

Compte rendu de sorties des 7 et 8 avril 2019 dans les grottes de Toirano (Ligurie, Italie)

(Roberto Chiesa, Andrea Columbu, Philippe Audra & Jean-Yves Bigot)

1. Journée du 7 avril 2019

a) Santuario di Santa Lucia Superiore

La première incursion dans les grottes de Toirano commence par le sanctuaire de Santa Lucia qui date de XV^e siècle ; il est dédié à sainte Lucie de Syracuse (fig. 1).



Figure 1. Porte du sanctuaire de Santa Lucia.



Figure 2. La nef de l'église souterraine.

On trouve sur les parois de la grotte beaucoup de graffitis anciens, notamment du XVI^e. Le sanctuaire est actuellement tenu par un chevalier de l'Ordre des pauvres soldats du Christ ou *Militia Templi* (*Christi pauperum Militum Ordo*) (fig. 2).

L'entrée de la Grotta di Santa Lucia Superiore épouse parfaitement les formes d'une nef d'église. Derrière le chœur, on trouve le bassin (citerne) où est collectée l'eau que les pèlerins rapportent de leur visite (fig. 3). Comme dans bon nombre de cultes souterrains, celui de Sainte Lucie vient probablement remplacer un culte plus ancien lié à l'eau.



Figure 3. Le puits de Sainte-Lucie (citerne) alimenté par des suintements issus de stalactites.



Figure 4. Signature du XVI^e siècle dans la grotte du sanctuaire de Santa Lucia.



Figure 5. Bidon rempli d'eau servant à la recharge des lampes à carbure.



Toutefois, les pèlerins qui honoraient le culte de Sainte Lucie visitaient aussi la caverne comme en attestent les nombreuses signatures qui couvrent les parois de la grotte (**fig. 4**). Les différents éclairages (torches, bougies, etc.) et notamment les récentes lampes à carbure (XIX et XX^e s.) ont enfumé les galeries des siècles durant.

Les visiteurs pouvaient recharger leurs lampes à carbure grâce à l'eau contenue dans des bidons prévus à cet effet (**fig. 5**).

Une suie noire a fini par se déposer partout sur les parois de la grotte (**fig. 6**).

Figure 6. Galerie de la grotte couverte de suie.

La cavité ne contient que des concrétions extrêmement corrodées ; on trouve aussi de très nombreuses coupoles en plafond. A priori, on pourrait attribuer ces coupoles à la présence ancienne de chauves-souris, cependant leur densité est telle qu'il faut peut-être imaginer un autre scénario spéléogénique. Il ne fait pas de doute que la galerie s'est agrandie par expansion des vides, lesquels ont considérablement réduit la taille des concrétions et piliers stalagmitiques (**fig. 6**). Malgré la condensation-corrosion, certains massifs de concrétions, comme les restes de gours, sont encore présents dans la grotte et offrent de nombreux site de prélèvements pour datations (**fig. 7**).

Au fond, des concrétions obstruent la galerie ; une tentative de creusement en roche (tirs de mines), à l'horizontale dans le prolongement du conduit, n'a pas permis de découvrir une suite.

Figure 7. Prélèvement de calcite dans un ancien gour.



b) Grotta del Colombo

La grotte est située au-dessus du sanctuaire ; c'est la plus haute entrée du système de Toirano. Elle contient des galets d'âge pliocène qui ont été injectés dans la grotte (**fig. 8 & 9**).



Figure 8. Galets pliocènes piégés dans la Grotta del Colombo.



Figure 9. Remplissages allochtones scellés par un plancher stalagmitique.



Figure 10. Prélèvement dans une série de coupes.



Figure 11. Formes originelles hypogènes (chenaux ascendants) remplies de sédiments pliocènes injectés dans la grotte depuis la vallée.

La cavité devait être complètement remplie de sédiments comme l'indiquent les formes pariétales (chenaux ascendants) caractéristiques des cavités hypogènes. En effet, une série de formes en coupoles reliées par un court chenal présente encore des remplissages fins allochtones (**fig. 10 & 11**).

Quelques rares formes originelles de la cavité hypogène ont été conservées lors de la phase d'injection de galets pliocènes durant laquelle la vallée était remplie de sédiments à la suite de la remontée du niveau marin. Il est évident que les niveaux horizontaux des grottes de Toirano matérialisent des niveaux de base dont on peut discuter l'étagement.

1) La question de l'étagement des galeries



La notion d'étagement des galeries est une question récurrente en karstologie. Dans les karsts épigènes, lorsque le niveau de base descend, on observe parfois des incisions en méandres, et lorsqu'il monte, des chenaux de voûtes.

Figure 12. Étagement des grottes de Toirano.

À Toirano, l'eau a une origine profonde et les galeries horizontales étagées des grottes de la Colombe (alt. 247 m), du Sanctuaire (Santa Lucia sup., alt. 215 m) et du Tanone (Santa Lucia inf., alt. 201 m) correspondent chacune à un niveau de base (**fig. 12**).

Dans les grottes hypogènes, les niveaux de base qui contrôlent le développement des grottes sont ceux qui se maintiennent durablement dans le temps. Or, les niveaux de base les plus stables sont les niveaux marins et ceux des grandes vallées remblayées par des sédiments. Les ravins et autres torrents aux cours pentus ne présentent pas du tout les mêmes caractéristiques de stabilité et sont souvent sujets à des variations importantes dues à l'incision permanente de leurs lits.

Dans les grottes de Toirano, on peut faire l'hypothèse que les niveaux de base matérialisés par les galeries horizontales correspondent à des niveaux marins stabilisés.



Figure 13. Vu du sanctuaire de Toirano (cercle rouge) et de San Pietro dei Monti, la montagne en arrière-plan.

En effet lors de la montée des eaux, les niveaux de base sont contrôlés par l'avancée de la transgression. Lors du retrait des eaux, c'est plutôt l'érosion (incision) et non les niveaux de base en constante variation qui impriment leurs marques dans le paysage. Ces grottes, si elles existaient au Néogène, auraient été totalement colmatées lors de la transgression pliocène, dont le niveau serait monté plus haut encore que la Grotta del Colombo.

On peut imaginer que les galeries horizontales étagées des grottes de la Colombe, du Sanctuaire (Santa Lucia sup.) et du Tanone (Santa Lucia inf.) se sont mises en place du haut vers le bas lors d'une orogénèse post-pliocène ou d'une remontée du niveau marin au début du Quaternaire (**fig. 14**). Celle de Colombo (1) serait la plus ancienne, puis celle du Sanctuaire (2) et enfin celle du Tanone (Santa Lucia inf.).

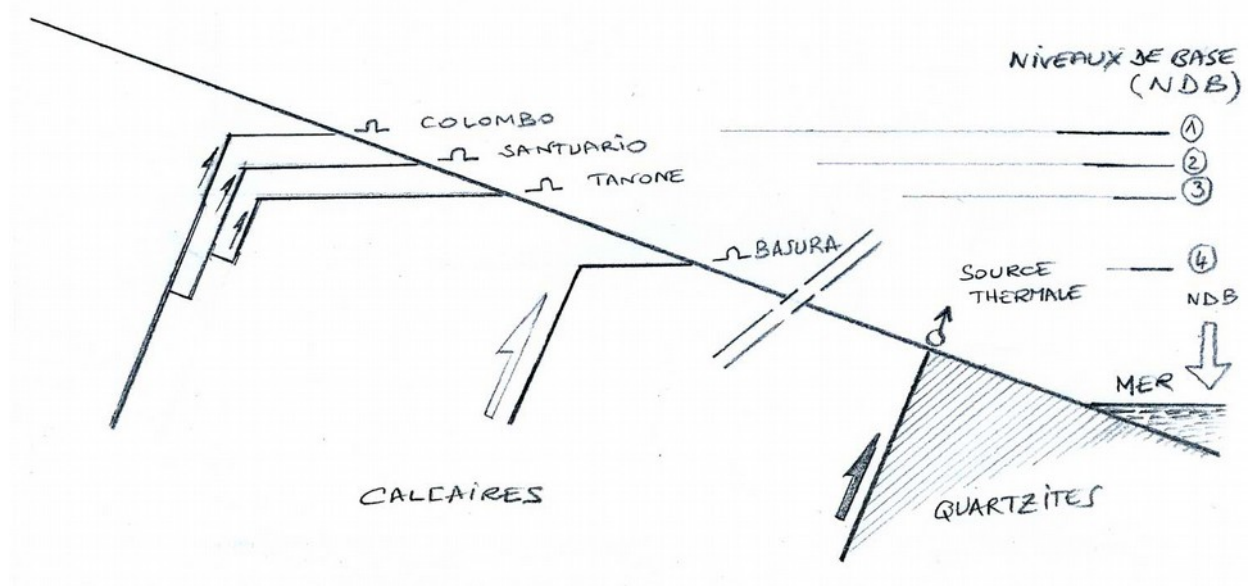


Figure 14. Coupe schématique justifiant la position des émergences fossiles en fonction des variations des niveaux de base.

Lors d'une régression du Quaternaire, la Tana da Bàsura (4) s'est mise en place. Les exutoires de sortie ont « glissé » le long du pendage vers le NO pour se fixer à l'altitude de 186 m. Ainsi, les cavités supérieures se sont en grande partie vidées de leurs remplissages et ont pu constituer des refuges pour les chauves-souris, les fauves et les hommes du Moustérien.

2) Morphologies de la Grotta del Colombo

La première partie de la grotte a été intensément corrodée, tout ou presque a disparu par la condensation-corrosion. Toutefois, après le bouchon de calcite (désobstruction), on retrouve des formes originelles comme les coupoles et surtout les parois altérées. Certes, cette partie de la grotte contient quelques graviers roulés et limons micacés en relation avec l'injection de galets pliocènes, mais elle a été beaucoup moins impactée que la première partie de la grotte largement ouverte sur l'extérieur.

Figure 15. Prélèvement d'échantillons dans les parties hautes des galeries.
Noter les traces d'apatite de couleur noire dans une biocoupole du plafond.
Les autres traces de la présence des chauves-souris ont toutes disparu.



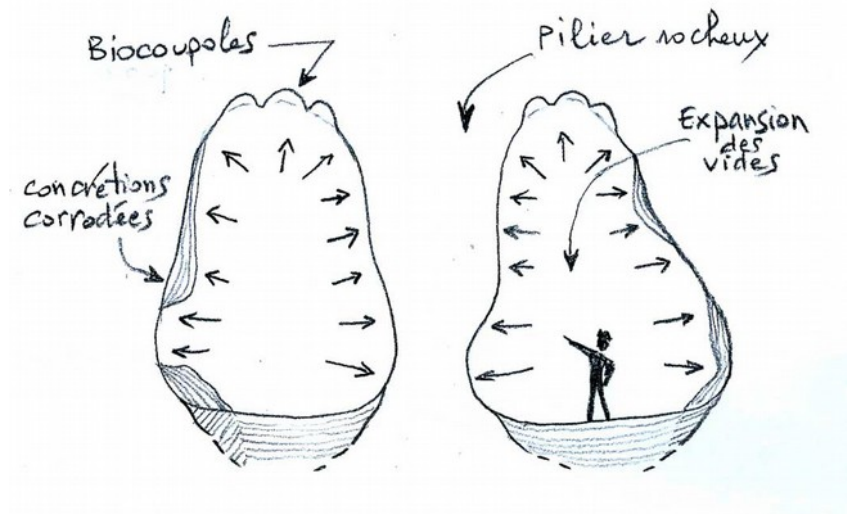
En effet, les parois et plafonds (coupoles) de la partie ouverte aux animaux (chauves-souris principalement) sont compactes et ne présentent pas de corrosion intense (*boxwork*, altération pariétale) du calcaire, alors que les parties confinées et inaccessibles aux chauves-souris (c'est-à-dire après le bouchon de calcite) présentent des parois colorées et très fortement altérées (on y enfonce le doigt). A priori, les coupoles de la partie située après le bouchon de calcite sont d'origine hypogène ; alors que celles, situées dans la partie ouverte, sont des coupoles remodelées par les chauves-souris (biocoupoles).

La plupart de ces biocoupoles sont dépourvues de traces d'apatite (**fig. 15**). Ces traces ont disparu mais l'intense condensation-corrosion, en grande partie liée à l'activité biologique des chiroptères, est attestée par la disparition des spéléothèmes.

L'expansion du volume des galeries a entraîné un retrait important des parois initialement concrétionnées. L'objet des prélèvements de calcite a pour but de quantifier et de dater ce retrait pariétal.

L'expansion des vides est particulièrement visible dans les galeries de la partie ouverte par rapport à la partie préservée située derrière le bouchon de calcite.

Figure 16. Pilier rocheux résultant de l'expansion des vides dans un dédoublement de galeries.



On remarque notamment que les galeries situées près de l'entrée sont beaucoup plus hautes ; leur dédoublement a donné naissance à la formation d'un grand pilier rocheux, affiné à la base, qui a été « réduit » par l'augmentation du volume des vides (**fig. 16 & 17**).

Figure 17. Section schématique de conduits montrant l'expansion par la condensation-corrosion des vides entre deux galeries.

c) Les remplissages



Le sol rocheux des galeries n'est pas visible, mais une coupe pratiquée par les archéologues à l'entrée de la grotte permet d'apprécier la puissance des remplissages.

On note des niveaux noirs dans la coupe qui pourraient correspondre à du guano de chauves-souris (**fig. 18**).

A priori, les hommes de Néandertal (Paléolithique moyen) ont occupé la grotte, mais ils n'ont pas été les seuls. En effet, les chiroptères ont continué de fréquenter la grotte jusqu'à des périodes récentes, comme l'atteste le guano encore présent sur le sol.

Figure 18. Fouilles pratiquées par les archéologues à l'entrée de la Grotta del Colombo.

Les chauves-souris ont été contraintes de chercher des coupes toujours plus éloignées de l'entrée pour y trouver des conditions plus favorables à leur installation.

Certes, différents indices montrent que la grotte a été occupée par les chauves-souris, comme les formes pariétales ; mais pas seulement, des minéraux néoformés sur le guano (Newbéryrite) renseignent la composition du sol. Ces minéraux de couleur jaune cristallisent comme le gypse sur les anciens tas de guano (**fig. 19, 20 & 21**).

Figure 19. Le sol noir, à la base du pilier rocheux, correspond à une accumulation de guano.

Des concrétions jaunes (Newbéryrite) se forment actuellement sur le sol.





Figure 20. Prélèvement d'échantillons de gypse et de phosphates (Newbéryrite).



Figure 21. Cristaux de gypse et de phosphates (Newbéryrite) sur un ancien dépôt de guano.

d) Les concrétions corrodées

Certaines concrétions sont encore alimentées et montrent que malgré les phénomènes de condensation-corrosion, les formations ont continué de croître (**fig. 22**).

Toutefois, l'intérêt des prélèvements est de contraindre la période de corrosion du concrétionnement afin de dater la seconde spéléogenèse de la grotte.

Figure 22. Corrosion de l'encaissant et des lamines de calcite. Au premier plan, une stalagmite a repris sa croissance aux abords de la concrétion corrodée (deuxième plan).



Sans repères, il est difficile de quantifier le retrait des parois par la condensation-corrosion. Les concrétions sont intéressantes, car elles constituent de bons repères, même si elles ont subi une intense corrosion. En effet, elles ont généralement permis de conserver un témoin de la paroi ; ce témoin peut être daté par la première lamine de calcite qui s'est déposée sur la roche (**fig. 23**). L'interface entre la roche encaissante (calcaire) et le concrétionnement est un repère qui justifie un prélèvement. De même, la partie la plus épaisse des concrétions corrodées est un autre repère qui permet d'encadrer la période de formation de la concrétion (**fig. 24**). La condensation-corrosion est sensée s'exercer après la formation de la concrétion. Dans la réalité, c'est certainement un peu plus compliqué que ça, mais c'est déjà une première approche par les datations et la quantification du retrait pariétal.

Les prélèvements seront ensuite remis à Hsun-Ming (Swimm), un doctorant taiwanais, pour des datations U/Th dont la limite de la méthode est d'environ 700 000 ans.

En sortant de la grotte, on peut remarquer les placages de remplissages de galets indurés collés à la roche calcaire (**fig. 25**). Il s'agit des remplissages pliocènes injectés dans la cavité. On note que la taille des galets est supérieure à celle des remplissages situés plus à l'intérieur de la grotte.



Figure 23. Base d'une colonne stalagmitique (lamines de calcite) sur un pilier rocheux.



Figure 24. Carottage dans la calcite d'une concrétion corrodée.

Les dépôts les plus fins ont également une origine allochtone comme le prouve la présence des argiles micacées qui colmatent le fond de la grotte. La granulométrie décroissante des sédiments pliocènes indique une perte de compétence du courant et, par conséquent, une injection de sédiments venant de l'extérieur.

Figure 25. Remplissages indurés de galets pliocènes à l'entrée de la Grotta del Colombo.

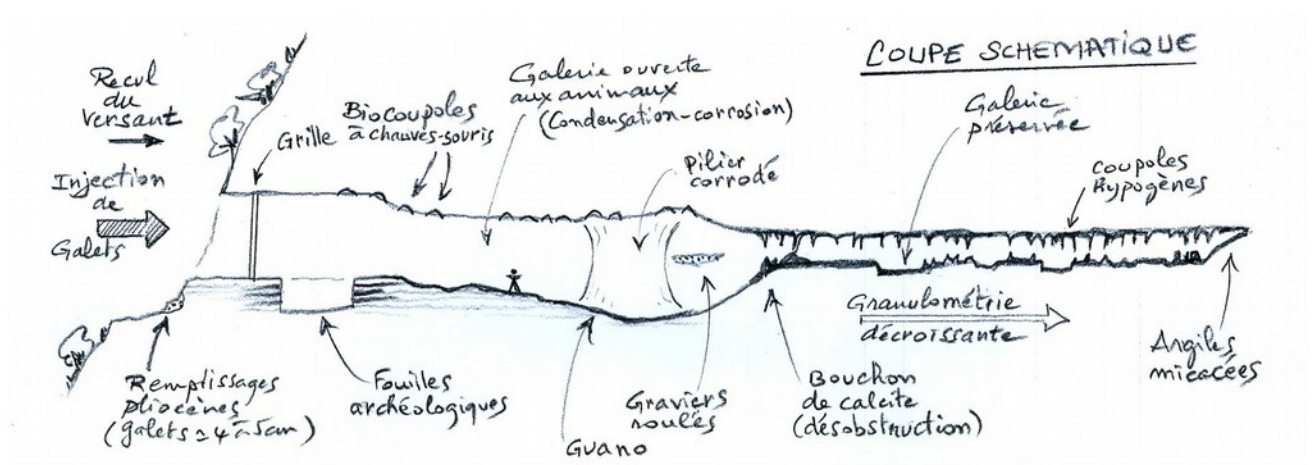


Figure 26. Coupe schématique de la Grotta del Colombo.

2. Journée du 8 avril 2019

a) Tana da Bàsura

Les deux entrées (haute et basse) de la grotte ont longtemps été en partie masquées par un talus d'éboulis issu du versant. Les galeries sont creusées dans une interstrate mais présentent des sections parfaitement circulaires (fig. 27).



Figure 27. Entrée basse (touristique) de la Tana da Bàsura.

Ce qui est très étonnant, car un creusement « phréatique » aurait davantage épousé la forme de la discontinuité (pendage) produisant une section en amande oblique. Un phénomène de condensation-corrosion n'est donc pas à exclure. Quelques dizaines de mètres après l'entrée, on arrive devant une sorte de soupirail : une étroiture ouverte en 1950 entre le plafond rocheux et une coulée stalagmitique.

L'homme

Après ce passage en partie fermé par la coulée, on trouve des nombreuses traces de fréquentation humaine comme des empreintes de pieds et des « mouchages » de torches. La partie basse d'une grande galerie inclinée (Cunicolo delle Impronte) comporte des traces de pas d'environ 14 000 ans. D'après notre guide, Flavia Toso, les empreintes de pattes d'un canidé ont été également relevées près de celles des hommes.

Le loup

Un chien ou un loup ne s'aventure pas seul aussi loin sous terre... Une hypothèse plausible serait d'associer les empreintes de pas humains à celles du canidé. Dans ce cas, on doit admettre que le canidé suit l'homme et non l'inverse. Lors de fouilles archéologiques, les chercheurs en sont réduits à relever les indices qui permettront de constituer un faisceau de présomptions de domestication du chien. En effet, aucun caractère discriminant ne permet de différencier un loup, complètement sauvage et indépendant, d'un loup inféodé à l'homme ; simplement parce que, à ce stade de la domestication, les modifications morphologiques de son squelette ne sont pas encore perceptibles. Seul un faisceau d'indices archéologiques permet de caractériser cette liaison, attestée au Magdalénien, entre l'homme et l'animal.

Par conséquent, les empreintes de pas humains et de pattes de canidés, dans une zone aussi éloignée de la Tana da Bàsura, constituent un jalon intéressant dans l'histoire de la domestication du chien.

L'ours

On relève aussi quelques empreintes de pattes d'ours sur la piste humaine... Toutefois, on ne peut pas envisager une domestication de l'ours qui reste parfaitement autonome sous terre ; il nous faut reformuler et dire que c'est plutôt l'homme qui a suivi la piste de l'ours. En effet, les ursidés sont des habitués des grottes et les utilisent régulièrement pour y hiberner notamment. Les hommes de Toirano n'ont fait que suivre la piste de l'ours, qui est l'itinéraire le plus pratique aussi. Peut-être avaient-ils conscience de cette situation, lorsqu'ils ont tenté d'imiter les griffades d'ursidés sur les parois. Par jeu sans doute, des enfants ont tracé avec leurs doigts des traits verticaux évoquant les traces de griffes d'un ours.

Plus loin dans la Sala dei Misteri, on trouve de nombreuses traces digitées (**fig. 28**) et des impacts de boulettes d'argile sur les parois.

Figure 28. Tracés digitaux d'enfants dans la Sala dei Misteri de la Tana da Bàsura.



Manifestement, des enfants sont venus et se sont amusés longuement dans cette salle qui constituait alors le terminus de la grotte. Les traces de charbons de bois sur les parois (vers le Laghetto notamment) devaient correspondre à des indications permettant de retrouver leur itinéraire.

Par ailleurs, de nombreux ossements d'ours ont été retrouvés dans la grotte, mais ils ont été remaniés par des circulations souterraines et ont été entraînés dans un gour profond (Cimitero degli Orsi). Étrangement, il n'a pas été retrouvé de bauges à ours ou de lieux d'hibernation (de 50 000 à 24 000 ans).

Dans cette partie de la grotte, la condensation-corrosion est intense et de nombreuses concrétions présentent des réductions de volume et des altérations manifestes. Il semble difficile d'attribuer aux seules chauves-souris le résultat de cette corrosion. On doit, là aussi, imaginer une autre origine. On note toutefois que la roche est franche et qu'il n'existe pas de surfaces intensément corrodées ou altérées.



La sala dei Misteri se prolonge par une galerie très concrétionnée, dite Antro di Cibebe, qui se terminait par un lac. L'assèchement de ce lac a permis la mise au jour d'énormes *mammalies* ou *pool fingers* (**fig. 29**).

Figure 29.
L'Antro di Cibebe correspond à un grand gour asséché pour les besoins de l'exploitation touristique.

b) Grotta di Santa Lucia Inferiore (partie concrétionnée)



Après le franchissement d'un tunnel ouvert en 1967, on accède à la partie concrétionnée de la Grotta di Santa Lucia Inferiore. Cette partie de la grotte n'était pas ouverte aux chauves-souris et présente des parois colorées et très fortement altérées (**fig. 30**). Il s'agit d'une partie confinée qui n'avait pas beaucoup de connexions avec l'extérieur.

Figure 30. Les parois très altérées et l'absence de concrétionnement indiquent des phénomènes de condensation-corrosion intenses.

L'atmosphère de la grotte a dû y être corrosive, car les surfaces de certaines concrétions sont très altérées. On en conclut que des phénomènes de condensation-corrosion ont altéré parois et concrétions (**fig. 31 & 32**). L'origine de la corrosion est à rechercher à l'intérieur du karst et non dans la présence massive et permanente de chauves-souris.



Figure 31. Concrétions corrodées par la condensation-corrosion d'origine hypogène.



Figure 32. Galerie comportant plusieurs générations de concrétions (saines et altérées).

Un peu plus loin, on traverse une passerelle qui enjambe le Pozzo dell'Ade. Il s'agirait en fait d'un *feeder* d'où provenaient les eaux profondes qui sont à l'origine du creusement de la cavité. Dans la Grande Colata, on trouve également des formes typiques comme un emboîtement de coupes qui courent sur les plafonds évoquant des chenaux ascendants (**fig. 33**). Les mêmes formes, colmatées par des remplissages pliocènes, ont été observées dans les plafonds de la Grotta del Colombo (**fig. 11**). Plus loin, on arrive au Pantheon (**fig. 34**) ; il s'agit d'un puits remontant de section circulaire qui donne accès à la partie horizontale. À partir de cet endroit, les galeries sont subhorizontales et rejoignent le versant, matérialisant la présence de l'ancien niveau de base du Tanone.



Figure 33. Coupes emboîtées (chenaux ascendants) de la Grande Colata.



Figure 34. Le Pantheon, conduit vertical de section circulaire.

Dans les Capitelli, des gours aux bords mamelonnés formaient des bassins dans lesquels se sont formés des cônes (fig. 35).

Figure 35. Gours aux bords mamelonnés de la Capitelli. On voit les cônes au premier plan.



Les cônes sont des concrétions aquatiques typiques des bassins sursaturés en calcite. Ces concrétions ne sont pas des formes typiquement hypogènes, mais on en trouve souvent dans les grottes hypogènes.

c) Il Tanone

Au bout des Capitelli, on débouche dans un autre univers en franchissant un bouchon de calcite qui a isolé la partie concrétionnée de l'extérieur. Un sas permet de déboucher dans une grande galerie rocheuse (fig. 36) pratiquement dépourvue de concrétions qu'on appelle le Tanone (entendre « la grande tanière »).

Les différences de températures y sont très sensibles ; le sol sec et poussiéreux de la grotte montre que les phénomènes qui règnent dans cette galerie, connectée à l'extérieur, obéissent à d'autres règles.

La plupart du concrétionnement a disparu, la galerie ressemble plus à un tunnel qu'à une véritable grotte.

Une partie de la galerie sert d'ateliers pédagogiques à des scolaires qui peuvent s'exercer à la peinture préhistorique et à la construction de cabanes (**fig. 37**).



**Figure 36. Galerie du Tanone
(Grotta di Santa Lucia Inferiore).**



**Figure 37. Ateliers de préhistoire
dans la Galerie du Tanone.**

Des prélèvements sont effectués dans un lambeau de remplissages situé sous un plancher stalagmitique, mais il n'est pas du tout certain que ce remplissage soit très ancien... Dans cette galerie, les remplissages originaux semblent avoir disparu.

Les chauves-souris ont laissé des traces d'apatite dans certaines coupoles de la partie profonde de la galerie du Tanone. La disparition des concrétions et d'une partie des parois de la galerie est probablement due aux chauves-souris et peut-être à des phénomènes de condensation-corrosion liées aux variations des températures extérieures, mais en aucun cas à des phénomènes hypogènes.

d) Ramo del Fascio

Dans l'après-midi, Roberto nous guide dans le Ramo del Fascio ; il s'agit d'un réseau situé sous la galerie des empreintes (Cunicolo delle Impronte) de la Tana da Bàsura. Il est nécessaire d'avoir le matériel de descente, car il y a quelques petits puits ou ressauts. Un conduit tortueux au plafond arrondi en chenal de voûte mène après quelques contorsions à de petits volumes à la géométrie improbable. Parfois, le sol est plat (**fig. 38**)...

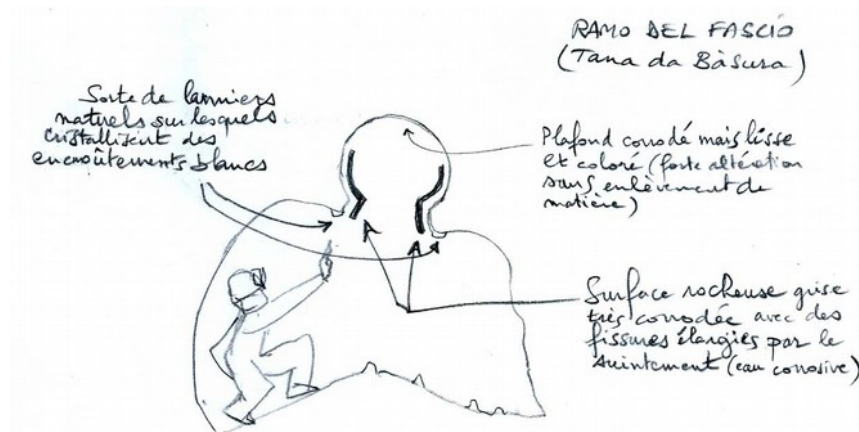
**Figure 38. Les formes tourmentées
du Ramo del Fascio.**



Tout cela est trompeur, car les soutirages des galeries supérieures ont fourni des matériaux qui ont bouché les issues et gênent la compréhension de la grotte. En plus, le tout est recouvert par des planchers stalagmitiques. Il y a trop de concrétions, trop de décorations superflues pour avoir une bonne vision spéléogénique de ce réseau de galeries.

En fait, nous nous trouvons dans des *feeders* : des conduits d'alimentation en eau, plus ou moins thermale et plus ou moins corrosive, à l'origine de la formation de la grotte. Bien sûr, l'organisation des galeries ne ressemble à rien ; car l'eau venait du fond par des conduits toujours plus étroits qui ont fini par se colmater avec le temps. Une fois qu'on a compris que la grotte est d'origine hypogène et que l'alimentation se fait par de petits conduits verticaux appelés *feeders*, on n'est plus du tout étonné par sa morphologie.

On remarque des phénomènes de condensation-corrosion entièrement dus à l'origine hypogène de la grotte. Dans les chenaux de voûte, on trouve des plafonds colorés et fortement altérés et à la surface bien lisse.



Il s'agit du résultat de la condensation-corrosion dans les plafonds plus froids (fig. 39).

Les eaux qui ont condensé dans ces chenaux se sont concentrées ensuite et ont perlé sur les parois pour ruisseler et ciseler le calcaire en élargissant des fissures.

Figure 39. Condensation-corrosion dans le Ramo del Fascio.

Enfin, les eaux de condensation, toujours agressives, se sont concentrées dans un larmier naturel reconnaissable aux encroûtements blanchâtres laissés par les gouttes acides qui s'y formaient avant de tomber sur le sol. Ces encroûtements blanchâtres se retrouvent dans de très nombreuses grottes ; ils peuvent être liés à la présence de chauves-souris ou non. Dans le Ramo del Fascio, il est clair qu'ils ne sont pas liés à la présence de chiroptères.

En sortant du Ramo del Fascio, Philippe et Roberto visitent le Ramo del Laghetto. Il s'agit du même genre de conduits plus ou moins creusés dans le pendage et qui, d'après Philippe, constituaient des *feeders* dans le système hypogène.

3. Spéléogénèse des grottes de Toirano

Après avoir évoqué la source thermale de Toirano, le site d'Ussat-les-Bains en Ariège (France) et le soulèvement continu des Alpes ligures, un modèle de creusement hypogène sera proposé.

a) La source thermale : un phénomène karstique majeur

Il est rare qu'il y ait plusieurs origines à une cavité naturelle. Par exemple, on ne peut accepter l'idée d'un creusement par recoupement de méandre et d'une grotte hypogène ; c'est l'un ou c'est l'autre, mais pas les deux. Si on doit choisir, on examinera d'abord le phénomène karstique majeur de la zone : la source thermale (19,5 à 20,1°C) dite Fonte dell'Acqua Calda di Toirano (alt. 70 m) d'un débit d'environ 100 l/s., qui sourd dans le lit du torrent Varatella. Cette source est captée et alimente la ville ; en effet, ses caractéristiques (bicarbonatée-calcique et très légèrement chlorurée-sodique) sont néanmoins compatibles avec les normes locales de consommation. Les grottes de Toirano sont, bien entendu, liées à la source thermale dont les effets sur le karst ont varié en fonction de l'altitude des niveaux de base. En général, les sources d'origine hypogène sont des émergences qui ont des caractéristiques et un débit très réguliers. Les seuls éléments qui peuvent varier se trouvent dans leur environnement. Par exemple, les variations du niveau de base (élévation du niveau marin ou orogénèse) peuvent parfaitement expliquer la formation des grottes de Toirano qui dominent la source (fig. 40).

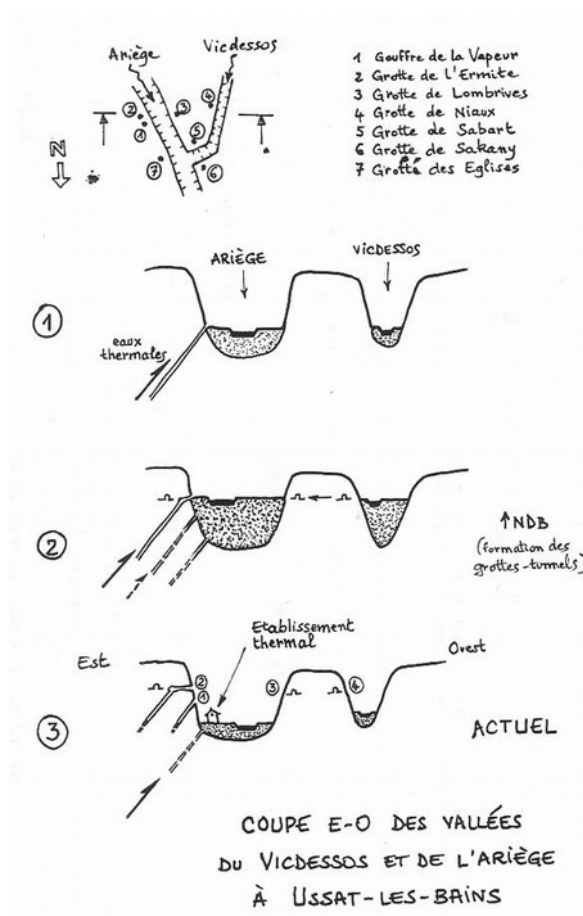


**Figure 40. Le village de Toirano vu depuis la Grotta del Colombo.
La source thermale d'Acqua Calda (20°C) sourd dans le lit du torrent Varatella.**

b) Le système d'Ussat-les-Bains (Ariège, France)

Ces constatations sommaires suffisent pour comprendre la géométrie du système karstique de Toirano qui ressemble à celui d'Ussat-les-Bains (Ariège, France) dans les Pyrénées (cf. Compte rendu des sorties du 25 au 27 mars 2002). La grotte de l'Ermite présente des galeries horizontales plus ou moins rayonnantes autour d'un puits subvertical (*feeder*) de plusieurs dizaines de mètres de profondeur. Le gouffre de la Vapeur, est une cavité subverticale qui se termine également sur un siphon d'eau thermale. Ces deux cavités se sont formées lors d'un remblaiement de la vallée de l'Ariège par des alluvions d'origine fluvio-glaciaire (**fig. 41**). On retrouve des sédiments allochtones dans les entrées des cavités. Les galeries horizontales de la grotte de l'Ermite ont fait l'objet d'injections de sédiments (granulométrie décroissante) depuis les entrées jusque dans les parties éloignées de la cavité.

Figure 41. Différentes phases de comblement et de formation des cavités hypogées d'Ussat-les-Bains (Ariège, France) en fonction du niveau de base des vallées (document extrait du compte rendu des sorties du 25 au 27 mars 2002).



c) Le soulèvement pléistocène

Il y a environ 1 Ma le niveau marin oscillait entre 50 et 70 m en dessous de l'actuel (**fig. 42**), on retiendra donc 60 m pour les calculs suivants.

Si la surrection post-pliocène (de 1,8 Ma à l'Actuel) de la région ligure est évaluée à plus de 350 m.

On peut évaluer l'âge de la Grotta del Colombo (alt. 247 m) selon la formule suivante :

$247 + 60 = 307$ m de surrection entre + 247 et -60 m.

d'où $2 \text{ Ma} / 350 \times 307 = 1,75 \text{ Ma}$.

L'âge de la Grotta del Colombo pourrait être d'environ **1,8 Ma**.

Avec une vitesse de 195 m par Ma, on peut évaluer le niveau de la Grotta del Santuario (alt. 215 m) à :

$215 + 60 = 275$ m de surrection entre + 215 et -60 m.

d'où $2 \text{ Ma} / 350 \times 275 = 1,57 \text{ Ma}$.

L'âge de la Grotta del Santuario pourrait être d'environ **1,6 Ma**.

Avec une vitesse de 195 m par Ma, on peut évaluer le niveau du Tanone (alt. 201 m) à :

$201 + 60 = 261$ m de surrection entre + 201 et -60 m.

d'où $2 \text{ Ma} / 350 \times 261 = 1,49 \text{ Ma}$.

L'âge du Tanone pourrait être d'environ **1,5 Ma**.

Avec une vitesse de 195 m par Ma, on peut évaluer le niveau de la Tana da Bàsura (alt. 186 m) à :

$186 + 60 = 246$ m de surrection entre + 186 et -60 m.

d'où $2 \text{ Ma} / 350 \times 246 = 1,40 \text{ Ma}$.

L'âge de la Tana da Bàsura pourrait être d'environ **1,4 Ma**.

Figure 42. Formation des grottes de Toirano calées sur des niveaux marins du Pléistocène inférieur.

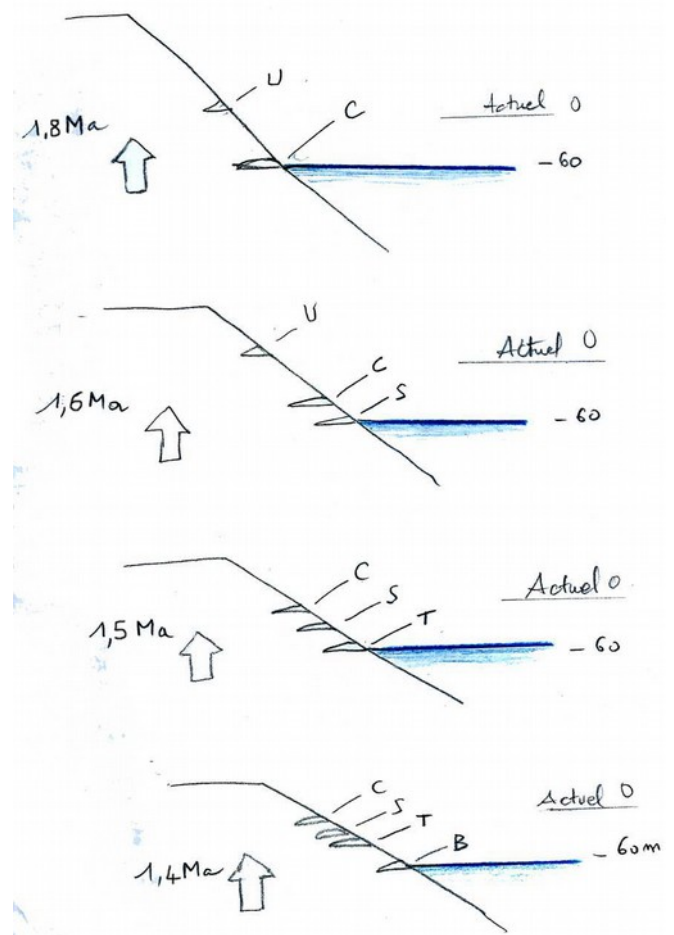
U = Grotta dell'Ulivo ;

C = Grotta del Colombo ;

S = Grotta del Santuario ;

T = Tanone ;

B = Tana da Bàsura.



Il existe une petite cavité au-dessus des grottes de Toirano, la Grotta dell'Ulivo (cadastrée n° 181) à l'altitude de 337 m. On peut calculer son âge à partir des règles établies pour les autres grottes, d'où :

$337 + 60 = 397$ m de surrection entre + 337 et -60 m.

d'où $2 \text{ Ma} / 350 \times 397 = 2,26 \text{ Ma}$.

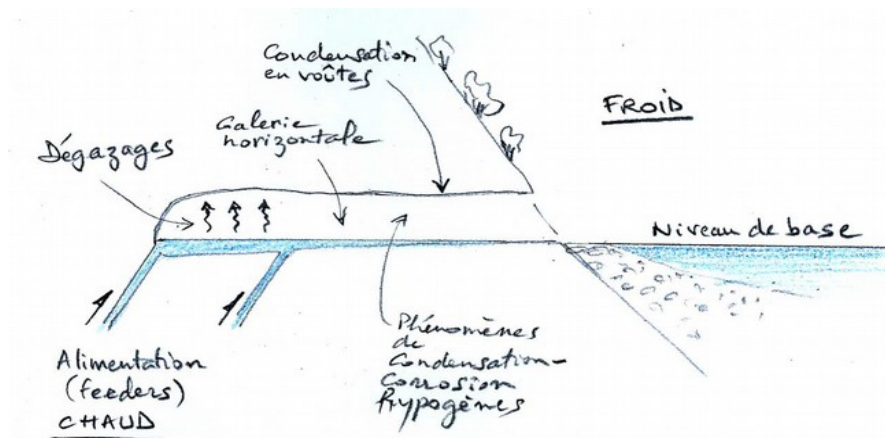
L'âge de la Grotta dell'Ulivo pourrait être d'environ **2,2 Ma**.

Tous ces calculs semblent cohérents pour admettre que les grottes de Toirano se sont formées durant le Pléistocène inférieur plutôt que pendant le Pliocène.

d) Le modèle hypogène

On l'a vu, le modèle hypogène des grottes de Toirano existe ailleurs, notamment dans la vallée de l'Ariège (France). À Toirano, le niveau de base est entièrement contrôlé par celui de la mer Méditerranée. Si les remontées hypogènes d'eau thermique existaient antérieurement au Pléistocène inférieur, il faudrait alors en rechercher les témoins dans l'arrière-pays... En admettant qu'ils n'aient pas disparu.

Avec le soulèvement continu des Alpes ligures, les entrées des cavités ont été portées en altitude depuis leur formation. Leur alimentation se trouve dans les zones profondes où les eaux de l'émergence d'Acqua Calda ont pu s'élever en température et se minéraliser.



Ces eaux issues des calcaires ont creusé des conduits subverticaux dans le pendage des calcaires ou selon les grandes fractures pour déboucher en surface par des galeries horizontales relativement courtes à l'échelle du système (fig. 43).

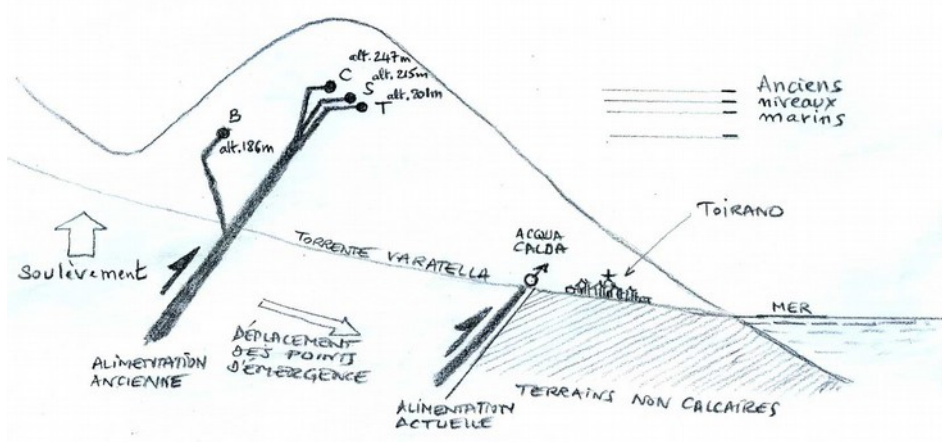
Figure 43. Coupe schématique d'une grotte d'origine hypogène.

Chaque variation du niveau marin a entraîné la formation d'un nouveau conduit qui s'est creusé principalement par expansion des vides, selon un phénomène dit de condensation-corrosion spécifique des cavités hypogènes. On sait que ces conduits hypogènes sont relativement courts et se terminent par des conduits subverticaux d'alimentation (feeders).

Seuls les conduits horizontaux et quelques conduits d'alimentation sont observables dans les grottes de Toirano. Ces conduits d'alimentation ont été reconnus dans la Tana da Bàsura (réseaux del Fascio et di Laghetto), mais aussi dans la Grotta di Santa Lucia Inferiore (Pozzo dell'Ade et Pantheon), correspondant à la sortie du Tanone.

Le retrait de la mer, consécutif au soulèvement, a entraîné un glissement des points d'émergence vers le fond de la vallée de Varatella jusqu'à la limite géologique calcaires-quartzites (faille-barrage) où apparaît aujourd'hui la Fonte dell'Acqua Calda (20°C) à l'altitude de 70 m (fig. 44).

**Figure 44. Coupe schématique le long du torrent Varatella indiquant les différentes alimentations hypogènes en fonction des anciens niveaux marins portés en altitude (soulèvement du Pléistocène inférieur).
C = Grotta del Colombo ;
S = Grotta del Santuario ;
T = Tanone ;
B = Tana da Bàsura.**



*** **