

PHILIPPE AUDRA, JEAN-YVES BIGOT

Processus de spéléogenèse:
réseaux de contact
et épinoyés

extrait de

Méailles
et la région d'Annot

direction PHILIPPE AUDRA



UNIVERSITÀ DI PADOVA, DIPARTIMENTO DI GEOGRAFIA
INSTITUT ZA RAZISKOVANJE KRASA ZIRČ SAZU

PROCESSUS DE SPELEOGENESE : RESEAUX DE CONTACT ET EPINOYÉS

PHILIPPE AUDRA, JEAN-YVES BIGOT

INTRODUCTION

La spéléogénèse est l'étude de la formation des réseaux souterrains, des grottes. Les modes de spéléogénèse sont multiples, ils dépendent notamment :

- du mode d'écoulement (torrentiel / noyé) ;
- de la structure géologique (nature et disposition des roches karstiques et imperméables), qui guide les circulations ;
- de la topographie, qui oriente les circulations des points hauts vers le fond des vallées ;
- de l'évolution géomorphologique, qui modifie l'aspect du relief, notamment par le creusement des vallées.

Les deux modes de circulation d'eau en milieu karstique sont l'écoulement torrentiel et l'écoulement noyé (fig. 1).

L'écoulement torrentiel concerne la partie supérieure du karst, dite **zone vadose**. Les eaux infiltrées descendent au travers de la masse calcaire, selon un trajet vertical, agrandissant les fissures en puits, où l'eau s'écoule en cascade. À la base du calcaire, un imperméable est atteint. La présence

de cet écran imperméable concentre les eaux infiltrées, formant des ruissellements plus importants, voire des rivières. L'eau poursuit son écoulement à l'oblique, selon le pendage du contact. La vitesse d'écoulement et le caractère torrentiel seront d'autant plus importants que le pendage du contact est fort. La rivière s'écoule dans une galerie inclinée, d'autant plus vaste que le débit est abondant. Si ce contact ressort dans le versant d'une vallée, la rivière souterraine apparaît au jour par une émergence. La rivière rejoint alors le fond de la vallée principale, qui est situé plus bas. Dans ce cas, lorsque le karst est au-dessus du niveau de la vallée, appelé niveau de base, on a affaire à un **karst perché** (fig. 1). L'écoulement est essentiellement torrentiel, dans des **puits** et de vastes **galeries inclinées**. Si le calcaire s'enfonce en dessous du niveau de base, il s'agit d'un **karst barré** (fig. 1). L'émergence se situe au niveau de base. Tous les vides du karst situés sous le niveau de base sont remplis d'eau, c'est la **zone noyée**. La limite entre la zone vadose et la zone noyée, correspondant au toit de la zone noyée est appelée **surface piézométrique**. Elle est horizontale, légèrement inclinée vers l'émergence. À la base du karst, l'eau se

concentre dans un **drain principal** et circule approximativement à l'horizontale vers l'émergence. Si le drain principal est dans la zone noyée, le conduit est de fait noyé ; si le conduit principal est à la surface piézométrique la galerie est partiellement inondée et parcourue par une rivière. La principale différence entre karst perché et karst barré réside dans la présence d'une zone noyée étendue dans le cas du karst barré.

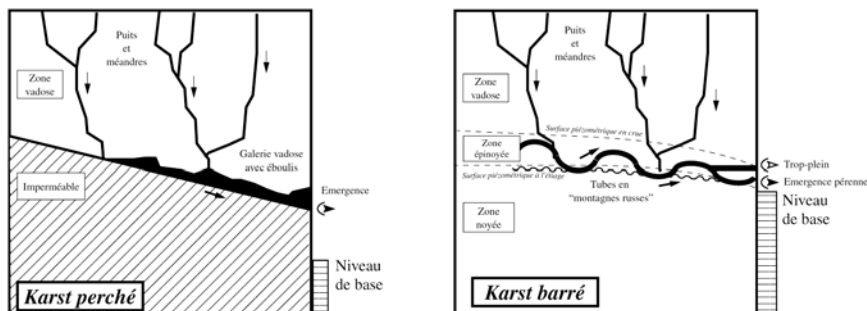


Figure 1 - Karsts perché et barré. Gauche : le karst est perché au-dessus du niveau de base. Les écoulements sont essentiellement vadoses. Le drain principal est une galerie de grande dimension au contact de l'imperméable en pente vers l'émergence. Droite : le karst est barré par un aquiclude, avec une zone noyée sous le niveau de base. Le drain principal est un tube horizontal ou en "montagnes russes". *Perched and dammed karst. Left : the karst is perched above base level. Flow is mainly torrential. The main drain is a large gallery at the contact of the impervious basement, sloped toward the emergence. Right : the karst is dammed by an aquiclude and harbors a phreatic zone under base level. The main drain is either a watertable cave or a looping tube.*

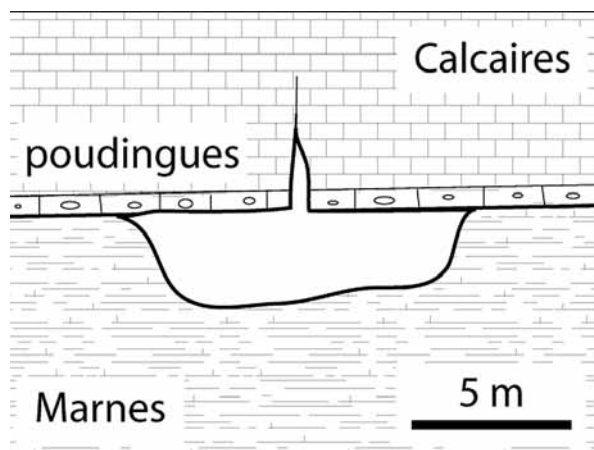


Figure 2 - Le conduit initial est d'abord créé par des écoulements noyés lents, par dissolution le long des fissures dans le conglomérat calcaire. Par la suite, l'écoulement torrentiel ravine les marnes et forme rapidement une vaste galerie. Son volume est principalement creusé dans les marnes, sous un toit de conglomérat calcaire (d'après une section de la grotte du Cul de Bœuf, Méailles). *The initial fissure develops by solution along joints in the carbonate conglomerate in slow flow conditions. Then, the torrential flow erodes the marly basement and produces rapidly a large gallery. The main void develops into the marls under the carbonate conglomerate ceiling (after a cross-section of the Cul de Bœuf Cave, Méailles).*

La différenciation entre karst perché et barré détermine des types d'écoulements différents (vadose / noyé), par la présence éventuelle d'une couche imperméable tendre. Ces types d'écoulement et de lithologie déterminent en conséquence des structures de réseau et des morphologies de conduits différentes. Le karst perché se caractérise par un drain généralement unique de grande dimension au contact de l'imperméable, tandis que le karst barré peut développer un labyrinthe complexe en 3 dimensions de tubes aux fonctions et formes complexes.

LES RÉSEAUX DE CONTACT CONGLOMÉRATS / MARNES DES KARSTS PERCHÉS

Les réseaux karstiques se développant à la base des conglomérats calcaires et au toit des marnes ou argiles sont appelés "réseaux de contact". Toutefois, le contact d'une roche dure et soluble sur une roche tendre et imperméable n'est pas une condition suffisante à l'établissement d'un vide souterrain. Les observations effectuées dans des grottes similaires (fig. 2), montrent que leur formation relève d'un processus en deux temps : 1/ un creusement exclusivement karstique dans le

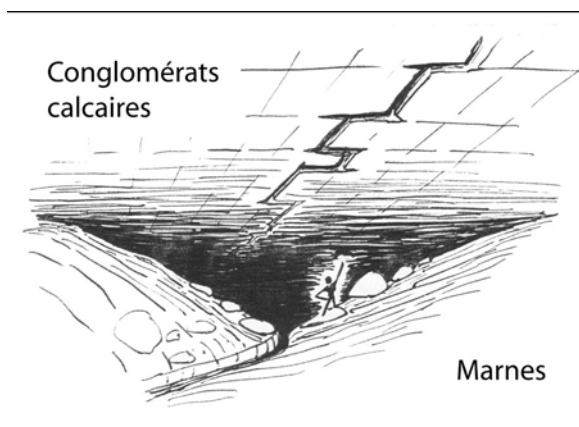


Figure 3 - Chenal karstique initié dans le plafond de conglomérats calcaires, puis ravinement du plancher de marnes (caunhà de Rouairoux, Labastide-en-Val, Aude). *Initial karst channel in the carbonate conglomerate ceiling, then entrenching of the marly basement (caunhà de Rouairoux Cave, Labastide-en-Val, Aude).*

toit calcaire ; 2/ une incision par le ruissellement de la base argiles/marnes (fig. 2, 3) [BIGOT & BÈS 2005 ; MOCCHIUTTI 2001].

Dans un premier temps, la karstification se développe d'abord dans les formations supérieures (calcaires ou poudingues à ciment calcaire). Les circulations initiales s'infiltrent au travers de la couche calcaire, puis ruissellent au contact des marnes ou argiles imperméables sous-jacentes. Ces circulations utilisent la fracturation des conglomérats durs et aménagent de petits conduits en zig-zag qui suivent ces discontinuités (fig. 3, 4, 5). Dans un premier temps, l'écoulement est faible, lent, noyé. Il n'agit pas sur les argiles à la base qui ne peuvent pas être mobilisées par des courants lents. Seul le conglomérat calcaire est dissous ; les fissures s'élargissent **lentement**.

À un moment donné, le conduit dans le toit de conglomérat devient suffisamment grand et se dénoie, l'écoulement devient alors torrentiel. Dans un deuxième temps, les argiles sont ravinees facilement par l'écoulement torrentiel, rapide et turbulent. Le torrent s'enfonce dans les argiles et n'est plus en contact avec le toit calcaire. Ce toit



Figure 4 - Grande salle d'effondrement dans les marnes de la caunhà de Milhès, Labastide-en-Val, Aude. Dans le toit de conglomérats calcaires, on distingue nettement une fracture karstifiée qui se prolonge jusqu'à l'entrée de la cavité (photo. CH. BÈS). *Large collapse chamber in the marls, caunhà de Rouairoux Cave, Labastide-en-Val, Aude. Into the carbonate conglomerate ceiling occurs the initial karst fissure that develops up to the entrance of the cave.*



Figure 5 - Galerie de la caunhà de Rouairoux, Labastide-en-Val, Aude. On aperçoit au plafond quelques fissures à l'origine de la formation de la cavité (photo. CH. BÈS) *Gallery in caunhà de Rouairoux Cave, Labastide-en-Val, Aude. The initial karst fissures are visible in the ceiling.*

reste intact, et seules les argiles sont ravinées à un rythme très **rapide**. Un vide de grande taille apparaît, entièrement creusé par le ravinement dans les argiles, sous un toit calcaire, où subsiste la fissure initiale (fig. 2, 3). L'essentiel du volume du conduit est creusé dans les argiles, ce qui donne l'illusion que la grotte s'est développée originellement dans les argiles. De plus ce processus est extrêmement actif et l'apparition de la galerie dans les marnes est rapide si les conditions suivantes sont réunies : 1/ soubassement marneux tendre ; 2/ contact pentu favorisant un écoulement torrentiel turbulent ; 3/ fort débit évacuant les argiles insolubles. En général, deux de ces conditions suffisent à l'établissement de grandes galeries, par exemple un ruissellement réduit suffit à creuser de grandes galeries dans les marnes. Par la suite, l'élargissement du conduit dans les marnes peut conduire à l'effondrement du toit calcaire, masquant ainsi l'origine de la karstification (fig. 6).

Leur formation relève **initialement d'un mode de creusement karstique**. Si les roches tendres comme les marnes et argiles - a priori peu karstifiables - recèlent les plus grands vides, l'origine de la corrosion se situe dans les calcaires ou conglomérats calcaires. Le processus ultérieur d'agrandissement du vide, en fait de formation de la galerie réellement pénétrable, n'est pas un phénomène karstique lié à la dissolution, mais un phénomène de

ravinement des argiles lié au ruissellement torrentiel, donc non karstique à proprement parler, même s'il se produit dans une cavité.

Ainsi, la formation des réseaux de contact calcaire (ou conglomérat) / marnes (ou argiles) se décompose en **deux phases** :

- 1/ Karstification initiale dans les calcaires (ou conglomérats calcaires) selon la fracturation en suivant un chemin de drainage proche de celui



Figure 6 - Grande salle de la caunhà de Rouairoux, Labastide-en-Val, Aude. Les effondrements ont fini par faire disparaître totalement les témoins de la karstification initiale (photo. CH. BÈS). *Large collapse chamber in caunhà de Rouairoux Cave, Labastide-en-Val, Aude. The collapses destroyed all evidences of the initial karst channel.*

de la ligne de plus grande pente, qui correspond en général au pendage du contact (fig. 2).

- 2/ Érosion des marnes qui sont ravinées et érodées par les circulations torrentielles.

Cette genèse est originale en ce sens que le processus proprement karstique, c'est-à-dire la dissolution, ne concerne que la phase initiale et ne fait qu'élargir une fissure en un conduit impénétrable. La véritable phase de création du conduit pénétrable à l'homme, qui n'intervient que dans un second temps, fait appel à un processus de ravinement torrentiel, qui n'est pas karstique en sens strict, mais qui agit néanmoins dans la grotte.

LES RÉSEAUX ÉPINOYÉS

Les travaux de recherche récents ont révisé la vision classique de genèse des conduits dans la zone noyée, en mettant l'accent sur le rôle fondamental de l'évolution des conduits dans la zone épinoyée [AUDRA 1994, 1997a ; HÄUSELMANN 2002 ; HÄUSELMANN & al. 2003 ; LISMONDE & Coll. 1997]. La zone épinoyée est à l'interface entre zone vadose et zone noyée. Les variations de l'apport en eau par les précipitations produisent une montée de la zone noyée en phase de crue et une descente avec le retour aux conditions d'étiage. La hauteur des ennoyages durant les crues moyennes détermine l'ampleur verticale de la zone épinoyée. Elle est caractérisée par des écoulements tantôt noyés, à l'image de la zone noyée, tantôt torrentiels, à l'image de la zone vadose.

La spéléogenèse initiale s'effectue sous la surface piézométrique, dans la zone noyée. L'évolution vers la maturité, avec l'agrandissement des conduits et l'amélioration de leur conductivité en-

traîne un abaissement de la surface piézométrique. Les conduits évoluent alors au-dessus et au-dessous de la surface piézométrique. Ils présentent une morphologie en tube, typique des écoulements noyés, avec un profil en long ondulé, en "montagnes russes" (fig. 7, 8). Ils s'accompagnent de conduits secondaires, aux fonctions hydrauliques spécifiques et par conséquent aux morphologies particulières.

Les conduits de la zone épinoyée ont deux phases de fonctionnement : la crue avec une mise en charge, puis la décrue avec un dénoyage (fig. 7).

- 1/ **En phase de crue** (mise en charge), les conduits de la zone épinoyée se remplissent progressivement à partir de l'amont. D'une part, ils sont alimentés par les tubes d'alimentation de crue, petits conduits remontants qui refluent les eaux de crue de la zone noyée. D'autre part, les conduits principaux se déversent successivement de boucles en boucles, de l'amont vers l'aval. Leur forme en montagnes russes fait que la partie basse d'une boucle s'ennoie progressivement jusqu'à se déverser en cascade dans la boucle suivante, par-dessus le point haut qui les sépare. Ce seuil est dissymétrique du point de vue morphologique, conséquence des deux modes d'écoulement de part et d'autre : l'amont du seuil a des formes exclusivement noyées (tube), tandis que l'aval du seuil est entaillé par les écoulements torrentiels agissant lors du déversement, formant des surcreusements, marmites, lames d'érosion (fig. 9). Progressivement, l'ensemble des conduits de la zone épinoyée se remplit : les formes de creusement sont caractéristiques des circulations noyées, il s'agit principalement de tubes. Les conduits situés à une altitude supé-

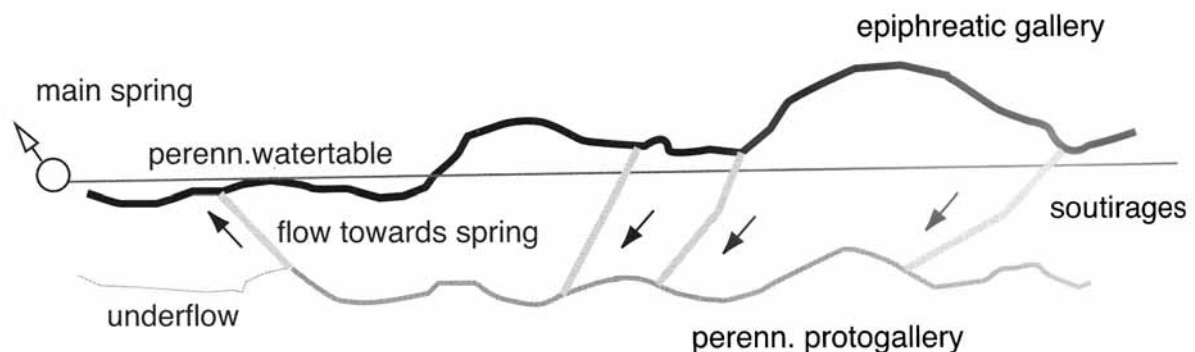


Figure 7 - Organisation en coupe longitudinale des conduits de la zone épinoyée [d'après HÄUSELMANN 2002, modifié]. Long section pattern of epiphreatic cave systems.



Figure 8 - Drain de la zone épinoyée. En crue, l'eau envahit tout le conduit et le façonne en tube. Puits des Bans, Hautes-Alpes (Photo. J.-Y. Bigot). Main drain in the epiphreatic zone. During high water, the gallery is flooded and shaped as a tube. Puits des Bans, Hautes-Alpes.

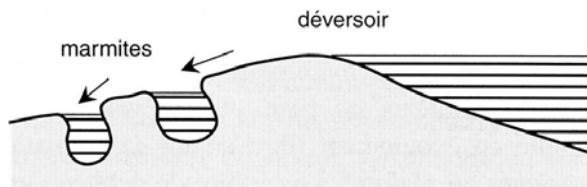


Figure 9 - Seuil dissymétrique dans la zone épinoyée. En crue, l'eau ennoie la partie amont à droite et se déverse en torrent par-dessus le seuil, qui est perforé de marmites [LISMONDE & Coll. 1997]. Asymmetric threshold in the epiphreatic zone. During high water the upstream part (right) is flooded and pours out as a torrent above the threshold that is entrenched by potholes.

rieure, qui ne sont jamais ennoyés, conservent en toutes circonstances un écoulement torrentiel caractéristique de la zone vadose et par conséquent des formes de creusement exclusivement vadoses (puits et méandres vadoses). La zone épinoyée et la zone vadose sont donc séparées par une limite morphologique nette (tubes noyés / puits et méandres vadoses), dite "limite piézométrique" ou "**transition vadose / noyé**" [PALMER 1987].

- **2/ En phase de décrue**, les tubes d'alimentation de crue cessent de fonctionner. Comme la zone épinoyée est perchée au-dessus du niveau de l'émergence, elle se vide graduellement. Cette vidange est assurée par d'autres petits conduits, les tubes de soutirage de décrue, qui s'ouvrent au bas des boucles, à l'image des bondes de lavabo. L'importance des débits et du gradient hydraulique détermine des labyrinthes de tubes inclinés en trois dimensions, où l'écoulement ne s'exerce que vers les bas. Dans le drain principal situé au-dessus, la lente décrue favorise la décantation des eaux de crues chargées d'argile. Des argiles se déposent sur les parois. Lorsque le drain est dénoyé, les argiles s'égouttent, le ruissellement façonne leur surface en argiles peignées [surge marks, BULL 1977].

Les principaux éléments morphologiques caractéristiques de ce processus spéléogénétique sont :

- le drain principal avec un profil en long en "**montagnes russes**", légèrement inclinée vers l'aval ;
- la "**transition vadose / noyé**" entre les formes noyées (tubes) et vadoses (puits et méandres). Cette transition morphologique détermine le haut de la zone épinoyée, le niveau maximal des crues moyennes ;
- les **seuils dissymétriques**, à la morphologie purement noyée côté amont (tube) et vadose à l'aval (surcreusement, marmites), liée au déversement en début de crue ;
- les **argiles de décantation à surface peignée**, colmatant les parties basses des boucles en phase de décrue ;
- les **tubes d'alimentation de crue**, aux formes exclusivement noyées, avec des traces de circulation vers le haut, qui ennoient la zone épinoyée en phase de crue.
- les **tubes de soutirages de décrue**, s'ouvrant au point bas des boucles, organisés en labyrinthes pentus en 3 dimensions, avec des traces de circulation vers le bas, possédant également des seuils dissymétriques, qui vidangent la zone épinoyée en phase de décrue.

D'autres morphologies de creusement et de sédimentation sont définies par AUDRA [1997b].

L'observation des modelés de paroi et de l'hydrodynamique montre que le creusement est prédominant en crue (et décrue), quand circulent des eaux agressives. De fait, les conduits vont se développer durant la phase de crue, **la géométrie du ré-**

seau s'organise durant les crues. Les circulations d'étiage, peu ou pas agressives sont confinées dans la zone noyée, dans des conduits de taille réduite. Le drain principal, de plus grande taille, ne fonctionne qu'en période de crue et se localise dans la zone épinoyée, au-dessus de la zone noyée. En conséquence, les circulations peuvent éventuellement s'effectuer plusieurs dizaines voire centaines de mètres au-dessus du niveau de base. L'ampleur de la zone épinoyée, qui correspond globalement à la dénivelée verticale des plus grandes boucles, dépend de l'ampleur des crues, qui sont elles-mêmes dépendantes d'un régime d'alimentation favorisant un écoulement contrasté (crues d'orages, fontes de neige brutales, saison des pluies tropicales, cyclones). Un réseau juvénile n'ayant pas encore atteint des dimensions suffisantes favorise également les mises en charge [DELANNOY 1997]. L'obstruction partielle de l'émergence joue le même rôle.

Inversement, une alimentation régulière contrôlée par une couverture semi-perméable, génère des débits peu variables, limite les mises en charge, limite l'ampleur de la zone épinoyée et le dévelop-

pement des conduits en montagnes russes. Dans ce cas, le drain principal est parfaitement horizontal, au toit de la zone noyée [*watertable cave*, FORD 1977]. Le principal facteur de contrôle du profil en long des drains profonds (horizontal / montagnes russes) est le régime de la recharge (régulier / contrasté).

La région d'Annot illustre ces deux modes de spéléogénèse de contact et de spéléogénèse épinoyée. La plupart des grottes de contact du synclinal d'Annot se sont développées à partir d'un conduit initial dans le toit de conglomérats calcaires, puis par ravinement du plancher dans les marnes et les argiles. C'est notamment le cas de la grotte du Cul de Bœuf et du trou Madame à Méailles. Quant à la grotte de Saint-Benoît, c'est un cas spectaculaire de réseau épinoyé, avec un drain principal, un tube d'alimentation de crue et une multitude de tubes de soutirage de décrue. Par chance, toutes ces cavités sont d'un accès aisé, ce qui permet d'observer les morphologies spécifiques à ces deux modes de spéléogénèse (voir chapitres suivants consacrés à ces grottes).

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AUDRA PH. (1994) – Karsts alpins. Genèse de grands réseaux souterrains. Exemples : le Tennengebirge (Autriche), l’Ile de Crémieu, la Chartreuse et le Vercors (France). *Karstologia Mémoires*. Thèse à l’Université J. Fourier - Grenoble I, Institut de géographie alpine, Grenoble, 5, 280 pp.
- AUDRA PH. (1997a) – Le rôle de la zone épinoyée dans la spéléogénèse. *12e Congrès international de spéléologie, La-Chaux-de-Fond*, 1 : 165-167.
- AUDRA PH. (1997b) – Les indicateurs morphologiques des mises en charge dans les réseaux karstiques. *7e Rencontre d’octobre, La Sainte-Baume*, Spéléo-club de Paris : 20-26.
- BIGOT J.-Y. & BÈS CH. (2005) – Les grottes de contact des marno-calcaires. La caunhà de Rouairoux (Aude) et la grotte du Cul de Bœuf (Alpes-de-Haute-Provence). *Table-ronde internationale, 2-5 septembre 2004, Valsassina, Italie*. Comunità Montana della Valsassina & Association française de karstologie [sous presse].
- BULL P. A. (1977) – Surge marks in caves. *7th International Congress of Speleology, Sheffield*. International Union of Speleology & British Cave Research Association, Bridgwater : 89-92.
- 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 d’État. Institut de géographie alpine, Grenoble, 678 pp.
- FORD D. C. (1977) – Genetic classification of solutional cave systems. *7th International Congress of Speleology, Sheffield*. International Union of Speleology & British Cave Research Association, Bridgwater : 189-192.
- HÄUSELMANN PH. (2002) – Cave Genesis and its relationship with surface processes : Investigations in the Siebenhengste region (BE, Switzerland). *Siebenhengste-Hohgant*. PhD thesis, University of Fribourg, Switzerland. Höhlenforschungsgemeinschaft Region Hohgant.
- HÄUSELMANN PH., JEANNIN P.-Y. & MONBARON M. (2003) – Role of epiphreatic flow and soutirages in conduit morphogenesis : the Bärenschacht example (BE, Switzerland). *Zeitschrift für Geomorphologie*. Borntraeger, Berlin, Stuttgart, t. 47, 2 : 171-190.
- LISMONDE B. & Coll. (1997) – La Dent de Crolles et son réseau souterrain, Comité départemental de spéléologie del’Isère, Grenoble, 304 pp.
- MOCCHIUTTI A. (2001) – Contact caves in flysch formations – Friuli Region – Northeast Italy. *Acta Carsologica*, (9th International Karstological School “Classical Karst – contact karst”), vol. 30, 2 : 157-164.
- PALMER A. N. (1987) – Cave levels and their interpretation. *The NSS Bulletin*. National Speleological Society, Huntsville, t. 49 : 50-66.

LONG ABSTRACT

SPELEOGENESIS PROCESSES : CONTACT AND EPIPHREATIC CAVE SYSTEMS

Speleogenesis processes differ between perched and dammed karsts. The main drains of the perched karsts display at the contact of carbonate conglomerate and the argillaceous or marly basement. The development of the drain occurs in two phases. First, a phreatic slow flow appears at the base of the jointed conglomerate, at the contact of the marly basement. A narrow fissure using joints develops from the solution of the carbonate conglomerates. Then, the widening of the initial fissure allows the establishment of a torrential flow that erodes the marly basement and forms the penetrable gallery. Although this second phase corresponds to the development of the main volume, it does not correspond strictly to a karst process, but to a mechanical process of gully erosion. This second process occurs rapidly and does not imply obviously important flow.

In the dammed karsts, the cave system organizes around a main drain. The length profile of the main drain is looped. During high water, flooding of the epiphreatic zone occurs. The feeder tubes provide water toward the main drain due to the backflooding of the phreatic zone. The loops are flooding from upstream to downstream, by successive pouring-out. Water pours out over asymmetric thresholds. The upstream part of the threshold has a phreatic flow and thus a tube shape, whereas torrential flow cut the downstream part by entrenchments and potholes.

In the epiphreatic zone, the highest level of flooding display a clear morphological limit, the "vadose/ phreatic transition". When water is recessing, the epiphreatic gradually drains down. This draining occurs with recession "soutirage" tubes that open at the bottom of each loop. These "soutirages" are labyrinths of steep tubes, organized in 3 dimensions. The low water flow is confined into the phreatic zone in narrow passages. Such geometry of the cave system is developing during high water. The main drain

only acts during high water and is located in the epiphreatic zone. Such flows occur above the base level. The depth of the epiphreatic zone depends on the depth of flooding that implies a sharply contrasted flow regime. Conversely, a regular recharge does not provoke flooding and the epiphreatic zone does not exist ; the main drain is then horizontal, making a watertable cave. The main control for the length profile of deep main drains (water table cave / looping cave) is the recharge regime (regular / contrasted).