

Les cavités d'origine hypogène en France

Hypogenic caves in France

Philippe AUDRA (1) ; Jean-Claude d'ANTONI-NOBECOURT (2) & Jean-Yves BIGOT (3)

(1) Polytech'Nice, Université de Nice - Sophia Antipolis, 1645 route des Lucioles, 06410 BIOT - FRANCE, audra@unice.fr

(2) CRESPE, Le Hameau de l'Ara, 259 Bd Reine Jeanne, 06140 VENCE - FRANCE, jcnobecourt@free.fr

(3) Place F. Mistral, 04400 BARCELONNETTE - FRANCE, catherine.arnoux@club-internet.fr

Résumé

Peu de cavités d'origine hypogène étaient répertoriées en France. Près d'une centaine ont été identifiées depuis quelques années. Leurs caractéristiques sont très diversifiées : actives ou fossiles, thermales, carboniques, sulfuriques, minéralisées. Les recherches ont mis en évidence des phénomènes rares : folia, minéralisations sulfurées ou sulfatées, spéléogenèse par condensation-corrosion

Mots-clés : cavités hypogènes, hydrothermalisme, corrosion sulfurique, folia, sulfures, sulfates, condensation-corrosion

Abstract

Few hypogenic caves were identified in France. Recent investigation identified up to hundred items. Their characteristics are extremely diverse: active or inactive, thermal, carbonic, sulfuric, with mineralizations. Some rare phenomena were found: folia, sulfuric or sulfated minerals, condensation-corrosion speleogenesis

Key-Words: Hypogenic caves, hydrothermalism, sulfuric corrosion, folia, sulfurs, sulfates, condensation-corrosion

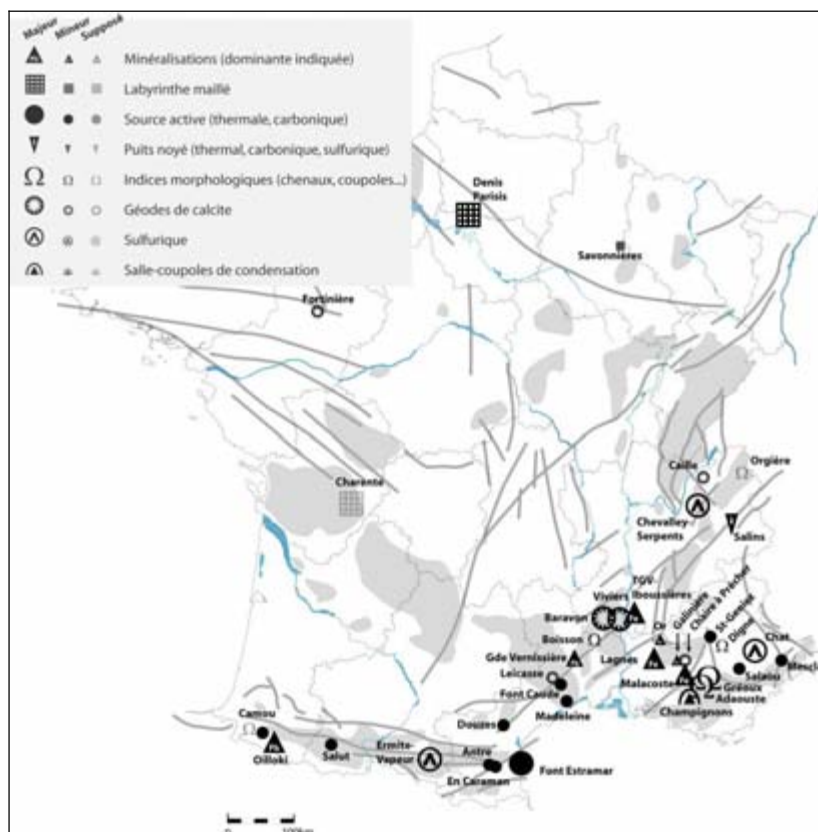


Fig 1 : Carte de répartition des cavités hypogènes en France, selon leur caractéristique prédominante. Elles se concentrent dans les régions orogéniques, le long des grands linéaments, et dans certaines régions de plateaux.

Hypogenic karst results from a source of aggressiveness produced at depth (CO_2 or H_2S) and linked to confine or rising flow, without the direct influence of surface recharge. It corresponds approximately to artesian flow, where hydrothermalism is a variant (KLIMCHOUK 2000). Cette définition relève l'origine profonde des eaux ascendantes et de leur l'agressivité, et implique « l'indépendance » ou tout au

moins « l'absence directe » d'influence de la surface, tant pour l'agressivité que pour la recharge. Le karst hypogène s'oppose ainsi au karst épigène, « classique », où l'infiltration des eaux de surface, rendues agressives par la végétation, élaborent des réseaux karstiques.

La spéléogenèse hypogène apparaît dans les zones de mélange mettant en contact des eaux d'origine, et donc de caractéristiques physico-chimiques différentes (PALMER 2000) : en profondeur dans les zones de convergence ; à faible profondeur dans les zones d'émergence où confluent eaux profondes et eaux météoriques. Dans ces conditions, le mélange crée des déséquilibres chimiques favorables à la dissolution, en particulier en présence de concentrations différentes de CO_2 , mais également d' H_2S . L'apport carbonique est fourni par les processus profonds (dégazage du manteau, métamorphisme, dégradation des composants organiques). Les sulfates réduits en profondeur par l'activité microbienne et les sulfures métalliques (pyrites) fournissent des sulfures en solution qui, en s'oxydant, libèrent de l'acide sulfurique. Le refroidissement des eaux ascendantes renforce théoriquement la solubilité de la calcite. Enfin, la solubilité de la dolomie s'accroît en présence de sulfates par dissolution incongruante.

Dans toutes les régions humides du monde où l'infiltration est généralisée, les cavités épigènes sont infiniment plus nombreuses que les cavités hypogènes. En revanche, elles deviennent majoritaires dans les régions arides, et parfois dans les régions constituées de roches modérément karstifiables par ailleurs. De fait, elles ne sont pas communes en France ; leur rareté a même conduit à les considérer comme des faits exotiques, et bien souvent à leur attribuer par erreur une origine « normale », par manque de modèle de référence. Or, nos travaux d'investigation en France, qui sont loin d'être exhaustifs, ont réinterprété une centaine de cavités d'origine hypogène.

Cette variété de processus, combinée à la diversité des contextes structuraux et topographiques d'ascendance des eaux hypogènes, élabore des types de cavités hypogènes extrêmement diversifiés, à l'échelle du réseau, du modelé de paroi, des types de dépôts. De telles typologies ont déjà été présentées (AUDRA 2006, 2007), aussi nous présenterons ici les cavités hypogènes françaises en fonction de leur caractéristique dominante, qu'il s'agisse de leur fonctionnement, de leur minéralisations inhabituelles, de leur structures de réseaux particulières, ou des processus de dissolution. Dans cette diversité, le dénominateur commun de toutes ces cavités hypogènes est d'être « hors du commun », ou pour le moins très différentes des cavités environnantes d'origine épigène. Et si elles demeurent très minoritaires au regard des cavités épigènes, il existe des contextes où les cavités hypogènes sont prédominantes.

1. Les cavités actives : grottes thermales et puits noyés géants

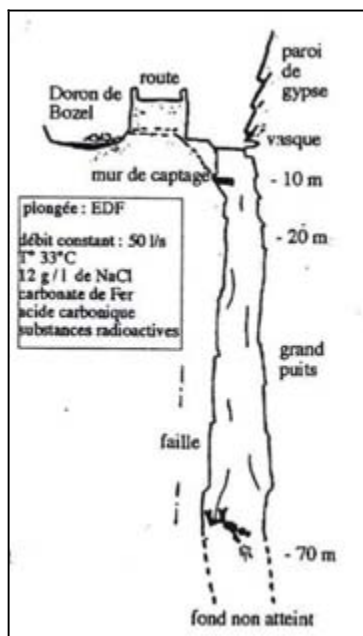


Fig. 2 : Source de Salins, Savoie, puits géant noyé reconnu jusqu'à - 70 m (HOBLEA 1999). Alimentation par des remontées profondes le long de grandes failles, parfois dans les régions volcaniques.

Les cavités thermales actives sont peu nombreuses et de faible étendue (Camou). Des venues thermales sont connues dans des siphons drainant des eaux météoriques : Mescla, gourg de l'Antre (SALVAYRE 1978).

Quelques siphons thermaux ont été plongés sur de faibles distances (sources du Mas d'En Caraman, du Vallon du Salut). À font Estramar, les eaux peu denses provenant de la galerie chaude s'écoulent dans un chenal de voûte, et déposent du manganèse (BRANDT 2003). Dans les Alpes-de-Haute-Provence, les sources thermales de Saint-Geniez et de la Salaou à Castellane émergent de courtes cavités dans du gypse (TORO 1988). Les cavités thermales sulfuriques sont de plus grande ampleur (*infra*). La source de Salins (Savoie) est un puits noyé, reconnu jusqu'à -70 m (fig. 2, HOBLEA 1999). Au contact des évaporites du Trias, l'eau a acquis une minéralisation chlorurée et sulfatée. La remontée rapide des eaux le long de la faille de la Moyenne Tarentaise explique sa température, sa charge carbonique et sa radioactivité. Cette configuration permet le développement des plus profondes cavités noyées connues (pozzo del Merro, Italie, -392 m ; Zacaton, Mexique, -360 m). L'hyper-dissolution provient de la combinaison des apports profonds thermaux, carboniques, et sulfuriques, concentrés le long de grandes failles, dans des régions de tectonique active. La grotte de la Madeleine (Gardiole) en est une illustration.

2. Cavités minéralisées et cristallisées

Les eaux circulant en profondeur, chaudes, acides, et à l'état réduit, altèrent et lessivent les roches endogènes et sédimentaires, et acquièrent ainsi une charge spécifique. À proximité de la surface, le mélange avec les eaux météoriques, l'oxydation des sulfures, et l'activité microbienne chimolithotrophe (« qui tire son énergie de l'oxydation des composés minéraux », ici sulfureux), provoque la précipitation des solutés.



Fig. 3 : Minéralisations ferreuses. Haut : grotte des Iboussières : « tubes noirs » d'oxydes de fer moulant des chenaux de paroi (photo. J.-Y. Bigot). En vignette, détail de fer déposé en copeaux sur support microbien. Bas : baguettes (poolfinger) de fer, déposés sur filaments microbiens en plafond (images Ph. Audra).

Les éléments métalliques se combinent en composés sulfureux, donnant des dépôts métalliques riches en sulfures de Fe, Pb, Zn, Ag, Cu, etc., les *Mississippi Valley Type ore deposits* (MVT), dont les concentrations sont parfois économiquement exploitables (AUDRA & HOFMANN 2004).

Les minéralisations de fer se présentent en amas massif (Lagnes), en encroûtements sur les parois (Galinière, Viviers, périphérie du plateau de Vaucluse) ; sur support microbien (fig. 3), le fer s'agglomère en copeaux (TGV-Iboussières, Malacoste), ou encore en *poolfingers* autour de filaments (Malacoste). Les chenaux recoupés par la carrière de la Malacoste montrent une ségrégation des minéralisations de Fe et Mn, liée à l'évolution du potentiel redox au fur et à mesure de l'ascension du fluide. Si le fer est omniprésent, la grotte d'Oilloki (Pierre Saint-Martin) a été exploitée pour la galène (AUDRA 2008), la mine de la Grande Vermissière (Cévennes) contient des amas de fluorite, baryte, smithsonite, galène.

Plus fréquemment, l'ascension des eaux profondes s'accompagne d'un dégazage provoquant la sursaturation vis-à-vis de la calcite, qui se dépose en milieu aquatique, sous forme de croûtes de parois en gros cristaux (fig. 4), plus rarement de folia (AUDRA et al. 2008). La plupart sont des rhomboédres triangulaires, attestant généralement de températures moyennement élevées (pont de la Caille, Viviers, Chaire à Prêcher). Les mesures d'inclusions fluides dans les calcites de la grotte du Baravon et de l'aven de la Leicasse ont donné respectivement des températures de cristallisations > 70 et de 50-70 °C (HÄUSELMANN inédit).



Fig. 4 : Géode de calcite en rhomboédres triangulaires. Grotte en Ardèche (Photo. P. Deconinck)

3 – Les cavités inactives à morphologies caractéristiques : labyrinthes, salles-coupoles

Les aquifères karstiques confinés sont principalement alimentés par les aquifères poreux sous-jacents, le long de fissures verticales. La conductivité donnée de ces aquifères poreux ne permet pas l'accroissement du débit au fur et à mesure de l'ouverture des fissures dans l'aquifère karstique. En l'absence de compétition permettant la hiérarchisation des drains vers un collecteur principal, l'ensemble des fissures est élargi au même rythme, donnant un labyrinthe suivant la trame de la fracturation. Les grands labyrinthes horizontaux découlent d'une juxtaposition de remontées d'eau ponctuelles, permettant une diffusion latérale de la karstification dans un mince banc karstique horizontal confiné : c'est la « spéléogénèse transverse » (KLIMCHOUK 2003). Le réseau Denis Parisien se développe dans le gypse, la grotte de Saint-Sébastien sous un toit marneux (fig. 5) ; la baume des Pierres (Quinson, environs de Gréoux-les-Bains) s'est développée selon un joint très ouvert, dans des bancs calcaires massifs ; les grands labyrinthes de Charente (fosse

Mobile, etc.) ont probablement une origine hypogène. Dans un aquifère karstique très épais, la remontée d'eau profonde suit un cheminement essentiellement vertical, utilisant alternativement les fissures et la stratification selon un profil en marches d'escalier, formant un labyrinthe en 3D : grottes de l'Adaouste, de Pigette (fig. 6). Lorsque seul un court tronçon de cavité est accessible, ou que les conduits sont impénétrables, l'origine hypogène peut être identifiée par la présence de chenaux de plafond façonnés par les écoulements remontants (Boisson, Digne), qui ne doivent toutefois pas être confondus avec les chenaux paragéométriques (AUDRA 2006).

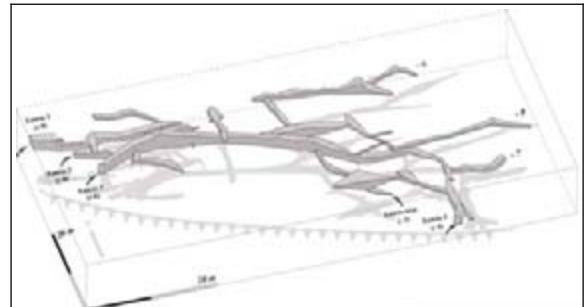


Fig. 5 : Grotte de Saint-Sébastien (Gréoux-les-Bains). Labyrinthe 2D confiné sous un toit marneux incliné (pendage SE), l'eau remontait vers la gauche.

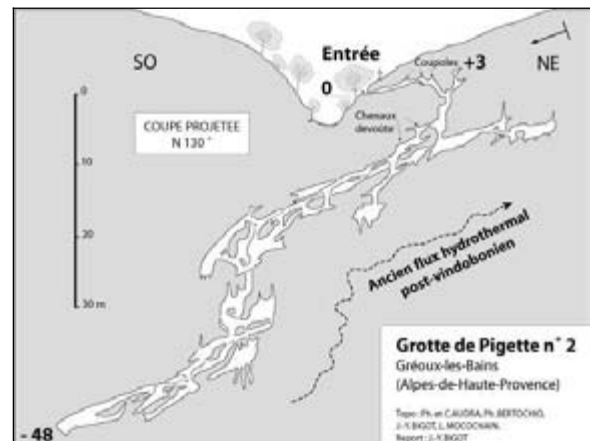


Fig. 6 : Grottes de Pigette (Gréoux-les-Bains, Alpes-de-Haute-Provence). Réseau en 3D, développés sous le toit de la zone noyée par les remontées thermales, suivant les discontinuités structurales (pendage incliné, fractures verticales)

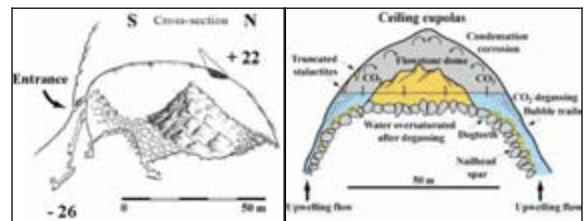


Fig. 7 : Grotte des Champignons (Puylobrier, Bouches-du-Rhône). Le flux hypogène thermique dégaze à proximité de la surface piézométrique, favorisant simultanément une corrosion dans les panaches thermaux et un dépôt de calcite dans le lac sursaturé par dégazage. Les convections thermiques dans l'atmosphère chargée en CO₂ favorisent la condensation-corrosion et le développement de vastes salles-coupoles (AUDRA et al. 2002 ; LISMONDE B. 2003)

Les salle-coupoles sont des vides de dimension exceptionnelle à l'échelle régionale, constitués par une salle coupole unique, alimentée en eau thermale par des fissures sous-jacentes (fig. 7). Elles se développent au toit de la zone noyée : le flux thermal favorise des convections d'air humide dans une atmosphère chargée en CO₂ par dégazage : la corrosion par condensation agrandit progressivement le vide au-dessus du point d'alimentation thermale.

4 – Les cavités sulfuriques avec gypse de remplacement

Les eaux profondes chargées d'H₂S s'oxydent en acide sulfurique (H₂SO₄), qui corrode fortement le calcaire. Au toit de la zone noyée, ces vapeurs sulfuriques combinées aux convections thermales induisent une puissante corrosion par condensation, accompagnée par la formation d'épaisses croûtes de gypse tapissant les parois exondées. Le réseau gouffre Chevalley – grotte des Serpents (Aix-les-Bains) est un des rares cas actif qui permet d'étudier le développement des coupoles emboîtées (AUDRA *et al.* 2007) ; la grotte du Chat, quoique fossile, présente les modèles les plus spectaculaires de corrosion sulfurique : poches de remplacement, tables de corrosion, dômes de condensation, *etc* (AUDRA 2006). Le réseau s'organise le long d'un drain principal à très faible gradient développé par la condensation sulfurique et environné de labyrinthes peu évolués liés aux réorganisations du drainage par captures successives. Le réseau se développe vers l'amont par érosion régressive, sous l'effet de la corrosion par condensation des vapeurs sulfuriques (AUDRA 2007, fig. 8).

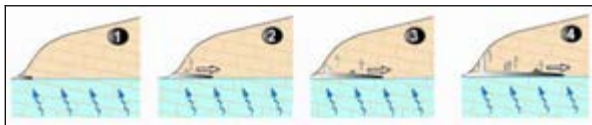


Fig. 8 : Évolution régressive du conduit le long de la surface piézométrique, alimentée par des remontées sulfuriques le long d'une fracture. Simultanément, le thermalisme provoque des ascendances d'air chaud, de la condensation-corrosion, et la formation de cloches et cheminées pouvant déboucher en surface. Les flèches désignent la direction de développement des vides.

Conclusion

Les cavités épigènes « classiques », les plus nombreuses, sont creusées par les écoulements torrentiels et noyés rendus agressifs par l'acidité biogénique. Au contraire, les cavités hypogènes apparaissent le long d'écoulements ascendants relativement lents. Ces flux sont souvent mais pas systématiquement thermaux, généralement fortement chargés, et à l'état réduit. À proximité de la surface, le refroidissement, le mélange, l'oxydation, et le dégazage, provoquent le dépôt de sulfures métalliques (Fe, Mn, Pb...) et de calcite en enduits cristallisés. Les processus microbiens participent aux phénomènes de corrosion et de précipitation. Les cavités s'organisent selon des labyrinthes en 3D, en 2D le long d'un niveau privilégié, ou en puits noyés géants le long des grandes failles actives. Au toit de la zone noyée, la corrosion par condensation peut créer des cavités lorsqu'elle est activée par les convections thermales, ainsi que par les dégazages carboniques et sulfuriques. Les cavités hypogènes se localisent préférentiellement le long des failles actives, en limite des couvertures

imperméables, et donc en bordure des aquifères karstiques (fig. 1). En général les cavités hypogènes sont très minoritaires, mais elles deviennent majoritaires dans des secteurs particuliers (vallée de la Moyenne Durance, peut-être Charente). L'activité hypogène passée est souvent trahie par la présence de sources thermo-minérales proches. La connaissance des critères d'identification et du modèle de spéléogenèse hypogène (KLIMCHOUK 2007) permettra d'accroître le nombre de cavités hypogènes identifiées comme telles.

Références

- AUDRA P. (2006) Les formes pariétales, essai de revue. *16^e Rencontre d'octobre, Méaudre*, 11-30
- AUDRA P. (2008) Une cavité hypogène minéralisée dans le massif de la Pierre Saint-Martin : la grotte d'Oilloki (Ste-Engrâce, Pyrénées-Atlantiques). *Journées de l'AFK, Arette 2007* (à paraître)
- AUDRA P. (2007) – *Karst et spéléogenèse épigènes, hypogènes, recherches appliquées et valorisation*, Habilitation à diriger des rech., Univ. de Nice. 278 p.
- AUDRA P., BIGOT J.-Y. & MOCOCHAIN L. (2002) Hypogenic caves in Provence (France). Specific features and sediments. *Acta Carsologica*, 31/3: 33-50.
- AUDRA P. & HOFMANN B. A. (2004) Les cavités hypogènes associées aux dépôts de sulfures métalliques (MVT). *Le Grotte d'Italia*. 5: 35-56.
- AUDRA P., HOBLEA F., BIGOT J.-Y. & NOBECOURT J.-CL. (2007) The role of condensation-corrosion in thermal speleogenesis. Study of a hypogenic sulfidic cave in Aix-les-Bains. *Acta carsologica*, 36/ 2: 185-194.
- AUDRA P., MOCOCHAIN L., BIGOT J.-Y. & NOBECOURT J.-C. (2008) L'association morpho-sédimentaire bubble trails - folia : un indicateur de spéléogenèse hypogène carbonique. Exemple de la grotte de l'Adaouste (Provence). *Journées de l'AFK, Arette 2007* (à paraître)
- BRANDT C. (2003 – Observations in situ des hétérogénéités thermiques dans le réseau noyé de Font Estramar. *Circulations hydrothermales en terrains calcaires, 10^e Journée technique du AIH-CFH, Carcassonne*, 23-30
- HOBLEA F. (1999) *Contribution à la connaissance et à la gestion environnementale des géosystèmes karstiques montagnards : études savoyardes*. Thèse, Lyon. 995 p.
- KLIMCHOUK A. B. (2000) Speleogenesis under deep-seated and confined settings. *Speleogenesis. Evolution of karst aquifers*, p. 244-260.
- KLIMCHOUK A. B. (2003) Conceptualisation of speleogenesis in multi-storey artesian systems: a model of transverse speleogenesis. *Speleogenesis and Evolution of Karst Aquifers*, 1/2, 18 p.
- KLIMCHOUK A. B. (2007 – Hypogene speleogenesis. Hydrogeological and morphogenetic perspective. *NCKRI Special Paper Series*, 1, 77 p.
- LISMONDE B. (2003) Limestone wall retreat in a ceiling cupola controlled by hydrothermal degassing with wall condensation. *Speleogenesis and Evolution of Karst Aquifers*, 1/4, 3 p.
- PALMER A. N. 2000 - Digital modeling of individual solution conduits. *Speleogenesis: Evolution of Karst Aquifers*, 194-200
- SALVAYRE H. (1978 – *Spéléologie et hydrogéologie des massifs calcaires des Pyrénées-Orientales*, 250 p.
- TORO G. (1988) *Les eaux thermales et minérales dans les Alpes de Haute-Provence (S de la France) ; relations avec le cadre structural*. Thèse, Marseille, 223 p.