la partie noyée et semi-noyée et de 100 m/h dans la partie aménagée. Cette faible différence indique une liaison assez rapide entre les pertes de la Tanghe et le siphon 1. Un traçage complémentaire, effectué à partir d'une autre perte située en rive gauche, indique une vitesse moyenne apparente de 88 m/h. Dans la partie inconnue du système, considérée comme noyée à semi-noyée, l'écoulement doit donc s'effectuer dans des conduits bien constitués et non dans un système labyrinthique mal organisé.

B. Hydrochimie et dissolution

L'eau de pluie présente une minéralisation totale assez importante de 56 mg/l, mais cette eau intervient peu dans le processus de dissolution souterraine. La rivière souterraine de la grotte de Benxi présente un faciès bicarbonaté-calcique et une concentration en HCO_3^- de 112,7 et 115,1 mg/l. Le TH de 267 mg/l de $CaCO_3$ équivalent est faussé par une assez forte concentration en ions SO_4^{2-} (50 mg/l environ). Le rapport Ca/Mg est de 4,12.

Le faciès chimique de la rivière Tanghe, à proximité des pertes, est également bicarbonaté calcique, mais avec un rapport Ca/Mg plus élevé de 5,48 ; la minéralisation carbonatée est logiquement plus faible (HCO_3^- = 62,5 mg/l). Le TH de la rivière, de 144 mg/l, est également faussé par une contamination en sulfates (29 mg/l), mais celle-ci est moindre. Entre ces deux types d'eau, on observe un potentiel de dissolution non négligeable, de l'ordre de 51,4 mg/l d'ions HCO_3^-.

On observe aussi un léger enrichissement souterrain en ions Mg^{2+} à cause des niveaux dolomitiques traversés. La forte teneur en SO_4^{2-} de la rivière souterraine pourrait provenir de l'altération de la pyrite présente dans les terrains carbonifères, mais il existe aussi des niveaux de pyrite dans l'Ordovicien ou le Cambrien.

L'eau de percolation traversant le massif, en provenance de l'épikarst, possède une forte minéralisation. La teneur moyenne en HCO_3^- pour trois échantillons est de 249 mg/l et le rapport Ca/Mg est de 10,4 (peu de magnésium). La teneur en sulfates est variable (2 à 41 mg/l). L'eau d'un affluent (1 l/s) situé dans la partie semi-noyée, entre les siphons 3 et 4, présente une composition assez identique aux eaux de percolation avec un teneur en HCO_3- de 205 mg/l, un rapport Ca/Mg de 8,2 et une assez forte concentration en SO_4^{2-} (55,4 mg/l). Le TH est de 238 et 263 mg/l de $CaCO_3$ équivalent.

La répartition de la dissolution en basses eaux dans le système karstique pertes-émergence s'établit de la manière suivante :
- une forte dissolution dans la zone noyée et semi noyée et dans la zone de percolation ;
- une faible dissolution dans la zone d'écoulement libre.

En basses eaux, la faiblesse de la dissolution dans la rivière navigable est confirmée par la quasi absence d'augmentation de la dureté totale (TH) entre le siphon 1 (176 mg/l), la rivière (178 mg/l) et l'émergence principale (180 mg/l) sachant que le degré de précision des mesures de terrain, effectuées le 26/09/97 avec la méthode EDTA-Aquamerck, est de ± 5 %. La situation hydrochimique est probablement différente en période de hautes eaux.

Dans le réseau amont noyé et semi noyé, l'action actuelle de la dissolution est prouvée par les formes de corrosion aiguisées observées sur les parois des conduits. Un échantillon de paroi, prélevé 0,50 m au-dessus du niveau de l'eau entre les siphons 3 et 4 (photo 406), montre que la corrosion se produit lors des crues par battement du niveau de la rivière. Cette corrosion de type épinoyée a été bien étudiée expérimentalement en France dans le réseau du Rupt du Puits par la méthode des plaquettes calcaires disposés à différents niveaux [Jaillet, 2000].

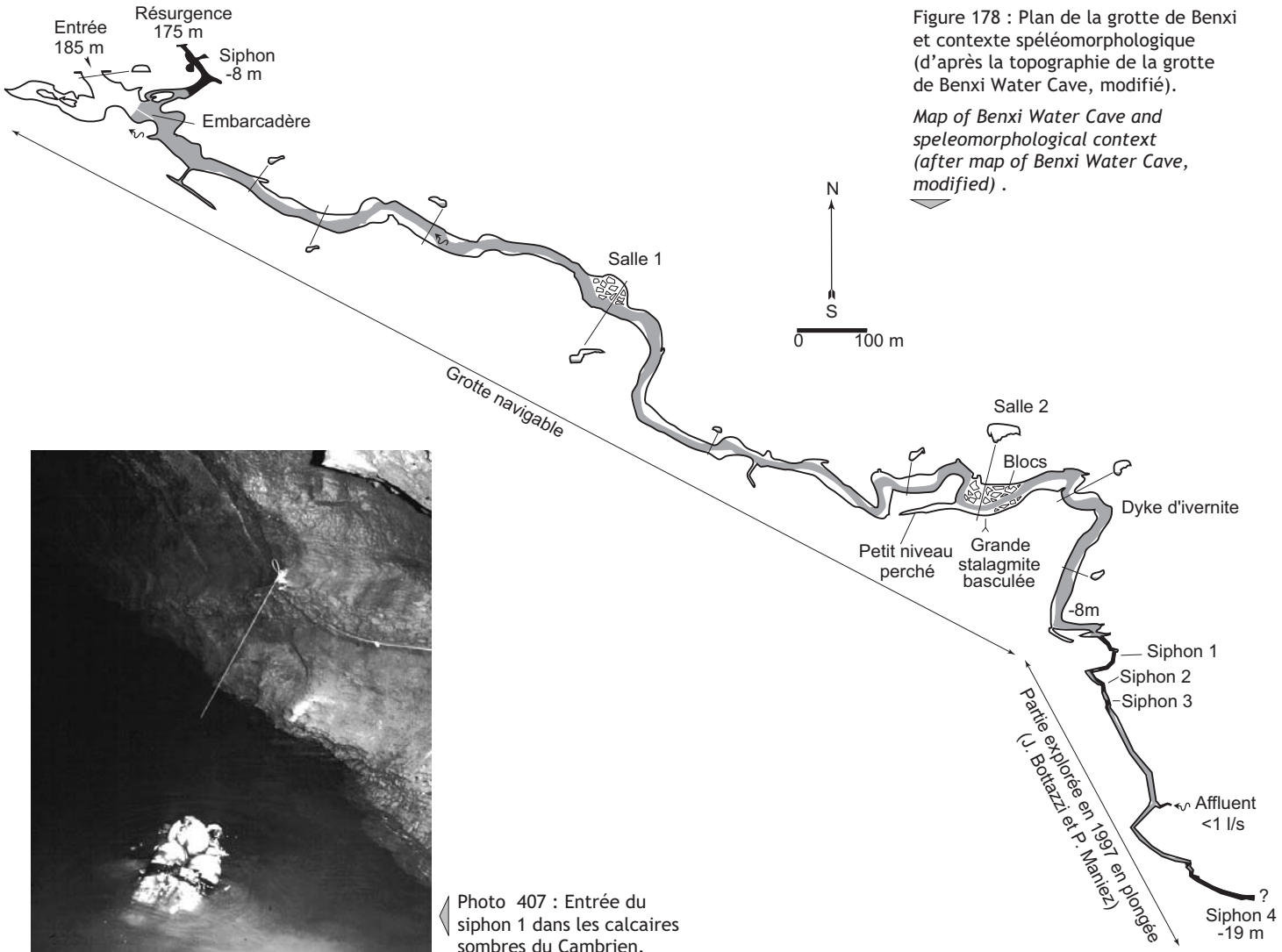


Figure 178 : Plan de la grotte de Benxi et contexte spéléomorphologique (d'après la topographie de la grotte de Benxi Water Cave, modifié).

Map of Benxi Water Cave and speleomorphological context (after map of Benxi Water Cave, modified) .

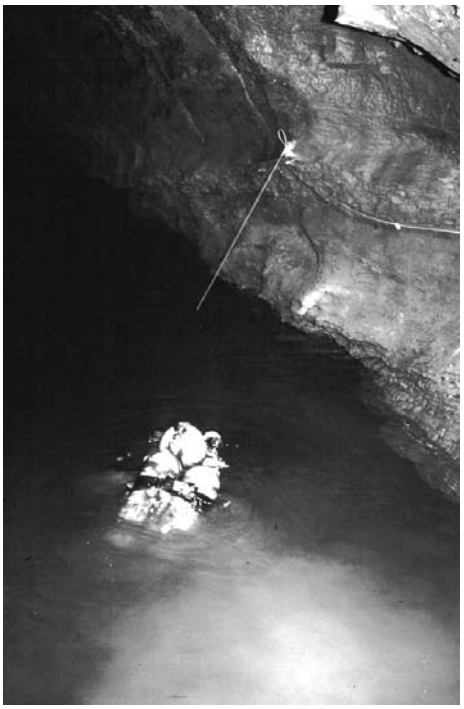


Photo 407 : Entrée du siphon 1 dans les calcaires sombres du Cambrien.

Entrance of sump 1 in the dark limestone of Cambrian.

Photo R. Maire 1997

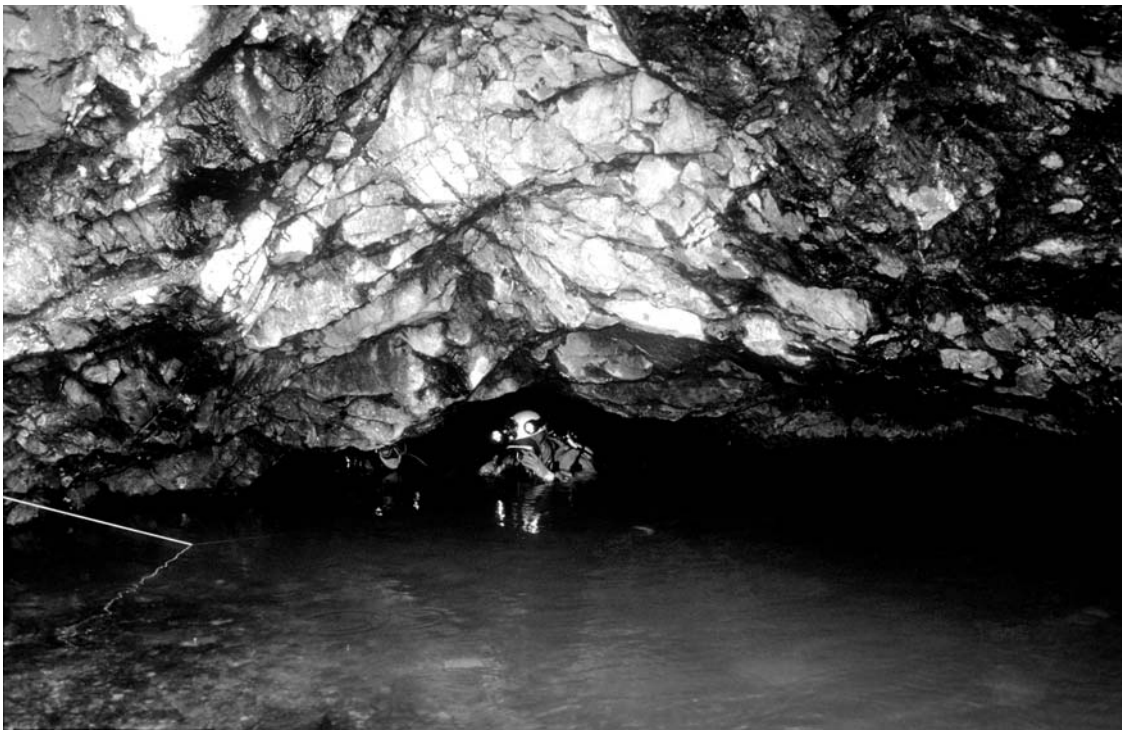


Photo 408 : Entrée du siphon de la résurgence de Benxi dans la vallée de la Taizihe.

Entrance of Benxi resurgence in the Taizihe valley.

Photo R. Maire 1997

Les mesures de pCO_2 effectuées dans la partie visitée par les touristes montrent une nette augmentation entre l'entrée et le fond. Cette anomalie a deux raisons : thermoventilation réduite et surtout apport supplémentaire de CO_2 par les visiteurs. On passe ainsi en avril et mai 1996, de 380-430 ppmv pour la zone d'entrée, à 1 190-3 000 ppmv à 830 m de l'entrée, puis à 1 990-2 700 ppmv dans le conduit terminal à 2 210 m [Benxi Water Cave and Karst Institute of Guilin, 1996]. Le taux maximum de CO_2 est donc de 0,3 %, ce qui ne pose pas de problème actuel pour les visiteurs, mais cet aspect mérite d'être étudié dans le futur.

III. Caractères spéléo-morphologiques

La zone touristique est une grotte-rivière subhorizontale de 2 226 m de développement pour 2 188 m de rivière. L'amont est un ensemble de 615 m de long, en cours d'évolution, partagé entre zones phréatiques peu profondes et écoulements libres avec quatre siphons connus alternant avec deux cloches et un grand tronçon en écoulement libre. La partie touristique mesure 2 438 m et se développe dans un conduit unique, inondé et orienté selon la fissuration. Elle est orientée NW-SE sur près de 2 km de développement, puis la cavité marque une inflexion vers le sud à l'extrémité ouest d'une grande salle ornée de stalagmites. Un dyke d'ivernite sépare ces deux parties. Les conduits en amont de cette intrusion, y compris la partie noyée, ont une section elliptique basse et étroite alors que les conduits en aval sont plus hauts et plus larges. Signalons que l'ivernite est une roche intrusive d'aspect granitique, avec de grands cristaux de feldspath, qui est également signalée dans le Cambrien du mont Aolai (près du célèbre mont Taishan), dans la province de Shandong.

Dans la partie touristique de la grotte de Benxi, les dépôts clastiques, par détente et effondrement, sont en relation avec les salles. Les sédiments argileux peuvent avoir 4 à 5 m d'épaisseur et traduisent les phases de sédimentation liées au retrait des crues. Dans la salle terminale, située juste avant le grand coude (dyke d'ivernite), les dépôts détritiques et argileux sont recouverts sur les deux rives par des concrétionnements abondants. On observe notamment une grande stalagmite qui a basculé par affouillement des dépôts meubles sous-jacents lors des crues (photo 412). On distingue aussi des gours suspendus à cause du même processus.

Dans le réseau semi-noyé, situé en amont du siphon 1, les concrétionnements sont rares et limités à quelques stalactites fistuleuses. Les dépôts argileux, très abondants, sont présents dans les siphons, sur le plancher et les banquettes de paroi. Une petite pellicule d'argile recouvre aussi le plafond. Dans le conduit elliptique exondé, les dépôts argileux forment des talus atteignant localement 2 m de haut et attestent un ennoiement presque complet lors des crues.

Les variations morphologiques du système de Benxi — une grotte exondée de vastes dimensions et un réseau noyé à semi-noyé de calibre plus modeste — sont en partie liées au contexte lithologique et structural. La partie exondée (touristique) présente des tronçons surbaissés de morphologie similaire à la partie semi-noyée explorée au-delà du siphon 1. Par contre, les grands conduits et salles résultent de phases d'écroulement de la voûte à partir de zones fragilisées par la fracturation. La genèse de ces vides a été favorisée par la rivière souterraine qui "digère" les blocs par le processus de tassement-dissolution. Sans ce processus les vides auraient tendance à se colmater. L'absence de dissolution en basses eaux, prouvée par les analyses hydrochimiques dans la partie actuellement aménagée, ne doit pas faire oublier le rôle de la corrosion lors des crues et pendant les périodes antérieures.

IV. Genèse pléistocène de la cavité

Le réseau a été creusé au cours du Pléistocène par l'action de dissolution des eaux allochtones issues des pertes de la rivière Tanghe. La morphologie très différente des deux parties du système, système amont phréatique et système aval circulant dans un large conduit, peut être expliquée par la géologie et la géomorphologie. Le système amont se développe d'abord sous le niveau plat de la large vallée de la Tanghe, dans les calcaires ordoviciens et dans des conditions noyées. Parvenue sous la montagne, la rivière souterraine passe dans les calcaires cambriens, puis à nouveau dans les calcaires ordoviciens en exploitant localement la fracturation.

A. Les niveaux génétiques

On ne connaît pas de niveaux génétiques perchés évidents dans le réseau de Benxi. Le grand porche fossile est à la cote + 185 m au niveau de la partie aménagée, mais les blocs sous-jacents montrent que la cote réelle est légèrement plus basse.

Dans la cavité, on observe néanmoins une petite galerie fossile localisée dans l'angle ouest de la dernière salle à la cote + 7-8 m au-dessus de la rivière actuelle, soit 10 m au-dessus de l'ancien niveau de la rivière avant la remontée artificielle du plan d'eau. Cette galerie, axée sur faille, mesure 90 m de long sur 4 m de large ; elle présente des blocs, des dépôts argileux et quelques stalagmites (fig. 178).

Aspects morphologiques de la grotte de la Diaclase située sur la rive droite de la Tanghe (réseau perché entre 0 et + 12 m).

Geomorphological features of "Grotte de la Diaclase " located on the right side of Tanghe (between 0 and + 12 m).

Photos R. Maire 1997

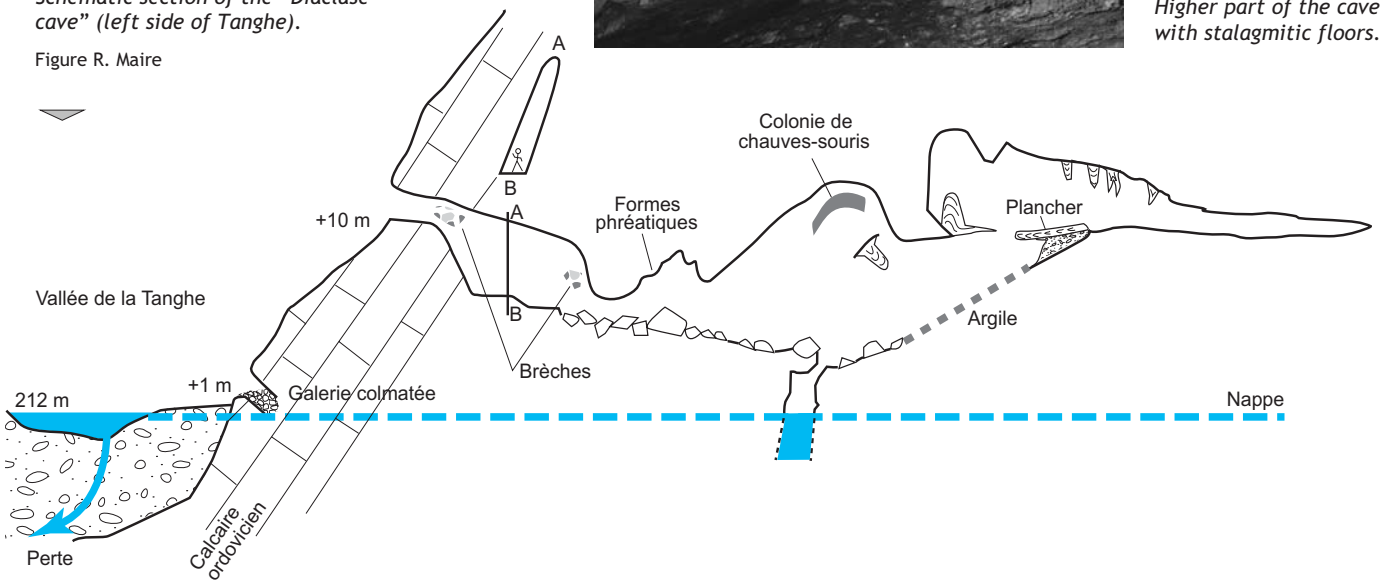
Photo 409 : Partie supérieure du réseau avec planchers stalagmitiques suspendus.

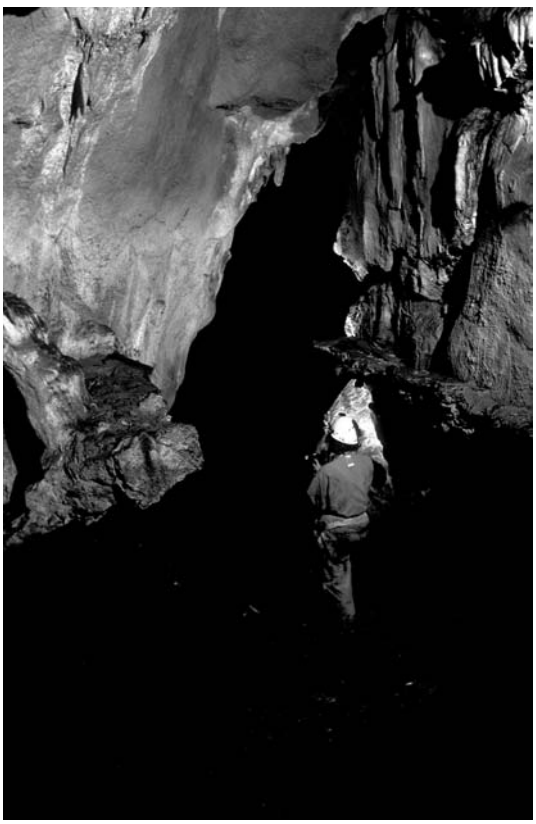
Higher part of the cave with stalagmitic floors.

Figure 179 : Coupe schématique de la grotte de la Diaclase (rive droite de la Tanghe).

Schematic section of the "Diaclase cave" (left side of Tanghe).

Figure R. Maire





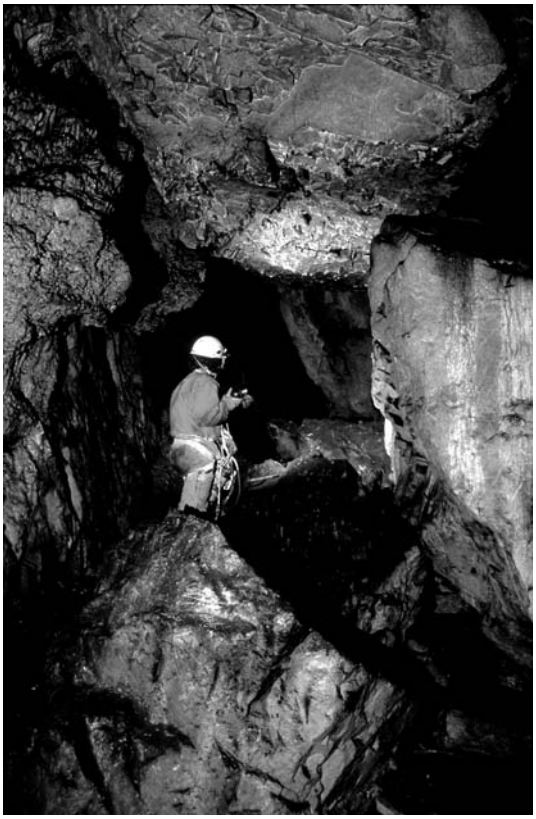


Photo 410 (gauche) : Partie inférieure du réseau avec lits de graviers et planchers conglomératiques érodés.

Lower part of the cave with gravels and eroded conglomeratic floor.

Photo 411 (droite) : Autre branche supérieure du réseau avec blocs effondrés.

Other upper part of the cave with blocks.

N°	Echantillon *Sample*	U (ppm)	234U/238U	230Th/234U	Age (ka)
BSU 02	Coulée *Flowstone*	0.06	1.620	0.384	45.1 + 7.6 - 7.2
BSU 03	Coulée *Flowstone*	0.04	2.191	0.555	80.6 + 13.8 - 12.5
BSU 06	Stalagmite	0.10	3.593	0.560	79.7 + 9.0 - 9.0
BSU 14	Stalagmite	0.20	5.530	0.234	27.9 + 2.8 - 2.7
BSU 07	Stalagmite	0.20	3.218	0.806	138.3 + 17.0 -15.1
BSU 08	Stalagmite	0.20	2.878	0.824	145.0 +19.4 - 17.1
BSU 09	Travertin *Travertine*	0.10	2.698	0.091	10.3 +1.4 - 1.5
BSU 10	Coulée *Flowstone*	0.20	2.247	0.120	13.7 + 1.7 - 1.6
BSU 11	Travertin *Travertine*	0.10	1.887	0.506	71.9 + 9.3 - 8.7
BSU 12	Travertin *Travertine*	0.10	2.171	0.401	52.9 + 4.4 - 4.2
BSU 13	Stalagmite	0.10	2.172	0.083	9.3 +1.5 - 1.5

Tableau 24 : Résultats des datations U/Th sur 11 échantillons de concrétions de la grotte de Benxi (d'après Benxi Water Cave et Karst Institute of Guilin, 1996, p. 48).

Results of U/Th datings on speleothems samples of Benxi Shuidong (after Benxi Water Cave and Karst Institute of Guilin, 1996, p. 48).

Les points bas du réseau noyé sont localisés sous le niveau de la rivière Taizihe (171 m) : cote 166 m dans le siphon 4 (- 12 m), cote 170 m au niveau du trou d'eau (- 7 m, près du dyke), cote 162 m au niveau du siphon de la résurgence principale (- 13 m).

Le karst environnant présente de petits réseaux plus ou moins labyrinthiques étagés entre 0 et quelques dizaines de mètres au-dessus du niveau du lit de la Tanghe et de la Taizihe. Dans la vallée de la Tanghe, des grottes ont été visitées sur les deux rives. L'entrée la plus basse se situe à la cote + 1 m ; il s'agit d'un petit porche colmaté par des galets. Un grand porche (4 x 8 m), avec forte thermoventilation, s'ouvre à la cote + 25 m. Une autre cavité (grotte de la Diaclase), longue de plus de 200 m, s'ouvre vers + 10-12 m (fig. 179). Cette-dernière présente un plan labyrinthique avec des morphologies phréatiques, un profil en long en montagnes russes (profil en boucles) avec un regard sur la nappe phréatique, des remplissages divers (conglomérats, argiles, graviers, planchers, stalagmites).

Sur la rive gauche de la Tanghe, de petits réseaux sont également connus. Un ancien réseau phréatique (conduite forcée) est recoupé par la paroi à la cote + 30 m environ. Ce réseau s'ouvre sur le flanc d'une petite vallée affluente dans les calcaires cambriens (pendage 20°).

Ces réseaux résultent de l'étagement relatif des paléopertes de la Tanghe, donc de l'évolution géomorphologique locale : surrection, creusement, alluvionnement. La grotte de la Diaclase témoigne d'une évolution polyphasée :
- un creusement originel en régime noyée en relation avec les pertes de la rivière Tanghe et la nappe phréatique de la vallée ;
- un creusement de type épinoyé avec dépôts argileux et début du concrétionnement ;
- un assèchement complet du réseau avec bréchification des éboulis de la galerie d'entrée axée sur faille et concrétionnement.

Pour Pan Jianming, Gao Shanghua et Wei Haipo [1993], il existe une relation génétique entre les trois niveaux de terrasses fluviatiles externes de la Taizihe et les niveaux de grottes. Dans la grotte de Miaohoushan, qui est corrélée altitudinalement avec la terrasse supérieure de la Taizihe située à + 56 m (3ème terrasse), une analyse paléomagnétique des sédiments les plus anciens attribue une spéléogenèse remontant au début du Pléistocène moyen. Comme la grotte de la Diaclase, cette cavité perchée a pu se développer à l'origine en régime noyé, sous le niveau de la rivière.

Les terrasses 1 et 2 de la Taizihe sont à 5 m et + 8-10 m. Dans l'hypothèse de Pan Jianming, Gao Shanghua et Wei Haipo [1993], on pourrait corréler la genèse de la grotte de Benxi avec ces niveaux inférieurs. Dans ce contexte, le réseau de Benxi se placerait donc après le début du Pléistocène moyen comme le montrent les datations U/Th sur concrétions (tableau 24).

En raison de la tectonique de surrection modeste, il faut être prudent sur les relations terrasses externes et niveaux génétiques de grottes car il peut y avoir télescopage dans l'évolution de niveaux altitudinalement proches. A savoir que deux niveaux peuvent évoluer simultanément, l'un en régime noyé, l'autre en régime de crue, avec fonctionnement épinoyé dominant.

B. Résultats des datations

Dans la grotte de Benxi, une rétrospective chronologique peut être avancée à partir d'une série de onze datations U/Th effectuée sur plusieurs types de spéléothèmes (stalagmites, planchers, coulées) [cf. Benxi Water Cave and Institute of Guilin, 1996]. On part du principe que l'âge du concrétionnement le plus ancien date le passage du régime phréatique au régime en écoulement libre. Comme la genèse phréatique d'un système karstique est relativement rapide à l'échelle géologique (probablement moins de 100 000 ans, parfois

Aspects du concrétionnement dans la partie aménagée de la grotte.

Examples of speleothems in Benxi Shuidong.

Photos R. Maire 1997

Photo 412 : Stalagmite massive basculée à cause de l'affouillement sous-jacent par la rivière, dernière salle en aval du dyke d'ivernite.

Large stalagmite in the last room before the ivernite dyke.

Photo 413 : Stalagmite active sur bloc après la dernière salle.

Active stalagmite on a block after the last room, near the ivernite dyke.

Photo 414 : Grosse stalagmite active située en rive droite de la rivière souterraine de Benxi. La phase carbonatée blanche est probablement aragonitique.

Large active stalagmite situated on the right side of Benxi underground river. The white carbonated phase is probably aragonite.

moins), les âges U/Th les plus anciens donnent un ordre de grandeur de l'âge de la grotte.

Les concrétions analysées ont des teneurs en uranium assez faibles de 0,06 à 0,2 ppm (µg/g). Les âges calculés vont de 9 300 ans BP (± 1 500) à 145 000 ans BP (+ 19 400, - 17 100). Les phases de concrétionnement se placent donc depuis la fin du Pléistocène moyen jusqu'à l'Holocène (tableau 24). En première approche, les datations U/Th indiquent une spéléogenèse remontant à la fin du Pléistocène moyen (145 000 ans), période à laquelle le réseau était déjà bien constitué. Compte tenu de la fourchette d'erreur, la concrétion datée la plus ancienne (éch. BSU 08) remonte à la fin du stade isotopique 6 (glaciaire) alors que la stalagmite BSU 07 (138 300 ans BP, + 17 000, - 15 100) peut se placer soit à la fin du stade 6, soit au début du stade 5 (interglaciaire). Deux autres concrétions sont datées du stade 5 (BSU 03 et BSU 06) : 80 600 et 79 700 ans BP. Le plancher stalagmitique BSU11 (71 900 ans BP, + 9 300, - 8 700) pourrait se placer à la fin du stade 5 ou au début du glaciaire du stade 4. Le plancher BSU 12 se développe dans la période froide du stade 4 avec un âge de 52 900 ans BP (+ 4 400, - 4 200).

La coulée BSU 02 (45 100 ans BP, + 7600, - 7 200) pourrait se situer soit à la fin du stade 4, soit au début du réchauffement du stade 3. Deux autres échantillons sont datés du début et de la fin de la dernière phase froide (stade 2) : la stalagmite BSU14 (27 900 ans BP, + 2 800, - 2 700) et la coulée BSU 10 (13 700 ans BP, + 1 700, - 1 600). Une stalagmite (BSU 13) a été datée du début de l'Holocène ou stade 1 (9 300 ans BP, ± 1 500) tandis que le plancher BSU 09 se situe à la limite stade 2 / stade 1 (10 300 ans BP, + 1 400, - 1 500).

C. Interprétation

Cette chronologie U/Th n'est pas en contradiction avec les premiers résultats obtenus sur l'analyse morphologique des petits réseaux étagés et sur l'âge paléomagnétique du niveau supérieur (début du Pléistocène moyen). En outre, il est intéressant de constater que le concrétionnement semble avoir perduré au cours des dernières phases climatiques avec une prédominance pour les fins et débuts de stade de réchauffement. Compte tenu de ces indications de chronologie absolue, il est raisonnable de penser que le creusement phréatique du réseau s'est produit au cours du Pléistocène moyen, avant 128 000 - 164 000 ans, en fonction de la fourchette d'erreur. Les premières concrétions attribuées au stade 6, situées dans la dernière salle en aval du grand coude, correspondent à des stalagmites modestes qui se sont formées sur un empilage de blocs d'effondrement 17 m au-dessus du niveau de la rivière.

La grande période interglaciaire du stade 5 marque le début du Pléistocène supérieur, en gros entre 130 000 et 80 000 ans. Cette phase se traduit par un alluvionnement souterrain important qui bénéficie d'un climat tempéré chaud très arrosé. Le contexte bioclimatique, qui permet le développement d'une couverture forestière, est également favorable au concrétionnement. Celui-ci se manifeste par d'importants spéléothèmes visibles tout le long du parcours emprunté par le circuit touristique et en particulier dans la dernière salle. Les cavités labyrinthiques de la partie amont du système, dans la vallée de la Tanghe, se sont probablement formées à cette époque.

Durant la période glaciaire du stade 4, le concrétionnement diminue, mais semble se poursuivre lentement (BSU 12). Durant le réchauffement du stade 3, la rivière souterraine forme probablement la terrasse souterraine située 4-5 m au-dessus du niveau actif actuel ; elle est couronnée par de grande stalagmites contemporaines de cette période chaude.

Durant la dernière phase froide (stade 2), la croissance des spéléothèmes s'est arrêtée entre 30 000 et 20 000 ans, puis on observe une reprise du concrétionnement vers 13 700 ans (coulée BSU 10), à la fin du stade 2. A partir de 10 000 ans BP environ, qui marque le début de l'Holocène (stade 1), le concrétionnement se développe largement (BSU 09 et BSU 13). Dans le même temps, les crues importantes érodent les remplissages fluviatiles et provoquent le basculement de massifs stalagmitiques (photo 412).

Conclusion

La rivière souterraine de Benxi est un exemple remarquable de système karstique perte-résurgence d'âge quaternaire localisé dans un contexte climatique tempéré, mais à saisons thermiques très contrastées. La capture karstique ressemble à un recoupement endokarstique de méandre encaissé de rivière de surface dont l'exemple type est la Lesse souterraine en Belgique. Par contre, la capture de Benxi affecte deux rivières différentes et se traduit par une liaison souterraine de 5 km d'extension avec deux réseaux morphologiquement différents : une partie noyée à semi-noyée de modestes dimensions et une partie en écoulement libre de gros calibre. Cet exemple de spéléogenèse fonctionnelle se place dans un contexte tectonique lent avec un certain télescopage des processus dans une tranche d'altitude donnée de l'ordre de 20 m. Il s'agit d'un modèle intéressant à comparer aussi avec les réseaux belges étudiés par C. Ek [1969]. Mais il ne faut pas attribuer tous les niveaux de galeries rapprochés à des niveaux génétiques car ils peuvent être synchrones [Quinif, 1989]. Une étude mériterait donc d'être poursuivie dans la grotte de Benxi afin de préciser notamment l'âge des spéléothèmes les plus anciens.