



**Ecole Française de Spéléologie**  
**C. S. R. Côte d'Azur**

**KARSTOLOGIE DANS  
LES GROTTES DE DALUIS  
ET DE SAINT BENOÎT**

*Stage régional Equipier Scientifique organisé par  
la Commission Formation du CDS 06 et  
la Commission Scientifique du CDS 06*

**18-19 Mars et 25-26 Mars 2006**

# **POUR UNE POIGNEE DE SULFATES...**

## ***COMPTE-RENDU DU STAGE REGIONAL 2006 « EQUIPIER SCIENTIFIQUE »***

**Région Q – C.D.S. 06**

**Synthèse des travaux thématiques, incluant les  
contributions des stagiaires.**

**Les textes de Catherine Baby, Tristan Charles, Pierre Kettela et Eric Madelaine  
ont été intégrés et consolidés par Jean-Yves Bigot, Michel Isnard et Jean-  
Claude Nobécourt.**

# TABLE DES MATIERES

<b>I. INTRODUCTION</b> .....	2
<b>II. LA SPELEOGENESE PAR CORROSION SULFURIQUE : L'EXEMPLE DE LA GROTTTE DU CHAT (DALUIS, 06)</b> .....	3
A. Historique de la problématique hypogène.....	3
B. Le processus de karstification hypogène.....	4
C. Les indices de la karstification hypogène .....	6
D. L'empreinte sulfurique dans la grotte du Chat.....	8
<b>III. IL ETAIT UNE FOIS DANS LE SUD-EST</b> .....	14
A. Samedi 18 Mars 2006 au matin : in the Far East .....	15
B. Samedi après-midi : on donne sa langue au Chat.....	17
C. Samedi soir : le retour du Chat.....	18
D. Dimanche 19 Mars : le Chat II.....	19
E. Samedi 25 Mars : le Chat frappe toujours deux fois.....	20
F. Dimanche 26 Mars : le Chat se rebiffe.....	21
<b>IV. BILAN SCIENTIFIQUE</b> .....	24
A. Utilisation des logiciels de vectorisation appliqués à la topographie 3D.....	24
1. Point de départ.....	24
2. Utilisation de VTopo.....	24
3. Présentation de Thérion.....	26
4. Quelques résultats avec Thérion .....	27
B. Formation des concrétions en « choux-fleurs » ou « popcorns ».....	30
1. Observations du premier week-end.....	30
2. Observations du second week-end.....	32
C. Morphométrie des poches de substitution.....	34
1. Objectif de l'atelier.....	34
2. Analyse de la répartition des poches de substitution.....	35
3. Méthodes .....	37
4. Déroulement in situ et limites de la méthode.....	38
5. Discussion .....	39
6. Conclusions .....	48
D. L'actif associé à la grotte du Chat.....	54
1. Présentation de la source .....	54
2. Un biotope spécifique.....	54
3. Caractéristiques physico-chimiques.....	55
4. Mesure du débit de la source active .....	58
5. Les conduits fossiles sur le versant .....	59
<b>V. BIBLIOGRAPHIE</b> .....	62
<b>VI. ANNEXES</b> .....	63
A. Lexique.....	63
B. Table des illustrations.....	64
C. Liste des participants.....	65
D. Contacts utiles .....	66

# I. INTRODUCTION

Comme tous les ans depuis quelques années, la Commission Formation du CDS 06, pour la première fois assistée par la Commission Scientifique du CDS 06, a organisé au printemps un stage régional « Equipier Scientifique » sous l'égide de la Région Q.

Quoique les thèmes de ces stages régionaux évoluent toujours autour des différentes disciplines scientifiques connexes à la spéléologie (biospéléologie, colorations et traçages, archéologie...), aucune des sessions n'a vraiment ressemblé aux précédentes, chacune ayant sa « couleur » particulière. Celle-ci fut particulièrement originale, et à plus d'un titre :

- le thème : un aspect quasiment méconnu de la karstologie, jamais enseigné, peu publié : la spéléogénèse par corrosion sulfurique, liée à l'hydrothermalisme ;
- le site : une archi-classique des Alpes Maritimes, qui se révèle être un des plus beaux exemples en France de ce type de karstification, ce que personne ou presque n'avait clairement compris ;
- les objectifs : du vrai travail de recherche, sur des ateliers à peu près vierges de connaissance, dans des conditions réelles de travail scientifique ;
- le public : sur les dix participants, on retrouve six spéléos stagiaires « récidivistes » (fidélité rassurante), mais aussi, pour la première fois, deux purs étudiants non issus de la communauté spéléo. Cette incursion des universitaires dans nos formations matérialise clairement la qualité des stages, l'intérêt de la thématique, et la connexion effective entre le monde de la recherche et les groupes de travail scientifique au sein des spéléos.
- N'ayons pas peur de le dire, la qualité et la variété des intervenants fut probablement aussi un des grands points forts de ce stage...

Au bilan, un vrai travail de recherche, sur des sujets novateurs, créatif sur le plan des méthodes, impressionnant en qualité et en quantité, a été réalisé : nous vous laissons en juger dans les pages qui suivent. Le plus important néanmoins n'est pas écrit : c'est l'ambiance, simple et sans « prise de tête » : pas de plan rigide, pas de cadre préétabli, mais des axes de travail ; le cheminement du stage évolue au fil des questions des uns, des observations des autres ; chacun, quel que soit son niveau de connaissance, qu'il soit spéléo de base ou karstophile averti, apporte au travail de son équipe ses ressources, et recueille dans le débat ce qui l'arrange.

Les capacités d'encadrement et d'hébergement sont loin d'avoir été saturées, et nous aurions largement pu avec le même dispositif accueillir plus de participants : une demi-douzaine de stagiaires supplémentaires auraient, c'est évident, encore enrichi les résultats. Il est clair que la communication autour de ce stage, rudimentaire, tend à en limiter l'accès à quelques « happy few » qui connaissent déjà la formule... Une plus large diffusion du présent compte-rendu est déjà une invitation à découvrir ces stages de proximité : nous essaierons pour les sessions suivantes d'ouvrir plus largement les portes de la communication, afin d'avoir encore plus de plaisir à partager la pratique d'une « spéléologie qui s'amuse à réfléchir ».

Alors, bonne lecture, et... à l'an prochain, peut-être ?

## II. LA SPELEOGENESE PAR CORROSION SULFURIQUE : L'EXEMPLE DE LA GROTTTE DU CHAT (DALUIS, 06)

### A. Historique de la problématique hypogène

Dans les années 1970 - 1980, des chercheurs américains qui travaillaient, l'un dans la grotte de Lower Kane, Wyoming (Egemeier), les autres dans le système de Carlsbad Cavern, Nouveau Mexique (Hill, Palmer...), ont été interpellés par les quantités considérables de gypse que recèlent ces cavités : ce minéral est en effet fortement soluble, et ne leur semblait pas pouvoir coexister avec un creusement karstique conventionnel provoqué par les infiltrations d'eaux venues de la surface, qui n'auraient pas manqué de dissoudre le gypse.

Peu à peu, ils ont été amenés à conclure que ces cavités s'étaient creusées en raison de remontées de fluides profonds, liquides, gazeux ou mixtes, chargés de composés sulfureux<sup>1</sup> : suite à des processus complexes impliquant des bactéries, la transformation des composés sulfatés<sup>2</sup> ou sulfurés<sup>3</sup> en acide sulfurique avait provoqué une intense corrosion des carbonates, et leur conversion en sulfates<sup>4</sup>. Lechuguilla, principalement en raison de ses dimensions et de ses concrétionnements spectaculaires, est aujourd'hui l'exemple le plus connu des ces cavités « anormales ».

<sup>1</sup> Sulfureux : qui contient du soufre libre ou l'ion sulfure  $S^{2-}$

<sup>2</sup> Sulfaté : qui contient des sulfates, sels de l'acide sulfurique caractérisés par le radical  $SO_4^-$

<sup>3</sup> Sulfuré : qui contient des sulfures, métaux ou cations complexes combinés avec du soufre et caractérisés par l'ion  $S^{2-}$

<sup>4</sup> Sulfate : sel de l'acide sulfurique caractérisé par l'ion  $SO_4^-$

La corrosion sulfurique par des remontées de fluides profonds, qualifiée d'« hypogène » par opposition à la corrosion « épigène » causée par des percolations d'eaux directement venues de la surface, a tout d'abord été accueillie dans la communauté scientifique avec scepticisme, puis a été admise comme un phénomène marginal ; mais dans le Nouveau Monde comme ailleurs sur le globe, un nombre croissant de cavités ont été comprises comme relevant de ce processus : tout d'abord la douzaine de grottes hydrothermales<sup>5</sup> actives connues en tant que telles, souvent depuis l'antiquité (par exemple grotte des Serpents à Aix-les-bains, système de Frassassi en Italie, grottes de Buda en Hongrie, quelques cavités en Algérie), puis d'autres, inactives mais identifiées comme hypogènes à la lumière des travaux des équipes américaines ; certaines cavités sulfuriques récemment découvertes de façon fortuite se sont même ajoutées à la liste (grotte de Movile en Roumanie, 1986).

Aujourd'hui, la part du creusement hypogène dans les vides souterrains en domaine calcaire apparaît de plus en plus significative : à la lumière de ces avancées, un nouveau regard s'impose, en particulier sur la question de la karstification primitive et sur les cavités reconnues par forage en zone noyée ou profonde.

<sup>5</sup> Hydrothermale : caractère d'une eau souterraine chaude riche en fluides minéralisés



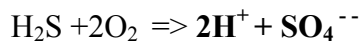
## B. Le processus de karstification hypogène

Lorsque des eaux transitent dans des couches géologiques à grande profondeur, elles sont soumises à des pressions et des températures importantes : le gradient géothermique général est en effet de 1°C / 33 m (c'est-à-dire que la température s'élève de un degré lorsqu'on descend de 33 mètres dans la croûte terrestre). Dans ces conditions physiques particulières, elles dissolvent dans les roches lessivées des gaz et des minéraux, notamment du gaz carbonique très présent dans les couches profondes de la croûte terrestre, des sulfures et des sulfates qui y sont fréquents. Lorsqu'elles arrivent en surface, ces eaux sont qualifiées d'« hydrothermales » en raison de leur température qui est généralement anormalement élevée.

Dans le cas où l'eau contient des composés soufrés, des bactéries archaïques, proches de celles qui colonisent les « fumeurs noirs » des dorsales océaniques, se développent dans les conduits profonds en milieu strictement anoxique<sup>6</sup>, aphotique<sup>7</sup>, et sous des températures élevées. Ces bactéries, dites chimiautotrophes<sup>8</sup> et sulfuréductrices<sup>9</sup>, vont réduire les sulfates en sulfures<sup>10</sup> et en sulfites<sup>11</sup>, en produisant notamment du sulfure d'hydrogène et du soufre natif.

Dans tous les cas, la pression baissant lors de la remontée de l'eau, les gaz dissous sont libérés, en particulier le gaz carbonique et le sulfure d'hydrogène. Le taux de H<sub>2</sub>S dans l'atmosphère des cavités actives connues peut atteindre dans certaines conditions de confinement des concentrations mortelles pour l'homme, de l'ordre de 120 parties par million (ppm), soit 120µg par gramme d'air.

Le sulfure d'hydrogène va entrer dans plusieurs boucles chimiques qui aboutissent à la production d'acide sulfurique ; basiquement, les formules sont toujours les mêmes :



(Hydrogène sulfuré + oxygène => acide sulfurique)

<sup>6</sup> Anoxique : où le taux d'oxygène est très réduit

<sup>7</sup> Aphotique : zone où ne pénètre aucune radiation solaire

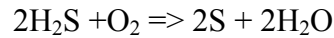
<sup>8</sup> Chimiautotrophe : qui produit de la matière vivante grâce à des ressources minérales et sans recours à la photosynthèse

<sup>9</sup> Sulfuréductrice : se dit des bactéries capables d'extraire métaboliquement de l'oxygène des sulfates, en les décomposant en sulfures, notamment d'hydrogène (H<sub>2</sub>S)

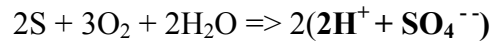
<sup>10</sup> Sulfure : soufre associé à un métal ou à un cation complexe, caractérisé par l'ion S<sup>-</sup>

<sup>11</sup> Sulfite : sel de l'acide sulfureux H<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>

Mais aussi

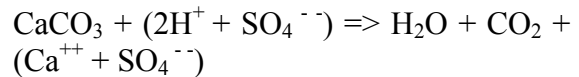


(Hydrogène sulfuré + oxygène => soufre élémentaire + eau), puis



(soufre élémentaire + oxygène + eau => acide sulfurique)

Cet acide dissout le calcaire et forme du gypse :



(Carbonate de calcium + acide sulfurique => eau + gaz carbonique + sulfate de calcium, c-a-d gypse)

Le gypse, très soluble, est éliminé par l'écoulement des eaux.

L'oxydation du sulfure d'hydrogène peut se faire simplement avec l'oxygène atmosphérique, ou avec l'oxygène dissous dans des apports d'eau de surface ; dans ce cas, le rôle radiochimique du Radon (gaz radioactif abondant dans les couches profondes de l'écorce terrestre) est évoqué par certains chercheurs (Dublyansky et Dublyansky 1998 – « The problem of condensation in karst studies », Journal of cave and karst studies 60 (1), p. 3-17) ; mais, même en l'absence d'oxygène libre, les sulfites peuvent réagir avec l'eau pour produire de l'acide sulfurique.

Enfin, des communautés de bactéries plus ou moins aérobies<sup>12</sup> présentes dans la tranche oxygénée du système hydrothermal effectuent la réduction des sulfates et l'oxydation des sulfures en produisant de l'acide sulfurique et de nombreux acides organiques, amplifiant localement le processus de corrosion. Ces colonies bactériennes, baptisées « snottites » par les chercheurs américains, se présentent dans les cavités actives connues (grotte de Villa Luz, Tabasco, Mexique) comme des amas organiques liés par une matrice visqueuse, collés sur les parois ou pendant des voûtes, distillant des gouttes extrêmement acides dont le pH est couramment inférieur à 3, parfois à 1.

À la base de cette chaîne biologique bien circonscrite par certains travaux (Barton &

<sup>12</sup> Aérobies : organisme vivant dont le métabolisme a besoin de l'oxygène

Luiszer 2005, Journal of cave and karst studies 67 (1), p. 28-38), une ressource en carbone métabolisable semble requise : elle est puisée soit dans des dépôts fossiles (hydrocarbures dans le cas de Lechuguilla), soit dans des substances organiques piégées dans des remplissages exogènes<sup>13</sup> récents.

<sup>13</sup> Exogène : dont l'origine est externe au système

À noter que la corrosion sulfurique du calcaire libre du gaz carbonique lequel, dissous dans l'eau, va produire à son tour un acide faible qui va élever encore le seuil de saturation de l'eau à l'égard du calcium, et ajouter une corrosion carbonique « classique » à la corrosion sulfurique.

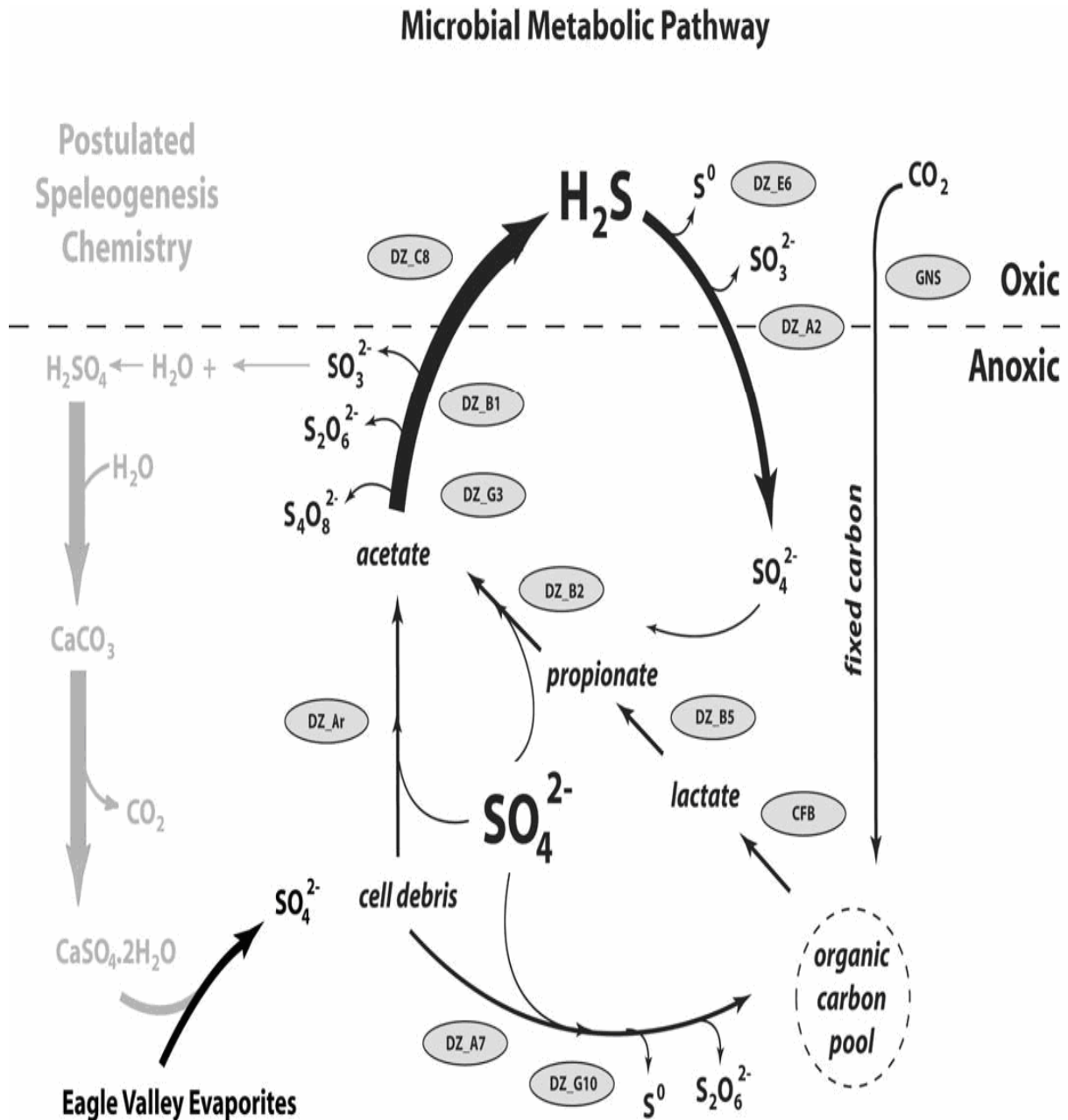


Fig. 1 : la chaîne biochimique sulfates, sulfures, sulfites et acide sulfurique (Barton & Luiszer 2005)

### C. Les indices de la karstification hypogène

La cavité hypogène active présente de nombreux traits caractéristiques liés à l'hydrochimie : comme on l'a vu, le plus souvent, les eaux hydrothermales sont relativement chaudes en raison de la profondeur dont elles proviennent et du gradient géothermique général ; elles dégazent activement, soit du gaz carbonique, soit du sulfure d'hydrogène à l'odeur caractéristique de boule puante, ce dégazage les rendant plus ou moins « pétillantes ».

Si l'eau a baigné en profondeur des évaporites<sup>14</sup>, elle va remonter un cortège, anormal en milieu carbonaté, de chlorures et surtout de sulfates et de sulfures, ces derniers jouant un rôle prépondérant dans la spéléogénèse hypogène et dans les remplissages que l'on trouvera dans la cavité (grandes quantités de gypse). En outre, l'eau sulfurée est souvent blanchâtre, parfois presque opaque. Certains auteurs attribuent cet aspect à du soufre natif en suspension (Hose & Pisarowicz 1999 - Cueva de Villa Luz, Tabasco, Mexico : reconnaissance study of an active sulfur spring cave and ecosysteme, Journal of cave and karst studies 61 (1), p. 14).

Dans le cas où la cavité est fossile, l'identification de l'origine hydrothermale de la cavité, moins immédiate, repose sur la convergence d'indices subtils et d'empreintes spécifiques que laisse la spéléogénèse hypogène :

- Indices structuraux : pour permettre la remontée de fluides profonds, il faut tout d'abord qu'existe une ou des discontinuités majeures affectant la couverture : de fait, la plupart des cavités hypogènes sont situées à proximité de failles importantes ou de grands linéaments.

Par ailleurs, la remontée des eaux profondes nécessite peu ou prou une configuration d'aquifère de type artésien, même si celui-ci, pas toujours aisé à comprendre quand la cavité est active, est d'autant plus difficile à identifier quand la cavité est fossile.

- Indices physiques : l'atmosphère d'une cavité hypogène semble souvent relativement chaude : en effet, dans les cavités épigènes, les écoulements des eaux de surface ont un effet climatique qui oblitère le gradient géothermique ; or, une cavité hypogène n'étant pas creusée par ces écoulements, le gradient géothermique y agit de façon plus directe.

- Indices minéralogiques : la remontée d'eaux ayant baigné des roches profondes, sous des températures

et des pressions importantes, s'accompagne dans les zones proches de la surface de phénomènes physico-chimiques et de minéralisations spécifiques.

Souvent, à grande profondeur et en contexte anoxique, en fonction de la minéralogie de l'aquifère, des ions ferreux et du manganèse sont mobilisés ; près de la surface, en raison du contact avec l'oxygène véhiculé par les eaux d'infiltration météorique, le manganèse et les ions ferreux s'oxydent et précipitent en oxydes de manganèse et oxyde ferrique, qui constituent des remplissages et des concrétions sans équivalent dans le karst « normal » ; d'autres minéraux plus rares, comme la galène (sulfure de plomb  $PbS_2$ ) par exemple, sont parfois déposés par les fluides hydrothermaux.



Fig. 2 : concrétions de goéthite (oxyde de fer) provenant d'une cavité hypogène du Vaucluse (Photo J-C d'A-N)

A grande profondeur également, l'eau peut se charger en gaz carbonique, lequel va permettre la mise en solution d'une grande quantité de carbonate de calcium : sous l'effet de la détente, le  $CO_2$  va dégazer et le carbonate de calcium précipiter en calcite, souvent formée en scalénoèdres de grandes dimensions très caractéristiques du milieu hydrothermal.

- Indices macromorphologiques : le fluide qui creuse la cavité hypogène du bas vers le haut passe « où il veut » et « où il peut » : elle est donc généralement anastomosée, labyrinthique.

La gravité n'étant pas le moteur mécanique de ce creusement, la verticale n'y est pas privilégiée : cette organisation générale se distingue donc radicalement du puit - méandre classique en karst « stricto sensu ».

<sup>14</sup> Evaporite : roche formée à la suite de l'évaporation de l'eau de mer



Contrairement à une cavité de karst alpin qui se structure autour de son chemin de drainage, sa hiérarchisation ne croît pas avec la profondeur.

- Indices mésomorphologiques : il est parfois possible d'identifier dans la cavité les points d'émission de fluides hydrothermaux, en général fissures ou conduits ascendants impénétrables.

La corrosion se produisant de façon concentrée à l'interface air/eau, où l'hydrogène sulfuré  $H_2S$  trouve de l'oxygène atmosphérique disponible pour s'oxyder en acide sulfurique  $H_2SO_4$ , la corrosion est importante au niveau de la surface de la nappe ; il s'en suit le creusement de profondes encoches de corrosion, donnant un profil de galeries horizontales très larges dans les parties basses, marquant le niveau de la nappe hydrothermale. Ces encoches de corrosion sont parfois développées à un point tel qu'elles taillent dans l'encaissant, autour des fissures ou conduits émissifs, de véritables salles au plancher strictement horizontal et plan.

Ces planchers sont parfois repris secondairement par des écoulements corrosifs qui les entaillent de

rigoles et de chenaux, formant dans ce cas de très caractéristiques « tables de corrosion » en roche massive (grotte de Villa Luz au Mexique, grotte des Serpents à Aix-les-bains). Parfois, une grande ressemblance de ces figures de corrosion (encoches et chenaux) avec des formes paragenétiques du karst épigène (banquettes d'érosion et trous de serrure), peut induire une interprétation erronée.

Enfin, une cavité hypogène recèle peu ou pas d'indices fluviokarstiques en rapport avec ses dimensions, tels que galets et remplissages fluviaux.

- Indices micromorphologiques : les plus caractéristiques sont des « lapiés de parois », rigoles profondément incisées en milieu exondé par les ruissellements ou égouttages de « jus bactériens » dont les pH sont couramment inférieurs à 3.

Typiques également sont les « bubble trails », chemins de bulles de gaz corrosifs en milieu noyé provoquant une corrosion localisée au long de leur ascension contre paroi.



Fig. 3 : calcite hydrothermale dans une cavité hypogène ardéchoise (Photo P. Deconinck)

## D. L’empreinte sulfurique dans la grotte du Chat

La grotte du Chat (coordonnées Lambert III 956,537 / 3201,859 / 940), cavité totalement isolée dans un secteur peu karstifié, est connue depuis au moins le XIX<sup>ème</sup> siècle. Ses quelques centaines de mètres de développement sans difficulté technique en font une course mineure au plan spéléologique, mais des générations de spéléologues y ont emmené les débutants se perdre dans sa zone labyrinthique, ce qui en fit en son temps une classique des Alpes Maritimes (elle est aujourd’hui d’accès soumis à autorisation de la mairie de Daluis).

Mais peut-être fut-elle, comme le chantait Reggiani, « trop souvent, mais trop mal aimée », car il faut attendre 1993 pour que Bruno Ducluzeaux mette en avant quelques-unes de ses singularités peu compatibles avec une karstification conventionnelle, et en vienne à suggérer un creusement lié à l’hydrothermalisme ; les travaux les plus récents éclairent plus pertinemment encore ces singularités étroitement apparentées aux indices génériques exposés dans le paragraphe précédent :

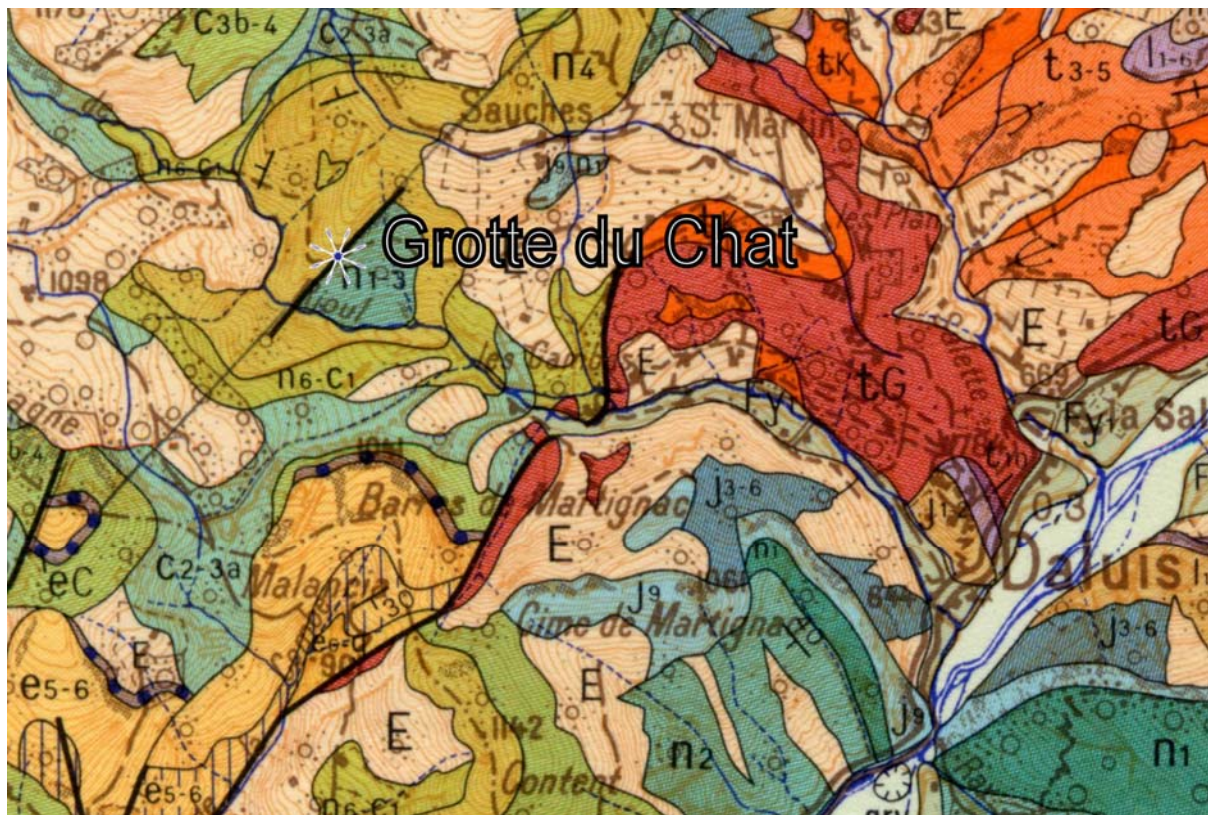


Fig. 4 : contexte géologique de la cavité (d’après la carte géologique, B.R.G.M.)

- Elle se situe au contact d’une faille appartenant à un faisceau satellite de l’arc de Castellane, bien visible en rive droite du Riou au droit du porche (voir détail sur la carte) ; bien que le contexte soit essentiellement crétacé, des évaporites du Trias et ses sulfates existent à proximité : le village de Daluis est bâti sur un diapir<sup>15</sup> de gypse (tG sur la carte). Les opportunités de remontées de fluides sulfatés existent donc.

- Elle se situe dans un lambeau de calcaire barrémien (n4 sur la carte géologique) d’une surface de l’ordre de 0,5 km<sup>2</sup>, environné de marnes et de marno-calcaires (sur la carte, n1-3 est le Néocomien marneux et n6-c1 le Cénomanién inférieur). Le relief ne se prêtant pas à l’organisation de drainages allochtones<sup>16</sup> alimentant ce minuscule karst, et aucun amont fluvio-karstique n’étant décelable ni dans la cavité, ni à l’extérieur,

<sup>15</sup> Diapir : extrusion à travers les couches géologiques superficielles de matériaux sous-jacentes relativement plastiques

<sup>16</sup> Allochtone : qui provient d’un autre endroit, par opposition à autochtone

on peut raisonnablement écarter l'hypothèse du karst binaire<sup>17</sup>.

Si on suppose ce karst unaire<sup>18</sup>, et en se référant au coefficient d'infiltration spécifique indiqué par E. Gilli pour les karsts méditerranéens ( $14 \text{ l.s}^{-1}/\text{km}^2$ ), sa surface collecte l'eau nécessaire pour alimenter un sourcilon de quelques  $\text{l.s}^{-1}$  à une dizaine de  $\text{l.s}^{-1}$  :

<sup>17</sup> Binaire : qualifie un karst alimenté par un impluvium en partie non karstique (imperméable ou cristallin par exemple), par opposition au karst unaire

<sup>18</sup> Unaire : qualifie un karst alimenté par un impluvium totalement karstique, par opposition à binaire

- Les galeries, remarquablement horizontales, (voir figure 12 infra) sont essentiellement développées au profit de diaclases bien visibles au sol (voir planche hors texte infra), dont les bords francs ne portent pas les traces d'érosion de type «méandre - puits» qui n'auraient pas manqué de se produire si ces fractures avaient participé à un drainage gravitaire ; les galeries présentent des sols de roche-mère parfaitement plans, et leurs parties basses sont invariablement très élargies, entaillées par une encoche de corrosion évidente. Certaines de ces galeries miment effectivement un banal profil paragénétique à banquettes, mais le gradient quasiment nul dans l'ensemble de la cavité (0,7%, nivellement Audra, Gilli et Nobécourt 23/04/06) ne peut guère expliquer les surcreusements vigoureux, qu'il faut donc imputer à des écoulements particulièrement corrosifs.

- Il existe dans la paroi Est de la galerie de Cessole un petit lapiaz de paroi aux rigoles très profondément incisées, qui ne peut résulter que de ruissellements très corrosifs ; il est environné de gypse renforçant l'évidence d'une corrosion sulfurique. Quoique discrète, cette forme pariétale de la grotte du Chat est probablement le plus bel exemple, peut-être le seul, de lapiaz sulfurique connu en France à ce jour.

dans un processus karstique habituel, cela semble très au-dessous des dimensions du conduit.

En dépit de la dimension de ses conduits, la grotte ne contient pas le moindre galet ou dépôt fluvialite, les remplissages étant réduits à quelques fins enduits d'argile claire ou grise issue de l'altération des marnes.

Pas d'amont, pas d'eau, pas de remplissages : dans ces conditions, la karstification épigène paraît pour le moins improbable.



Fig. 5 : profil caractéristique de galerie dans le Labyrinthe (Photo J-Y Bigot 2005)



Fig. 6 : rigoles sulfuriques pariétales dans la galerie de Cessole (Photo J-C d'A-N)

- Dans la salle des Santons, les planchers rocheux sont entaillés en superbes tables de corrosion. Ces tables de corrosion sont associées à de spectaculaires encoches latérales et profondément entaillées de chenaux, signant de vigoureux processus corrosifs. Les chenaux sont guidés par des fissures ne présentant aucun stigmate de fonctionnement en perte, donc émissives. Cette salle est dans la grotte le lieu où les apports



Fig. 7 : la salle des Santons ; les personnages se tiennent sur les tables de corrosion (photo Ludovic Mocochain)

hypogènes furent probablement les plus massifs (calibre des fissures au sol) et où la corrosion sulfurique fut la plus intense (volume de la salle, calibre des chenaux et des encoches). Nous retrouvons ici une caractéristique morphologique essentielle des grottes hydrothermales (grotte de Villa Luz au Mexique, grotte des Serpents à Aix-les-bains).

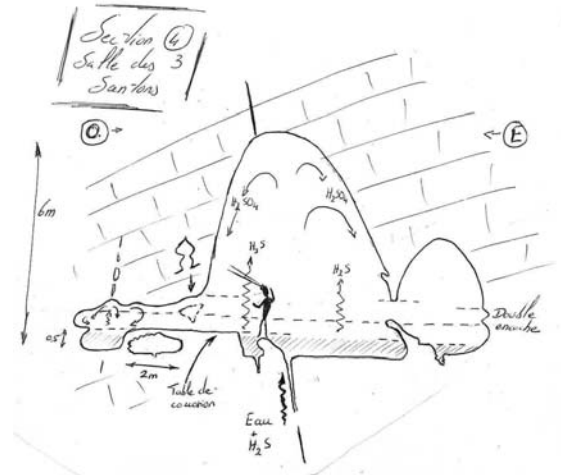


Fig. 8 : schéma fonctionnel de la salle des Santons (dessin Philippe Audra, Octobre 2005)

- On identifie sans difficultés dans la grotte du Chat des encroûtements de gypse, disséminés dans toute la cavité mais localement très significatifs (centimétriques) : voir la répartition des dépôts dans la figure 10 infra, réalisée dans le cadre du stage.



Fig. 9 : encroûtements et crose de gypse dans la grotte du Chat (Photo J-Y Bigot)

Enfin, nulle part dans la cavité on ne relève de galets ou remplissages sableux ou argileux notables, nous serions donc bien en peine de présenter des photos sur cette classe d'observations...

L'ensemble de ces indices suggère effectivement un creusement non pas épigène, mais causé par la remontée, le long de la faille et à la faveur des fractures de la barre calcaire, d'eaux profondes ayant mobilisé des sulfates évaporitiques du Trias marginal au dôme de pélites permienes de Barrot : ces apports hydrothermaux alimentant un processus de corrosion sulfurique suivant une organisation

typique de galeries horizontales marquant le sommet de la zone noyée, avec leurs tables et leurs encoches de corrosion.

Quoique ce faisceau d'arguments soit très convergent, sa valeur serait discutable si la présence, en contrebas de la grotte, à son aplomb exact et dans la même dalle redressée de calcaire barrémien, d'une source sulfureuse active et de niveaux fossiles qui lui sont associés n'en certifiât de façon indiscutable (et odorante...) l'origine hydrothermale ; cet ensemble fait de la grotte du Chat un exemple majeur parmi les quelques cavités hypogènes avérées en France.

Dans ce contexte, les objectifs du stage régional « Equipier scientifique » 2006 sont :

- proposer une ouverture didactique sur cet aspect peu connu de la spéléogénèse qu'est la corrosion sulfurique ;

- conforter, par toute approche scientifique que l'on jugera appropriée les différents caractères spécifiques au creusement hypogène proposés par la grotte du Chat, le sujet étant pour l'heure incomplètement exploré. Du point de vue méthodologique, ceci constitue une mise en situation réelle de recherche pluridisciplinaire.

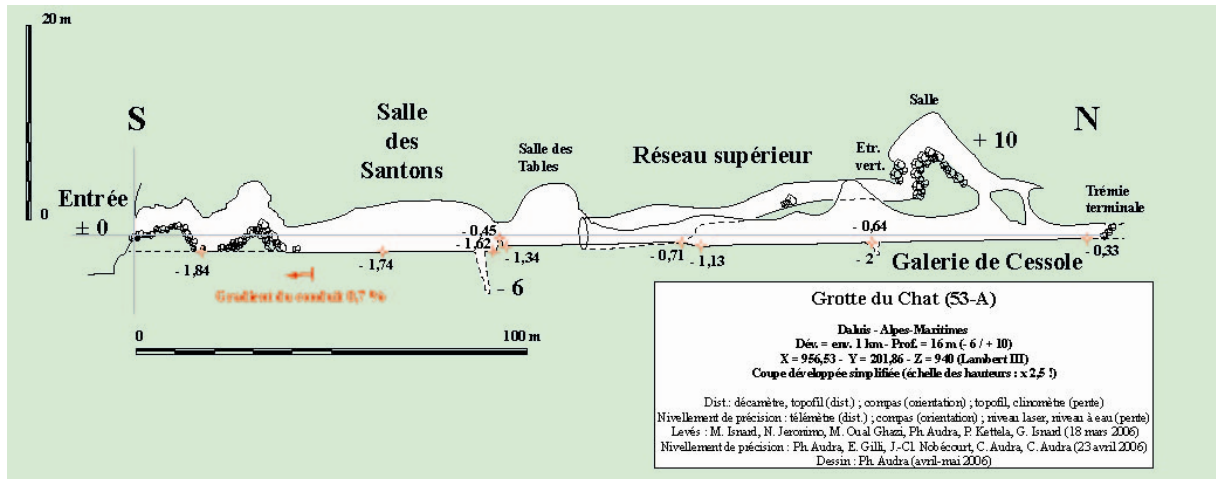


Fig. 10 : profil en long et nivellement de la grotte du Chat (dessin Ph. Audra)

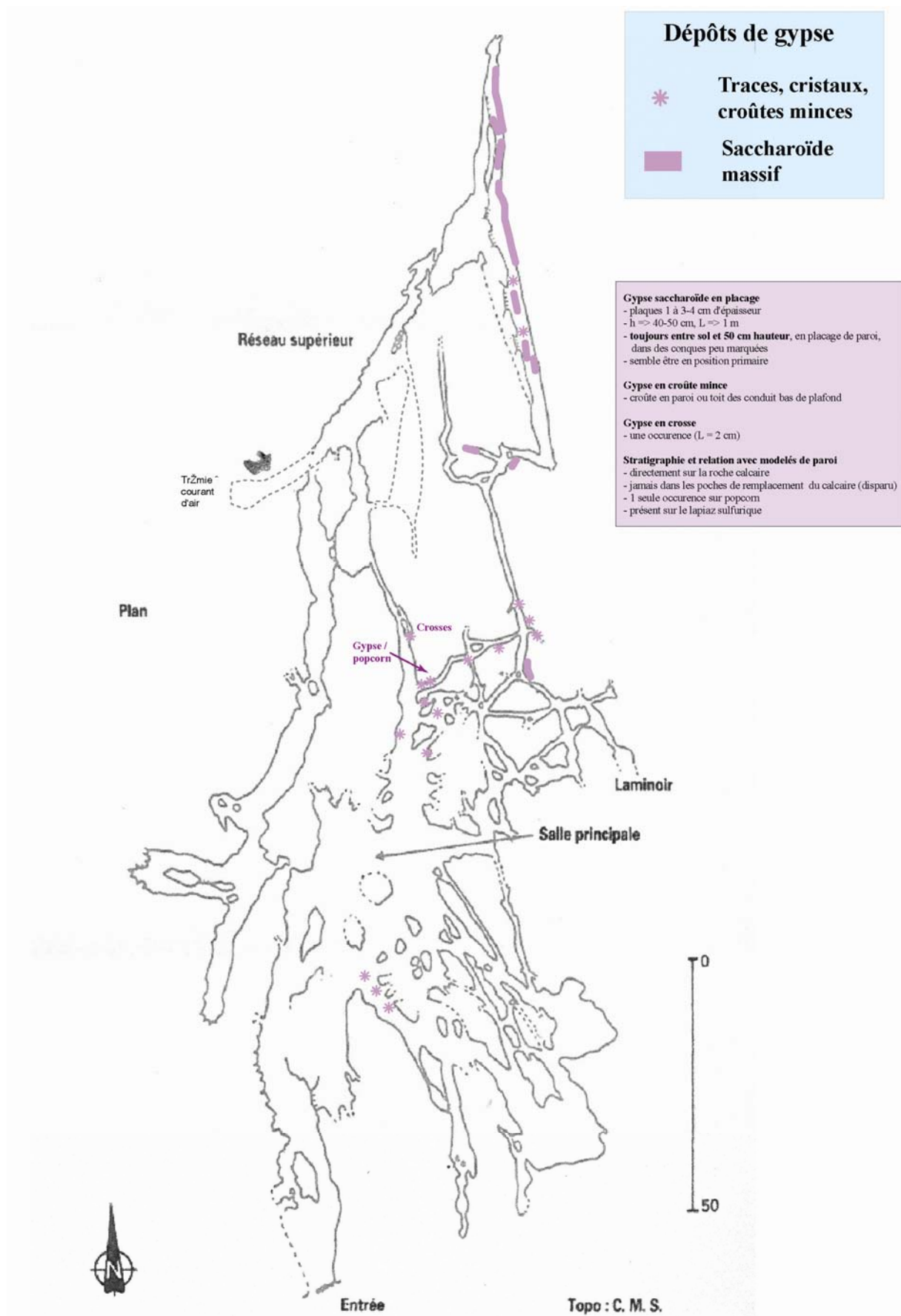


Fig. 11 : répartition des témoins de gypse dans la grotte du Chat (Schéma Ph. Audra avec levés des stagiaires sur topo M..Rousseau, C.M.S.)

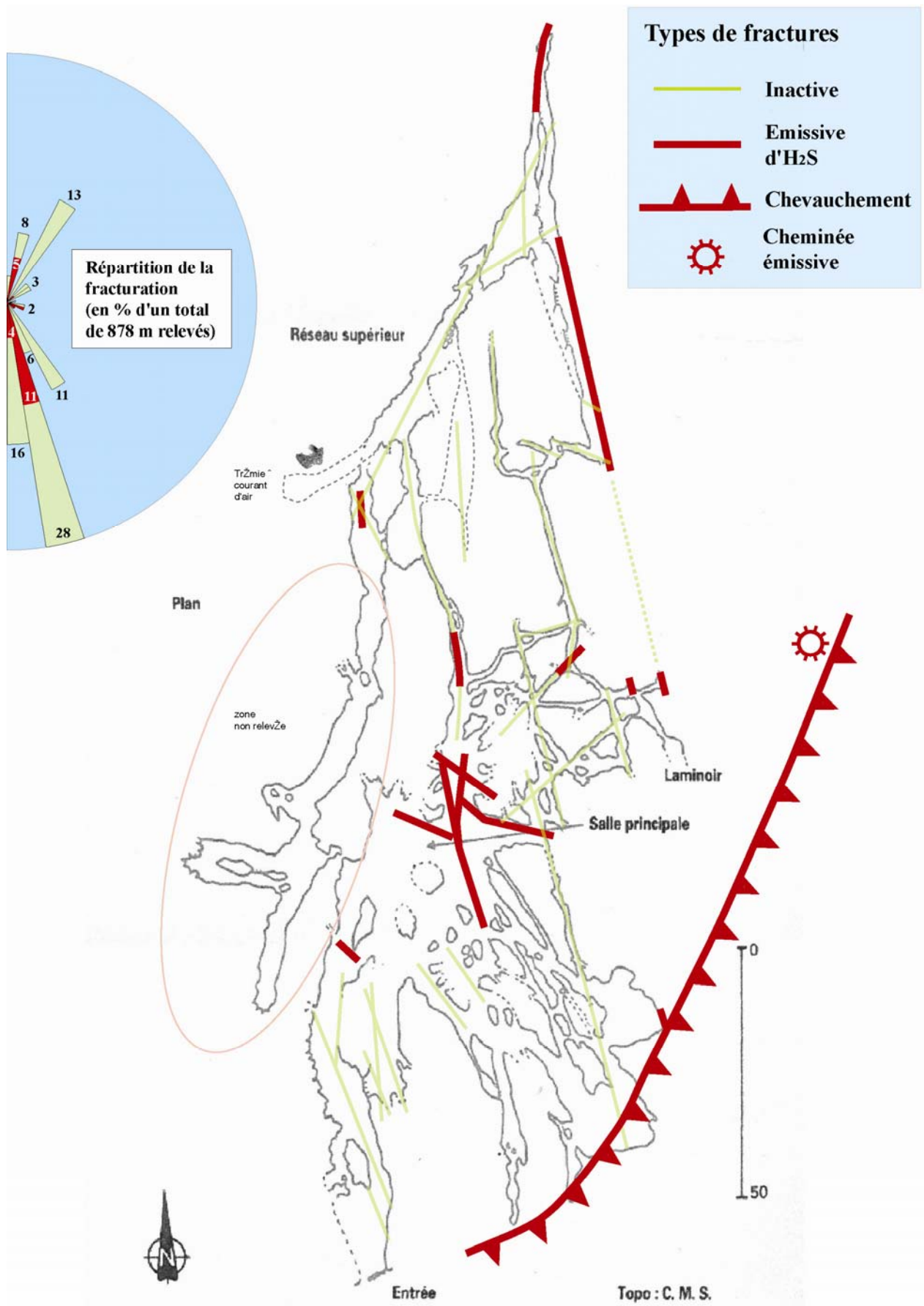


Fig. 12 : la fracturation dans la grotte du Chat (schéma Ph. Audra sur topo C.M.S.)

### III. IL ETAIT UNE FOIS DANS LE SUD-EST

Aux confins des Alpes et de la Haute-Provence, une gare minuscule et déserte isolée dans la grisaille d'un hiver qui s'attarde... Des volutes de brumes froides s'accrochent aux collines ; au bord d'un quai désert, trois hommes vêtus d'amples pardessus qui ont connu toutes les intempéries, barbus, moustachus, cheveux rebelles essayant sans broncher une bruine hésitante, attendent en fixant les quatre rails rouillés.

De loin en loin, un chien rompt le silence, et, dans un enclos tout proche, un cheval Appaloosa, sentant les étrangers, renâcle et hennit ; depuis bien longtemps, personne n'ouvre plus les portes et les fenêtres du bâtiment décrépi, mais derrière les volets écaillés on sent des regards furtifs posés sur les trois hommes. L'un d'eux rallume un moignon de cigarette roulée, un autre regarde sa montre : midi ne tardera plus à sonner au clocher du hameau, s'il y reste des cloches et un sonneur. Mais tous trois savent qu'avec ou sans bedeau, pour eux, l'heure de l'action sonnera bientôt.

Soudain, venant du Nord, un sifflement : le train des Pignes apparaît entre deux collines à l'horizon, et décrit laborieusement d'interminables virages avant d'arrêter ses deux wagons d'un bleu passé devant le quai d'en face ; dans la sécurité des voitures bien closes, des visages sans âge regardent avec défiance les trois hommes. Nul ne bouge, on n'entend plus que le halètement poussif de la motrice. Puis, lentement, le train se remet en mouvement et s'arrache péniblement de la station ; immobile sur le quai opposé, un homme en vêtements sombres fait maintenant face silencieusement aux trois hommes.

Leurs regards se croisent ; pendant d'interminables secondes, ils se dévisagent. L'étranger savait que son destin l'attendait dans cette gare, et il est venu de loin pour l'affronter : à cet instant, pour lui, le temps ne compte pas. Le silence est opaque ; l'un des trois hommes jette nerveusement sa cigarette et se redresse lentement : à tout moment, c'est sûr, une trompette plaintive va déchirer le silence d'une mélodie lancinante, et, inévitablement, au bout de la mélodie, la poudre parlera.

L'un des trois étrangers interpelle alors le voyageur : « Salut, tu dois être l'étudiant qui vient l'Université Paris VIII ? On est les spéléos du stage régional « Equipier Scientifique » dans la Grotte du Chat, allez, viens, on est déjà tous sur le terrain ! ». C'est exactement comme ça qu'il est arrivé au stage, Moustapha, je n'ai rien inventé, tout est authentique. Même le cheval.





## A. Samedi 18 Mars 2006 au matin : in the Far East

Le petit parking du pont de la Manda, sur la nationale 202 : incontournable lieu de rendez-vous des randonneurs, cyclistes, canyonnistes et autres week-end gangs... Et en cette occasion, des spéléostagiaires, avec pour objectif du travail dans une région du département spéléologiquement bien déshéritée... Samedi 18 Mars à 8 heures et demie pétantes, nous débarquons là, Philippe Audra et moi : Pierka est déjà là, avec Fabien et Tristan à bord de son 4x4. Salutations, présentations, et soudain mobile sonations : Michel ; il arrive, Michel, il n'est plus très loin, il ne sera pas vraiment en retard, ou alors pas beaucoup. Au fait, tu as pris le vidéo projecteur ? Pas de vidéo projecteur ? Aïe... Du powerpoint à quinze personnes sur un écran de portable, ça risque d'être assez limite...

Philippe décide derechef d'aller chercher son engin familial, celui avec lequel il passe d'habitude les photos de ses vacances à Melun (prononcez « méloune », ça doit forcément être en Papouasie Nouvelle Guinée ou quelque chose comme ça) ; aussitôt, nous remontons dans ma fougueuse Volkswagen Polo gazoil de 1991, et, avec l'élégance (y compris verbale) d'Olivier de Kersauzon et du capitaine Haddock qui se feraient les Quarantièmes à bord d'un 420, nous re-gravissons la colline du Broc (toponyme à valeur vachement oronymique comme dirait Jean-Yves) ; de sorte que c'est pas plus tard qu'à 9 heures et des broques (là, ce n'est pas un oronyme) que nous sommes de retour à la Manda.

Nuño est arrivé, Michel et Ana aussi, mais pas encore Bruno et Cathy. Guillaume est avec eux. Un autre coup de mobile (mais comment on faisait avant ?) : Bruno a loupé la Manda, il est sur la 202, Bruno, mais plus loin. Jean-Yves et Ludo nous attendent à Entrevaux, Eric Gilli nous rejoint à midi avec son étudiant de Paris : on peut donc y aller.

On va y aller, d'accord ; mais on va op-ti-mi-ser : huit personnes, normalement ça tient dans deux voitures, non ? Normalement, oui ; des spéléos aussi, mais pas vraiment normalement : car le spéléo a beau s'ingénier à équiper « light », pour autant il voyage rarement léger... Philippe et moi chargeons donc nos fourbis respectifs dans la voiture de Michel (laquelle n'attendait pas nos contributions pour être déjà ras la gueule), et nous nous faufilons dans les interstices. Du coup, ledit Renault Express se transforme en une sorte de machine à la Dubout, hantée par quelques personnages en majorité hirsutes et ébouriffés (la minorité c'est Ana) au milieu d'un extraordinaire bric-à-brac de sacs de toutes formes et de couleur

souvent indécidable, de caisses et de bidons. Au milieu de ce Capharnaüm, se baladant d'un ballot à l'autre, très à l'aise, comme dans son élément : le chien de Ana, qui dans mon souvenir s'appelle Czwrctiegrda mais j'aurais peut-être mieux fait de le noter sur le moment.

Donc, en route maintenant vers les Alpes de Haute Provence ! Vu l'heure et le temps (nuages et grisaille, pluie prévue dans l'après-midi, neige à partir de 1100 mètres), nous décidons de zapper le rendez-vous au Pont Noir d'Entrevaux et le belvédère de Sumaure, duquel on ne doit pas belvédérer grand-chose de géomorphologique aujourd'hui. Un coup de mobile à Ludo (purée, mais comment on faisait avant ?), et on file tous en direction de Saint Benoît et de ses marnes priabonniennes. C'est là que le stage commença vraiment.

Nous arrivons tous ensemble (ou presque, il manque encore Eric Gilli et son étudiant de Paris) dans le cœur du synclinal de la Lare, à Saint Benoît (Alpes de Haute Provence, mais presque Maritimes quand même) vers 10 heures et demie. L'objectif est d'aller observer d'anciennes cheminées hydrothermales perdues dans les badlands, préambule qui pose bien la problématique du stage.

Nous nous rendons en troupeau dans les roubines pentues, persillées de filons de calcite blanche ; celle-là, amorphe ou se débitant parfois en gros rhomboédres, provient de la minéralisation lente de fractures de l'encaissant, et ne nous intéresse pas.



Fig. 13 : bande de géographes en goguette dans les roubines  
(Photo J-C d'A-N)

Tout en escaladant les versants, Philippe commente le contexte géologique et son impact dans les paysages : flanc nummulitique du synclinal marqué

par la barre redressée de la Lare, cœur priabonien de marnes sur lesquelles nous marchons et sur lesquelles est édifié le petit village de Saint Benoît, au loin les barres de grès d'Annot, et, plus près, une paléo-vallée comblée de colluvions gréseuses. Bientôt, au milieu des marnes molles, nous tombons sur un premier bloc sombre et patiné, indéniablement constitué de cette calcite palissadique que nous connaissons si bien dans les spéléothèmes en milieu karstique : de l'eau saturée en carbonates a circulé par ici, et a précipité son calcaire. Philippe nous certifie que la cheminée n'est plus très loin : faut juste grimper un peu...



Fig. 14 : grimper un peu, qu'y disait... (Photo Catherine Baby)

Et on la trouve effectivement, cette cheminée hydrothermale :



Fig. 15 : la cheminée hydrothermale (Photo J-Y Bigot)

Une large fissure verticale dans les marnes, aux épontes moulées de concrétion de calcite mise en saillie par l'érosion différentielle qui a balayé les tendres marnes bleues... Il y avait ici une source artésienne, dégueulant une eau venue des profondeurs où elle avait dissous force  $\text{CO}_2$  (loi de Henry) et force ions  $\text{Ca}^{++}$ ; la pression hydrostatique baissant au cours de son ascension, elle dégazait son  $\text{CO}_2$  (loi de Henry toujours), ce qui basculait l'équilibre des hydrogénocarbonates vers la précipitation des carbonates, et la voilà, cette calcite qui cristallisait dans ce conduit insolite... De quelle profondeur elle venait cette eau ? Quand est-ce que ça a fonctionné cette affaire-là ? Mystère. Mais ça a existé. Premières approches, premières réflexions sur l'hydrothermalisme et les remontées de fluides profonds... Le ton est donné, on peut maintenant se tourner vers Daluis et la grotte du Chat : nous en prenons la route à 11 heures et demie.

Un petit coup de fil (pourquoi on dit ça quand on utilise un mobile ? Et puis d'abord, comment on faisait avant ?) à Eric Gilli qui doit nous rejoindre à Daluis, et qui nous dit qu'il n'est pas encore tout à fait là, qu'il doit aller chercher son étudiant Moustapha à la « gare » (sic !) du Fugeret. Nous ne sommes qu'à quelques kilomètres et quelques minutes de l'arrivée du train des Pignes : c'est donc Philippe, Michel et moi qui iront chercher Moustapha à la gare, dans l'ambiance très Sergio Leonesque que je vous ai racontée juste avant...

Nous dénichons dans l'Express de Michel un ultime interstice pour loger Moustapha (qui, après avoir pris successivement le TGV et le train des Pignes, doit commencer à se demander sérieusement jusqu'où on peut tomber dans l'inconfort), et en route pour la vallée du Var.

Nous arrivons en vue du parking municipal de Daluis (huit places) à l'heure du pique-nique ; du reste, l'ensemble de l'équipe, qui est arrivé depuis un moment, s'est jeté dans des agapes au sens spéléologique du terme : saucissons divers, force fromages plus ou moins odorants, 12°5 grand teint sinon grand cru ; c'est à la fin de ce festin, moment stratégique, que Philippe a sorti sa botte secrète : la VULNERAIRE !

*La vulnérable est une plante de haute montagne poussant en Chartreuse, aux incomparables vertus médicinales dès lors qu'elle macère dans un alcool à 40° avec un peu de sucre mais pas trop. Elle est souveraine contre des tas de choses qu'on n'aimerait pas attraper, du coup, il vaut mieux en boire avant d'être malade. Est-il utile de préciser que, durant ce stage, personne n'a été malade ?*

Il faisait donc chaud dans les cœurs, mais en revanche dehors ça ne s'arrangeait pas : il commençait à pleuvioter par moments ; la météo avait prévu une dégradation dans l'après-midi, et nous avions du travail de terrain en extérieur : les cadres ont donc sonné le branle-bas, et on a décidé de... De quoi ? D'OPTIMISER LES VOITURES ? Philippe, Moustapha, Michel, Ana, Czwrgrtiegrda et moi on passe notre tour : on va cash à la grotte avec l'Express et on prend personne. En particulier, pas Guillaume. J'me comprends.

C'est à ce moment-là qu'arrive Eric avec son Patrol ; très logiquement, et à vrai dire un peu naïvement, il charge Guillaume. Ces quelques kilomètres seront pour lui une expérience enrichissante, dont il ressortira grandi, mais aussi profondément marqué et étrangement mutique. Au cours du week-end, il réussira à ne pas renouveler l'opération, et aura ainsi l'occasion de rouler en entendant à nouveau son moteur.

## **B. Samedi après-midi : on donne sa langue au Chat**

L'objectif de cette première séance à la grotte du Chat était de planter la problématique de la corrosion sulfurique. Pour cela, il fallait nécessairement en passer par une visite à la source sulfureuse associée. Pour des raisons basement météorologiques, cette visite qui aurait dû logiquement trouver sa place après avoir vu la grotte et ses spécificités, a été organisée en début d'après-midi.

Chacun a descendu comme il a pu, à travers les bartasses, le versant abrupt de calcaires barrémiens colonisé par les buis et les genêts, jusqu'au Riou près de cent mètres en contrebas de la piste et de la grotte. La source était toujours là, tiédasse, fleurant le sulfure d'hydrogène, tapissée de filaments bactériens blancs : il est évident que celle-ci n'est pas comme n'importe quelle autre source, mais Philippe, Jean-Yves et Jean-Claude en précisent les points principaux. Eric Gilli mesure température et conductivité de la source et du torrent, puis nous

remontons par le contact calcaire/marnes pour voir les conduits fossiles signalés par Philippe.

En fait, nous comprenons en grim pant jusqu'à la grotte qu'il y en a à tous les niveaux dans le versant.

De retour devant l'entrée de la grotte, nous nous équipons sommairement, puis nous nous organisons en trois groupes emmenés par Philippe, Jean-Yves et par moi-même, pour une approche préliminaire des caractéristiques spécifiques de la grotte du Chat : la morphologie des galeries, la géométrie des vides, la présence de tables rocheuses, de fissures corrodées au sol et de formes pariétales (« cupolettes ») insolites rendent la grotte dépaysante. Les trois groupes vont découvrir ce contexte non conventionnel durant toute l'après-midi, s'égayeront progressivement dans l'ensemble de la cavité, et finiront par sortir par petits paquets en fin d'après-midi.



*Fig. 16 : un conduit fossile 9 mètres au-dessus de la source  
(Photo J-Y Bigot)*



*Fig. 17 : profil caractéristique dans la galerie de Cessole :  
fissure émissive entaillant un bed-rock aplani et large encoche  
de corrosion à la base du conduit (Photo J-Y Bigot)*



Fig. 18 : des concrétionnements spécifiques en position parfois paradoxale (Photo J-Y Bigot)



Fig. 19 : paroi perforée de « cupulettes » (Photo Catherine Baby)

### C. Samedi soir : le retour du Chat

Peu après 17 heures, Philippe, Michel, Ana et moi quittons Daluis et filons à bord du Renault Dubout vers le gîte Saint Pierre au Fugeret, pour préparer la première conférence de la soirée, celle de Laurent Camera. Laurent, doctorant en géologie, consacre sa thèse au Messinien dans l'Est du bassin méditerranéen (ce qui devrait émoustiller Ludo) ; mais il est surtout un enfant du pays entre Var et Vaire et connaît donc en détail la géologie du secteur, qu'il va nous présenter.

Laurent arrive au gîte en même temps que nous, à 17h50, mais les gérants n'étant pas encore arrivés pour régler les formalités d'installation, nous allons dans la plus pure tradition spéléologique au bar du coin faire les présentations. Une bière et quart après, tout est réglé, nous pouvons investir la salle de restaurant du gîte et, sans ambages, l'aménager à notre sauce : réorganisation des tables, de la déco murale, et déballage d'une quantité significative de documentations, de portables, plus le vidéo projecteur de Philippe. Petit souci : Philippe a confondu le câble d'alim du vidéoproj avec celui de son rasoir électrique (que, circonstance atténuante, il connaît fort mal, en ayant rarement l'usage). Michel dégainé immédiatement le câble de son portable Acer, qui, par chance, fait, comme on dit, la rue Michel : le Powerpoint de 600 Mo (!) de Laurent pourra donc être projeté avec la dimension adéquate.

Pendant que nous réglons ces petits attermoissements techniques, les stagiaires font le point sur les activités de la journée.



Fig. 20 : la journée n'est pas terminée... (Photo J-C d'A-N)

Une fois tout installé et l'auditoire réuni, vers 19 heures, Laurent commence son intervention qui durera une heure ; pour comprendre la genèse du dôme de pélites permienes de Barrot et de son auréole carbonatée, la paléogéographie régionale au Permien est détaillée, l'importance dans les paysages actuels de la barre de conglomérats transgressifs werféniens est mise en évidence, et la présence dans son auréole d'une séquence sédimentaire triasique comportant des gypses (dont le diapir du village de Daluis est un bel exemple) est expliquée.

À la fin de cette conférence d'un excellent niveau (à telle enseigne que certains stagiaires avouent avoir été par moments quelque peu distancés) Gilbert Mari, notre second conférencier, bien connu chez les minéralogistes pour avoir découvert dans le dôme de Barrot une demi-douzaine de minéralisations du cuivre inconnues à ce jour, arrive au gîte.

Même si celle de Laurent préparait celle de Gilbert, enchaîner sans pause sur une seconde communication serait un peu ambitieux, et puis il commence à faire faim... Laurent Camera doit s'en retourner vers la vallée de la Roudoule et ne peut se joindre à nous, mais Gilbert Mari et son épouse s'installent à notre grande tablée.

Après un vrai dîner de congrès raisonnablement arrosé, Gilbert commence à 21 heures 30 à dérouler un diaporama argentique qu'il a naturellement pointé sur les minéralisations cuprifères du dôme de Barrot. Les premières photos présentées montrent des galeries de la mine du Cerisier, à Léouvé (vallée de la Roudoule), riches de stalactites et de gours d'un vert extraordinaire ; des concrétions, des personnages bottés, en combi, portant casque et

luminaire, cordes lovées à l'épaule : une ambiance spéléo assez inattendue chez des minéralogistes ; à la couleur des concrétions près, nous nous sentons un peu chez nous. Les diapos suivantes montrent le site des mines de Roua, accessible aux agrès et particulièrement aérien : là aussi, nous nous sentons un peu entre collègues avec les minéralogistes. Puis se sont succédées des photos particulièrement spectaculaires des minéraux rares, voire exclusifs, de Roua.

Après cette passionnante conférence d'une heure servie par un orateur remarquable, qui a fait l'admiration unanime des stagiaires et des cadres, nous pouvions songer à rejoindre les bras de Morphée, bien plus tentants il faut le dire que ceux trop velus de la plupart des stagiaires...

## D. Dimanche 19 Mars : le Chat II

Le lendemain matin à 8 heures 30, tout le monde est assez bien réveillé devant le petit dej. On est Dimanche : l'office de 9 heures 30 est célébré par le Père Ludovic, qui, pour nous mettre en forme, enfourche son cheval de bataille et nous gratifie d'un prêche magistral en format PPS sur l'empreinte messinienne dans le karst ardéchois, avec notamment la formation des puits-cheminée et les recoupements de méandres.



Fig. 21 : Célébration du *Mystère de la Sainte Régression* (Photo J-C d'A-N)

« Ite, Messinien est » : nous pouvons maintenant prendre la route pour aller sur le terrain, et arrivons comme de par hasard à l'heure de l'apéro à la grotte du Chat, où paradoxalement il fait un temps de chien. Malgré cela, nous pique-niquons dehors, nos

isothermies internes étant confortées par un peu de textile et pas mal de Vulnéraire, puis organisons les équipes et les ateliers : deux équipes topo en bouclage (une par la galerie Ouest avec Philippe Audra, Guillaume Isnard et Pierre Kettela, une par la galerie de Cessole avec Michel Isnard, Nuño Jeronimo et Moustapha), une équipe morphométrie des cupolettes (Jean-Claude, Fabien Gandon, Tristan Charles), une équipe photo et localisation de concrétions en popcorn (Jean-Yves Bigot, Ludovic Mocochain, Catherine Baby, Bruno Scanu).

Une grande masse d'observations intéressantes a été collectée durant l'après-midi, qu'il faudra synthétiser dans la semaine, en particulier sur le positionnement des popcorn et sur les cupolettes. Eric Gilli scotche même l'assemblée en déclarant qu'il y a dans la zone d'entrée de la grotte quelques indices imputables à des fracas glaciaires. Etonnant, mais bon, les englacements dans le karst, c'est incontestablement une des spécialités d'Eric, alors...

Nous sortons à l'air libre vers 17 heures ; les non locaux prennent derechef la route (« Nous, on n'est pas d'ici »), les locaux aussi mais leur route à eux s'arrête devant une bière à Entrevaux (« Y fait soif dans ce trou »).

Et donc, à la semaine prochaine !

## E. Samedi 25 Mars : le Chat frappe toujours deux fois

Parfois, de tristes évènements bousculent les organisations les mieux préparées ; Samedi matin, l'heure n'était pas à la science, mais au soutien pour un ami de tous frappé par une dramatique fatalité.

C'est pourquoi nous ne nous retrouvons devant l'entrée de la grotte du Chat, cadres et stagiaires, qu'à 13 heures. Nous pique-niquons devant un soleil radieux qui transforme radicalement le paysage morne et vaguement hostile de la semaine dernière. En plus, il reste de la Vulnéraire.

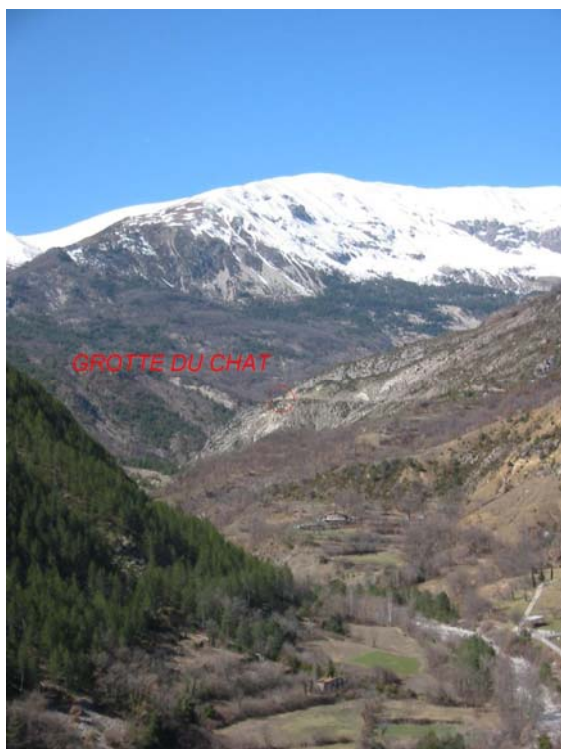


Fig. 22 : c'est pas plus beau comme ça ? (Photo J-C d'A-N)

Puis nous organisons la séance : l'objectif est de compléter ou de confirmer les vues du week-end dernier, aussi le travail se fera dans une optique très pluridisciplinaire, ou chacun participera à différentes activités au fil des opportunités et de l'évolution des ateliers : cupolettes, popcorns, gypse, morphologies de conduits, ont été revus, photographiés et cartographiés, de nouvelles observations viendront lever des incertitudes sur certains concrétionnements.



Fig. 23 : ça observe sérieux... (Photo Catherine Baby)

À la faveur du beau temps, une équipe est impliquée sur un nouvel atelier, très « club Mickey » : le jaugeage de la source hydrothermale (Jean-Claude, Guillaume Isnard et Eric Madelaine). Les paléo-conduits au contact calcaire/marnes ont également été cotés à l'altimètre.

Au fur et à mesure de la clôture des ateliers, nous retournons au gîte en ordre dispersé. Après un, deux, trois Ricard et un repas toujours aussi sympa, nous investissons un grand dortoir non pas pour y pioncer, mais au contraire pour y installer notre salle de travail ; les ordinateurs portables éclosent sur la table, un drap étendu sur un porte-cintres fait un écran tout à fait convenable pour un vidéo projecteur (muni du câble qui va bien).

La soirée sera consacrée à visionner des diaporamas commentés par Philippe Audra, et consacrés entre autres à la grotte hydrothermale active de Villa Luz au Mexique, et aux cavités hypogènes de Viviers en Ardèche avec leurs extraordinaires scalénoèdres de calcite hydrothermale.

Mais la journée a été longue, et le canapé est si confortable... Est-ce la vocation première du local, le bon repas ou le doux ronron karstologique qui fait son effet ? Les muscles se détendent, les corps s'avachissent, les respirations deviennent lentes et profondes... Le combat risque à tout moment de cesser faute de combattants, aussi est-il plus sage de remettre la suite du travail au lendemain...

## F. Dimanche 26 Mars : le Chat se rebiffe

Dimanche matin : le Père Ludo n'étant pas là, l'office sera célébré après les matines par le Père Audra, qui nous présentera le diaporama sur la grotte du Chat en tant que cavité hydrothermale, présenté en Janvier dernier à l'Association Française de Karstologie par Audra, Bigot et Nobécourt ; suit un autre Powerpoint concernant la grotte de Saint Benoît où nous nous rendrons cette après-midi, qui a été présenté en Janvier 2005 à l'A.F.K. par Audra et Bigot.

Mais avant le réconfort, l'effort : séance de travail en salle, genre Bénédictins (et non pas Trappistes, puisqu'il y avait Guillaume). Pendant que Fabien et Jean-Claude planchent sur les statistiques de tranches de population de cupolettes, Jean-Yves décortique l'article de Yuri V. Dublyansky et Serguei E. Pashenko : « Cave Popcorn – An Aerosol Speleothem ? » (1997) que Philippe lui a jeté en pâture : Jean-Yves raccorde immédiatement les concepts qui y sont décrits avec les observations de son équipe dans la grotte du Chat.



Fig. 24 : ça gratte sérieux... (Photo J-C d'A-N)

Pendant ce temps, Eric Madelaine essaie de dompter à grands coups de lignes de commande le logiciel topo slovaque Thérion, dans lequel, grâce à nos levés topo, la grotte du Chat devrait théoriquement prendre une forme vectorielle en 3 dimensions. Mais ni Thérion ni le Chat ne sont très coopératifs... Il faudra encore y bosser un peu.

Après le travail en salle et les Powerpoint, il est temps de rendre le gîte. Nous levons le camp et ripons vers Saint Benoît, qui de la sorte fera l'ouverture et le clôturage du stage, et où nous arrivons à l'heure du ? Ben oui, pique-nique.

Après avoir mangé au pied de la barre nummulitique redressée de la Lare, qui draine de façon occulte ce karst original et où s'ouvrent toutes les cavités du secteur, nous allons en guise de

promenade digestive faire la connaissance des quatre émergences connues du système dont la grotte de Saint Benoît est un étage fossile. Les sources Fontani et du Tala-borgne coulent normalement, ainsi que le petit griffon pérenne qui se trouve dans le lit même du ruisseau de Couguille ; mais le trou du Bœuf, qui avait été vu exondé et pénétrable deux semaines plus tôt, est plein d'eau ras la gueule : manifestement, il a cessé de résurger il y a très peu de temps. Philippe explique son fonctionnement en estavelle. Bon, OK, on va sous terre maintenant ?

Nous nous en retournons aux voitures pour nous équiper, et constituons de petits groupes pour faire la marche d'approche, relativement aérienne à proximité du porche de la grotte qui surplombe de 90 mètres la route, le Coulomp et le pont de la Reine Jeanne.



Fig. 25 : le Coulomp et le pont médiéval de la reine Jeanne, vus de la vire d'accès (Photo J-Y Bigot)

Le premier groupe qui part dans la vaste galerie principale égaye une cinquantaine de Grands Murins. Chemin faisant, Philippe commente les morphologies caractéristiques du fonctionnement épinoyé : tube en montagnes russe, conduits de soutirage dans les points bas, formes d'érosion torrentielle sur la partie aval des seuils, etc...

Assez curieusement, sur le versant aval de certains seuils, les écoulements torrentiels ont incisé d'épaisses coulées stalagmitiques, pluridécimétriques, qui recouvraient des surfaces de roche-mère érodées antérieurement à ces encroûtements. Cet indice de fonctionnement hydrodynamique polyphasé n'est guère étonnant en soi, mais l'érosion des coulées stalagmitiques dégage par endroits une croûte ferrugineuse millimétrique enduisant les vieilles formes érodées du bed-rock, et parfois des concrétions fort anciennes : de quand date cette cuirasse ferrugineuse, et sous quelles conditions s'est-elle concrétionnée ? Il n'y a pas de réponse évidente à cette question.



Fig. 26 : concrétions anciennes dégagées de leur gangue stalagmitique, probablement de type « chou-fleur », encroûtées d'oxyde de fer (Photo J-C d'A-N)

Dans la section terminale, la recherche de la date gravée « 1574 », découverte et publiée par Jean-Yves, tourne au concours d'ancienneté de graffiti... Que Jean-Yves remporte encore grâce à un très beau « 1649 » qui ne fait pas de doute : cette inscription est gravée sur une coulée stalagmitique à environ 20 mètres en amont de la descente des gours. Fabien confirme la date et tient le flash pour les besoins de la photo. Cette nouvelle date vient illustrer la fréquentation continue de la grotte : tous les siècles depuis le XVIème sont maintenant représentés dans des dates laissées par les visiteurs : 1574, 1649, 1720, 1750, etc. En fait, la fréquentation humaine semble diachronique depuis le Néolithique.



Fig. 27 : un tag du XVIIème siècle... (Photo J-Y Bigot)

Le groupe se scinde alors en deux équipes : les gens normaux, et les maigrichons. Les gens normaux vont continuer à fouiner dans la galerie principale ; les maigrichons, eux, vont refroidir leurs neurones malmenés durant ces deux week-end en se faisant une spéléo pure et dure : traversée grotte de Saint-Benoît – grotte des Perles par le réseau Camille : défolement pour « fins » connaisseurs...



Fig. 28 : l'accès au réseau Camille ; après, c'est un peu plus large. Mais pas tellement. (Photo J-C d'A-N)

Guillaume, Michel, Bruno, Nuño et Tristan s'engouffrent dans ce pertuis derrière Philippe. Philippe et Michel vont en profiter pour faire les 40 mètres de visées qui manquaient à la topo, et feront même 20 mètres de première dans un conduit qualifié par ses auteurs mêmes de « très étroit » (on voit le genre) ; et arrêt sur ... Pire !

Pendant ce temps, Jean-Yves grattouille dans la galerie. Vers les gours, la couleur verte d'un bouton de cuivre oxydé attire l'attention : nul doute que des personnes se sont contorsionnées dans leurs habits étroits pour escalader les seuils de la galerie. Sur l'envers de ce bouton est inscrit « Double plated CH » avec des palmes comme décor. Ce n'est probablement pas très vieux, mais on peut toujours garder l'espoir de trouver des pièces de monnaie datant des premières incursions...

A quelques mètres en aval du passage bas, sur le côté Est de la galerie, un squelette de chauve-souris est pris dans la calcite. Il n'y a rien de très spectaculaire, mais cet élément prouve que les spéléologues contemporains ne sont pas toujours responsables de la mort des chauves-souris... Il est possible que, pour une fois, ce soit les hommes préhistoriques qui, il y a quelques milliers d'années, ont séjourné dans la grotte...

Au retour, vers la partie basse, un ancien remplissage de galets, visible sur le côté Ouest de la galerie, présente la particularité de receler un os pris dans les graviers roulés. Cet os est la preuve, pour ceux qui n'en seraient pas encore convaincus,



que la grotte était alimentée par des pertes de ruisseaux qui devaient couler sur des grès ou des marnes avant de se perdre sous terre.



Fig. 29 : celui-là, il ne vient pas de bien loin... (Photo J-Y Bigot)

Vers 18 heures (heure d'été, ça a changé cette nuit), tout les gens normaux sont sortis de la grotte de Saint Benoît, et voilà les trognes hilares des maigrichons qui commencent à s'afficher dans la petite ouverture de la grotte des Perles...

Le stage se termine donc aux lueurs déclinantes d'une journée encore bien remplie ; au total, beaucoup de travail a été accompli durant ces deux week-ends, il faut encore en faire la synthèse, et en faire un bilan scientifique. Mais, quant au thème directeur de ce stage, il est évident pour chacun que le travail de terrain est loin d'être terminé...



## IV. BILAN SCIENTIFIQUE

### A. Utilisation des logiciels de vectorisation appliqués à la topographie 3D

*Eric MADELAINE, avec la participation de Nuño Jeronimo, Guillaume Isnard, Pierre Kettela et Moustapha*

#### 1. Point de départ

Il y avait à ce jour 3 topographies de la grotte du Chat, dont 2 publiées dans l'Inventaire Spéléologique des Alpes-Maritimes (Tome 2, Y. Créach, 1984), dues respectivement à J. Gavet (fin du XIXe siècle) et à Martine Portet en 1948. La troisième topographie, postérieure, est due à Rousseau (C.M.S., date inconnue) et publiée dans un topoguide de loisirs sportifs grand public (« L'aventure verticale dans les Alpes d'azur », Sounier, Sounier et Oddou, Edisud). Elle est beaucoup plus complète, mais les minutes en ont été perdues, et seul le plan est disponible, sans indication de dénivellation.

Un des objectifs du stage, nécessaire pour étayer les études géomorphologiques, a donc été de refaire un cheminement topo de toute la partie principale de la cavité, de manière à pouvoir disposer des données

altimétriques. Une nouvelle topographie complète, dans un dédale aussi complexe, n'aurait pas été possible pendant le stage. En revanche nous avons décidé de faire appel à la toute dernière génération de logiciels topo, pour nous permettre de recalculer le plan détaillé de Rousseau par rapport aux mesures de notre nouveau cheminement. Plus précisément, nous avons utilisé le logiciel Thérion (et son interface graphique Xthérion), qui permet à partir de dessins en plan et en coupe d'une cavité de créer en machine des dessins vectoriels (en plan et en coupe développée) reliés aux stations du cheminement topographique, et qui s'adapte au calcul de ce cheminement par déformation du dessin (morphing). Le logiciel permet aussi d'obtenir une vue 3D.

#### 2. Utilisation de VTopo

Nous avons commencé, classiquement, par utiliser Vtopo pour obtenir un premier dessin, schématique, de notre cheminement. La topo a été relevée par deux équipes séparées, la première (que nous appelleront « Michel ») partant de l'entrée, traversant le labyrinthe par le chemin le plus direct, et allant jusqu'au bout de la Galerie de Cessole ; la seconde (« Philippe ») commençant au départ du réseau dit supérieur, et rejoignant la galerie de Cessole en passant par la grande salle supérieure. On peut constater sur le plan VTopo ci-après que l'équipe Michel a relevé systématiquement les dimensions complètes des galeries à chaque station (largeurs et hauteurs), alors que l'équipe Philippe n'a relevé que les hauteurs.

L'ensemble comprend 43 visées, pour un développement total de 388 m, et des dénivelées extrémales de -5 et +6 m. Le bouclage est de bonne qualité, puisque l'écart de bouclage calculé par Vtopo est de 2,76% (pas mal pour une boucle courte).

Au regard des objectifs du stage, on remarquera que la vue en coupe projetée montre bien le caractère très horizontal de la cavité. Les calculs réalisés à partir du relevé du cheminement permettent de situer précisément les niveaux des différents éléments morphologiques repérés par les stagiaires.

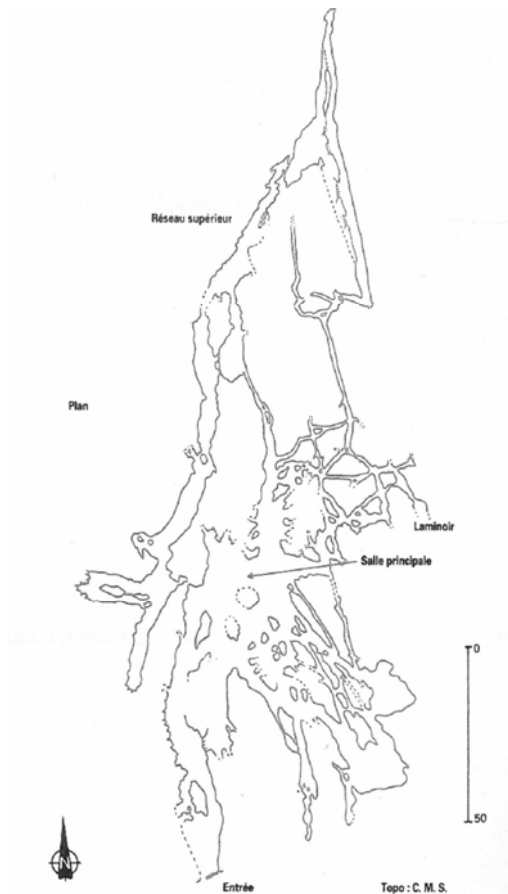


Fig. 30 : topo de la grotte du Chat par la méthode traditionnelle (topo C.M.S.)



Fig. 31 : plan partiel de la grotte du Chat sous VTopo

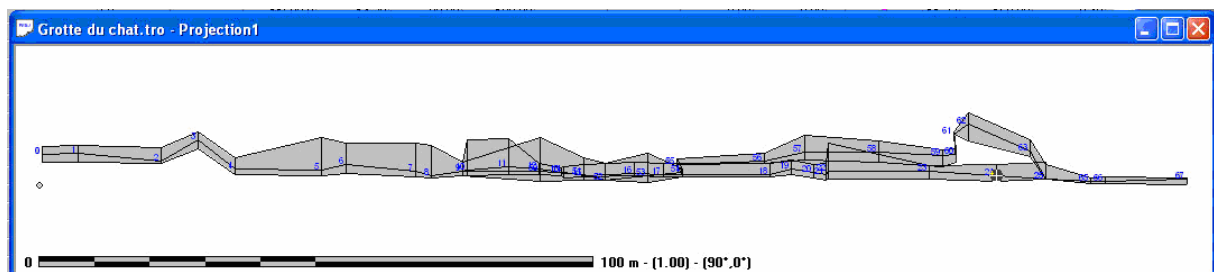


Fig. 32 : coupe projetée de la grotte du Chat sous VTopo ; l'entrée est à gauche sur le dessin

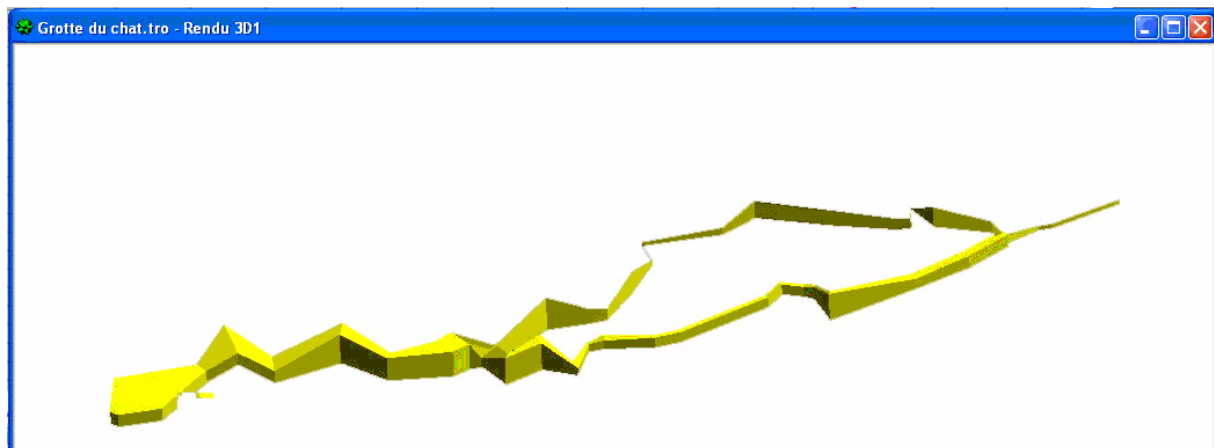


Fig. 33 : vue 3D de la grotte du Chat sous VTopo ; l'entrée est à gauche sur le dessin

### 3. Présentation de Thérion

Thérion est un logiciel de topographie spéléo, créé par des Slovaques à partir de 2002 (première version distribuée), et présentant les caractéristiques originales suivantes :

- En plus d'un langage habituel pour décrire les relevés topo (y compris les dimensions de galeries), il comporte un autre langage, permettant de décrire des dessins vectoriels, représentant des morceaux de plans ou de coupes développées.
- Une interface graphique permet de créer ces dessins vectoriels, à partir de bibliothèques de symboles (points, lignes, zones) spécifiques au domaine spéléo. Il existe plusieurs bibliothèques, correspondant aux différents standards existants (UIS, NSS, etc...).
- Le logiciel peut créer des modèles 3D utilisant les dessins vectoriels des plans de la cavité plutôt que les simples dimensions de galeries, donnant un rendu nettement plus réaliste que les logiciels classiques. Mais les volumes eux-mêmes n'étant pas représentable dans l'interface de dessin vectoriel, il ne faut quand même pas espérer une représentation totalement réaliste des salles, des puits, etc.
- Les dessins vectoriels sont liés aux stations topos. Lorsque vous modifiez (corrigez) les données topo, ou lorsque vous ajoutez une boucle qui modifie les calculs précédents, Thérion ajuste le dessin (par morphing) pour l'adapter aux nouvelles données calculées.
- Thérion crée, à partir de vos données vectorielles morphées, des dessins en format PDF, destinés à la publication : il s'agit de plan d'ensemble, ou bien

de présentation sous forme d'atlas multipage, permettant de représenter de grands systèmes avec beaucoup de détails. Ces différentes vues sont créées à partir des mêmes dessins vectoriels (vous ne dessinez qu'une fois), avec des niveaux de détails différents selon la configuration que vous aurez choisi. Les plans sont accompagnés de légendes (plusieurs langues disponibles).

Thérion, dans sa version actuelle, est sensiblement plus difficile à utiliser que d'autres logiciels de topo. D'une part la documentation et le logiciel sont en anglais (ou en slovaque si vous préférez !). D'autre part l'interface graphique ne parvient pas à cacher complètement la complexité des langages sous-jacents, et l'apprentissage demande pas mal de temps. Les « trucs et astuces » utiles pour obtenir sans trop tâtonner le résultat souhaité ne sont pas nécessairement dans le manuel... Mais il existe une mail list très active, et les membres répondront volontiers à vos questions (en anglais).

Thérion est entièrement gratuit, se télécharge sur le site <http://therion.speleo.sk/>, et s'installe sans difficulté (malgré sa grande complexité interne), aussi bien sur Windows que sur Linux ou sur Mac.

Pour résumer, citation prise sur le site :  
"Therion is especially suitable for documenting large and complicated cave systems."  
(Therion est particulièrement bien adapté pour documenter des réseaux grands et complexes).

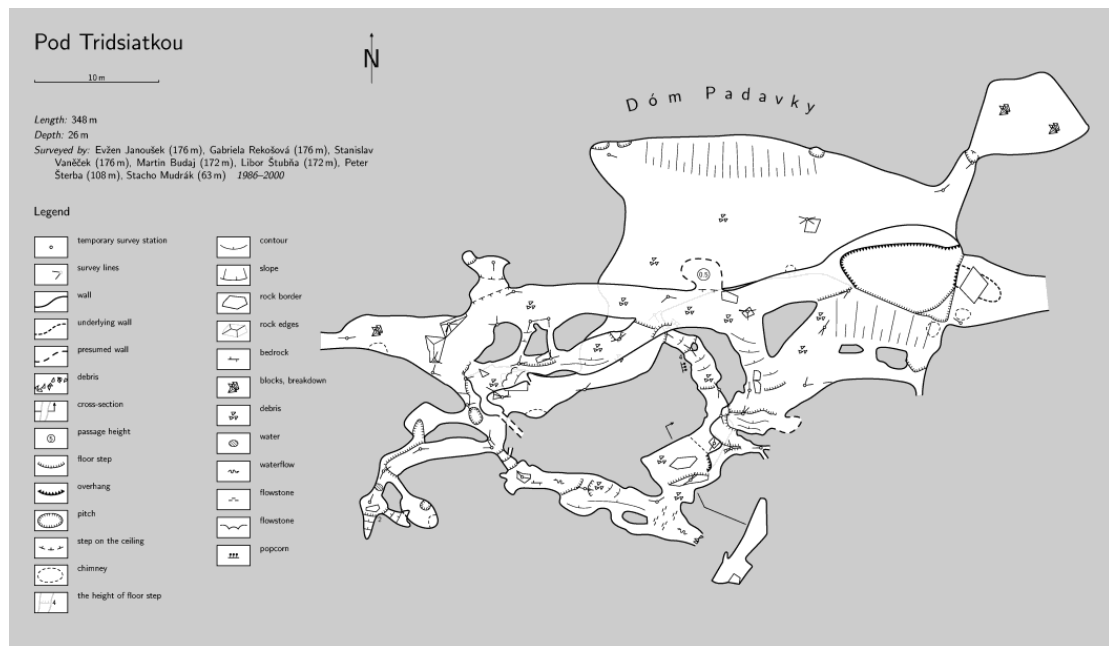


Fig. 34 : Exemple de carte donnée sur le site de Thérion

#### 4. Quelques résultats avec Thérion

Le choix de Thérion pour notre stage était justifié à la fois :

- par l'intérêt même de la présentation d'une nouvelle génération de logiciels topo.
- Par le fait que nous disposions déjà d'un plan détaillé très correct de la cavité, et qu'il s'agissait pour nous de faire coller ce plan avec nos mesures, ce qui est justement la définition du « morphing » de Thérion.

Hélas, il n'a guère été possible pour les stagiaires de pratiquer eux-mêmes le logiciel, vu le temps disponible pendant le stage. Seule une courte démonstration a été possible, après une à deux heures consacrées à entrer dans le système les données du cheminement (par traduction, manuelle mais simple, à partir de Vtopo), puis à réaliser les premiers dessins de plans vectoriels.

Une des difficultés majeures de l'exercice (en dehors du manque d'habitude de l'outil), s'est révélée être que les topographes n'ayant pas fait de croquis pendant leur séance de relevés, ni pointé leurs stations sur la topo existante de Rousseau, il a été difficile d'y localiser les stations, entraînant une déformation plus importante que pour une topographie faite dans des conditions plus standard.

Thérion permet de générer, à partir d'un seul jeu de données (minutes des visées topo et cartes tracées dans l'éditeur de cartes vectoriel xtherion), des cartes (plan et coupe) à différentes échelles : pour chacune d'elle, vous spécifiez l'échelle, ainsi que le type des objets (points, lignes, etc) que vous souhaitez voir apparaître.

Par exemple dans la carte d'ensemble ci-contre, j'ai spécifié d'omettre les labels et les sections, alors que dans la page d'atlas au 1/100-ième de la page suivante, j'ai spécifié que je voulais voir tous les types détails.

Les atlas permettent de publier à grande échelle les topographies de détail de grands réseaux. Les bords de page contiennent les indications pour trouver la page suivante ; on peut aussi spécifier plusieurs niveaux dans la cavité, représentés sur des pages différentes, etc...

En page suivante sont présentés un extrait de l'atlas au 1/100-ième obtenu au final pour la grotte du Chat, montrant le détail de la zone de jonction de la galerie de Cessole avec la salle supérieure, et une vue 3D de la zone d'entrée.

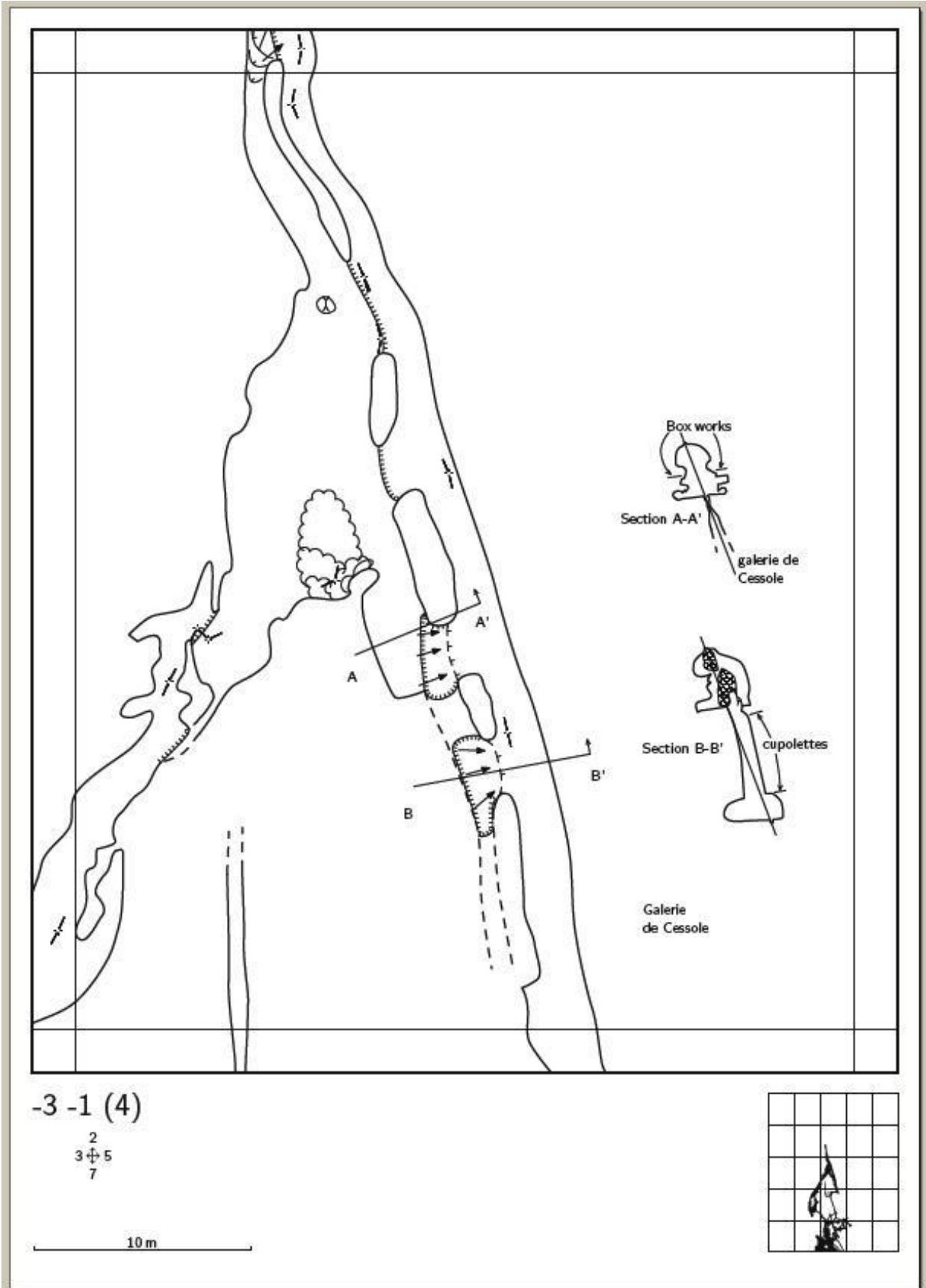
Pour conclure, une bonne nouvelle toute fraîche : une version française du manuel utilisateur est depuis peu disponible sur le site de Thérion : avis aux amateurs...



Grotte du Chat Daluis (06)

25 m

Longueur: 388 m  
Profondeur: 16m  
Topographes: Michel Isnard (228 m), Philippe Audra (160m) 2006



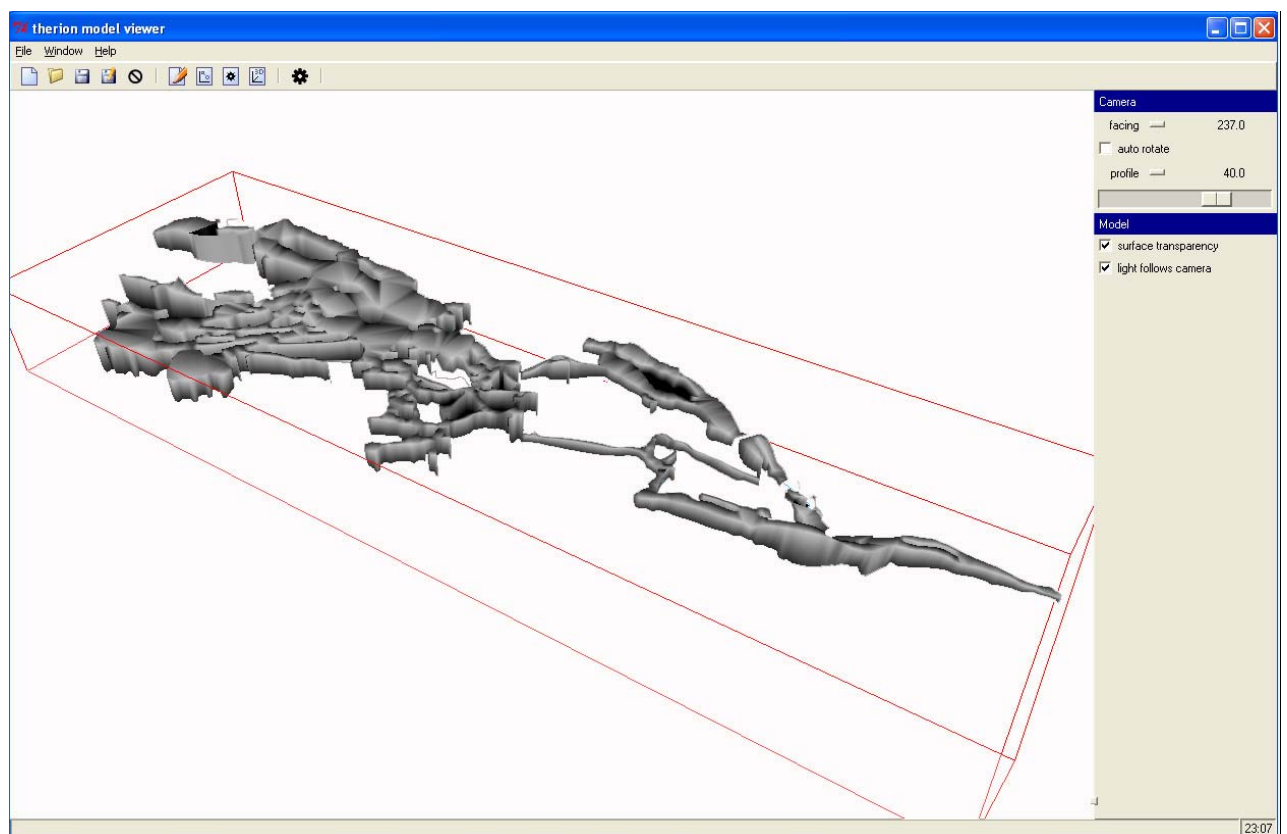


Fig. 35 : extrait de l'atlas et vue 3D de la grotte du Chat sous Thérion (l'entrée est en haut à gauche)

## B. Formation des concrétions en « choux-fleurs » ou « popcorns »

Jean-Yves BIGOT, avec la participation de Catherine BABY, Tristan CHARLES, Fabien GANDON, Nuño JERONIMO, Ludovic MOCOCHAIN et Bruno SCANU

### 1. Observations du premier week-end

Avec Tristan, Bruno, Cathy et Fabien, nous collectons des observations dans la galerie de Cessole, où nous prenons quelques photos. Après avoir noté la présence du gypse et l'intense corrosion dans les parties basses ayant baigné dans l'eau sulfurée, nous remarquons de nombreuses concrétions en choux-fleurs ou « popcorns ».



Fig. 36 : popcorns (Photo J-Y Bigot)

Il est admis que les popcorns ne se forment pas dans un milieu aquatique mais aérien, par précipitation de minéraux dissous dans de l'eau circulant dans l'atmosphère sous forme d'aérosols. Les aérosols sont des gouttelettes dont la dimension est comprise entre quelques dizaines d'Angströms et quelques dixièmes de millimètre ; seuls les éléments d'une taille supérieure à 5  $\mu\text{m}$  sont visibles, de sorte qu'ils sont relativement négligés, mais certaines concrétions (choux-fleurs, coralloïdes) n'ont pas d'autre origine. Les aérosols sont créés par des circulations turbulentes d'eau ou d'air, mais il semble que de simples courants d'air tangeant des surfaces d'eau calmes peuvent y arracher des « grappes de molécules », des micro-aérosols qui sont de fait minéralisés. Ce phénomène est bien identifié par la sagesse populaire en milieu littoral, où chacun sait que l'air marin est « salin ». On trouve des concrétions venues d'aérosols dans des cavités hydrothermales, par exemple dans les grottes de Pigette (Gréoux-les-Bains, 04) dont l'origine hypogène est avérée, mais on en trouve aussi dans les cavités « normales ».

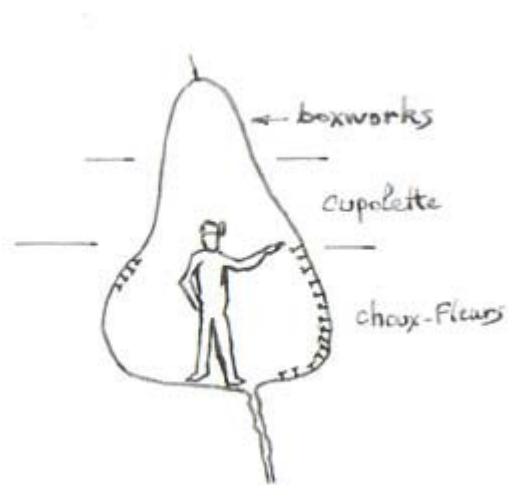


Fig. 37 : répartition altitudinale des popcorns et des figures de corrosion dans une galerie ; première approche théorique (Photo Ludovic Mocochain, dessin J-Y Bigot, 18/4/06)



Il nous semble d'emblée que les choux-fleurs ont à la grotte du Chat une répartition altitudinale nette : en gros, on les trouve dans les galeries sur une hauteur de 1 m à 1,20 m, comme si l'atmosphère de la grotte au moment de leur formation avait été stratifiée.

Devant une paroi qui en est couverte, Jeronimo remarque que, curieusement, des choux-fleurs sont situés sous de petits surplombs rocheux de la paroi. De fait, il y en a une grande profusion à cet endroit, notamment dans une fissure située juste au-dessous, comme si cette fissure avait diffusé dans l'atmosphère de la grotte un mélange gazeux propice à la formation des concrétions aériennes tels ces popcorns.

Certaines fissures d'alimentation très corrodées qui, à l'origine, se situaient sous le niveau de l'eau sont couvertes de choux-fleurs : visiblement, ils se sont formés après l'abaissement du niveau de la nappe d'eau sulfurée quelques mètres sous le sol actuel des galeries.

Au retour, nous nous trompons d'itinéraire et sortons par des boyaux bas de plafond, au passage nous observons une plaque de gypse qui recouvre les choux-fleurs. C'est d'autant plus étonnant que les collègues on fait des observations inverses : les choux-fleurs se développent parfois sur des plaques de gypse qui on tendance à se décoller de la paroi... Il faut y voir une certaine contemporanéité du gypse et des choux-fleurs, dont l'origine hydrothermale semble ainsi attestée. Bien sûr, on observe également des concrétions classiques (comme les micro-gours et les stalactites) apparues

postérieurement, qui scellent ou recouvrent toujours les choux-fleurs.



Fig. 38 : popcorns recouverts de gypse (Photo J-Y Bigot)

A l'issue de ces deux jours, notre première approche nous amène donc à proposer une hypothèse de stratification altitudinale de l'atmosphère dans la grotte, probablement en même temps thermique et gravitaire (présence de particules sous forme d'aérosols) suscitant dans les galeries l'étagement des formes de concrétionnement et de corrosion.

Cependant, tout n'est probablement pas dit : bizarrement, au droit de la fissure émissive située dans le coude de la galerie de Cessole, les choux-fleurs sont positionnés à une hauteur (1,60 m) supérieure à la hauteur moyenne de 1,30 m, comme si un champignon d'air émergeait au-dessus de la couche stratifiée des choux-fleurs.

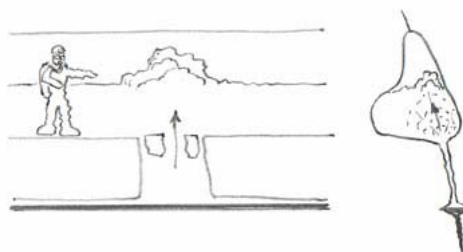


Fig. 39 : popcorns en situation insolite et hypothèse de formation (Photo et dessin J-Y Bigot, 18/04/06)

## 2. Observations du second week-end

Nous travaillons maintenant dans la partie Sud du Labyrinthe où les conduits parallèles sont nombreux et parfois étroits, et qui s'arrête devant une belle trémie indiquant la proximité du versant. Dans cette partie sud, certainement en raison de l'influence de la surface et de la végétation, les concrétions classiques sont relativement abondantes. Toutefois, nous observons de nombreux choux-fleurs, toujours dans les parties basses des conduits qui sont les seules parties pénétrables ; mais peut-être est-ce surtout parce que nous n'avons pas su lever le nez ?

Soudain, dans une salle basse, la limite franche entre la roche nue affectée par des poches de substitution et l'implantation de choux-fleurs nous fait douter des impressions du week-end précédent, au cours duquel nous avons conclu à l'influence de la stratification de l'atmosphère...

Nous commençons à observer ce que nous n'avions pas vu, ou ce que nous ne voulions pas voir : présence de choux-fleurs dans les parties étroites et hautes, développement des choux-fleurs sur un seul

côté des parois dans certains tronçons de galerie, etc.

Toutes les conclusions du week-end précédent sont à revoir : l'hypothèse des couches stratifiées d'atmosphère de densités différentes, beaucoup trop statique pour décrire les phénomènes actifs qui interagissent dans une ambiance chaude et suffocante, ne colle plus aux « objets » observés dans la grotte : notre théorie vient de s'effondrer.

Intuitivement, le rôle des aérosols est privilégié : c'est bien des circulations d'air chargé qui sont responsables de la formation des choux-fleurs. Ceci est abondamment illustré dans la grotte : à la sortie d'une fissure-cheminée du sol, les flux gazeux chargés d'aérosols sont corrosifs, mais lorsqu'ils se dissipent dans l'atmosphère de la salle ils redeviennent incrustants.

La limite nette entre roche nue et choux-fleurs laisse apparaître une couche de calcite laminée d'une épaisseur de 1 cm, que les flux corrosifs ont légèrement retaillée. La couche de choux-fleurs se développe sous la volute d'aérosols.



*Fig. 40 : ci-dessus, popcorns développés en position très haute dans une fissure étroite ; à droite, cupolettes et popcorns sur les deux faces d'un même objet : infractions évidentes à l'hypothèse altitudinale... (Photos J-Y Bigot)*



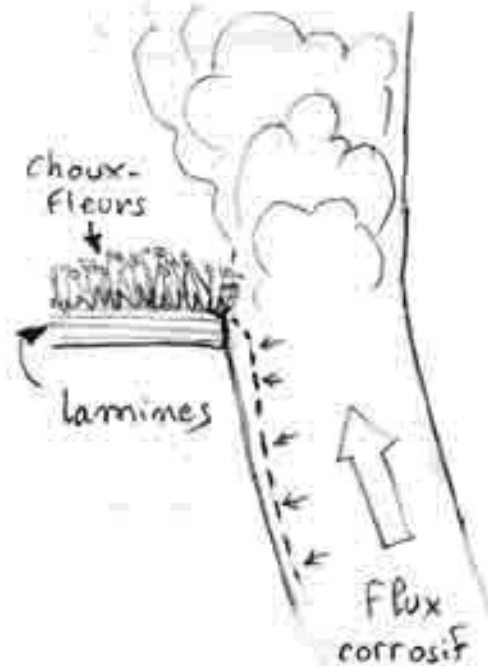
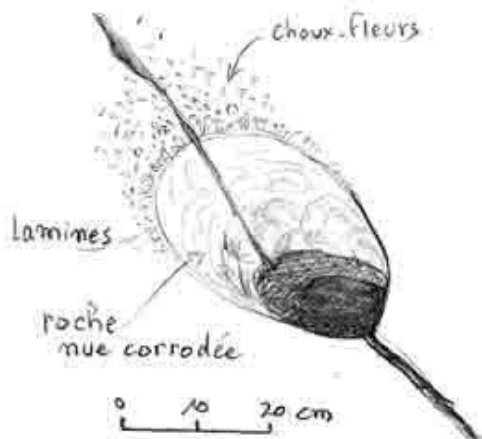


Fig. 41 : la répartition des popcorns n'est pas altitudinale, mais liée à la dynamique de la circulation des aérosols : ils cristallisent « sous le vent » (Dessins J-Y Bigot, 25/4/06)

Le lendemain matin, la lecture de l'article de Yuri V. Dublyansky et Serguei E. Pashenko : « Cave Popcorn – An Aerosol Speleothem ? » (1997) permettra de confirmer toutes les impressions de la veille.

En conclusion sur les observations faites sur les choux-fleurs de la grotte du Chat : la formation des popcorns en milieu hydrothermal est liée à la circulation dans l'atmosphère de la grotte de flux mixtes, chargés d'aérosols minéralisés et de substances corrosives ; dans les sections où les vitesses linéaires sont rapides (milieu fissural, effet Venturi, veines gazeuses chaudes, parois « au vent »), la dynamique est orientée vers la corrosion, laquelle participe probablement à la formation et à la minéralisation des aérosols (« soufflage » des parois humides) ; dans les sections où les flux perdent leur compétence (élargissement des conduits, parois « sous le vent », diffluence en volutes gazeuses), la dynamique s'oriente vers le

dépôt des aérosols et l'accrétion de leur minéralisation.

Ces dynamiques étaient donc étroitement liées à la morphologie et la géométrie des galeries. Ceci explique également pourquoi les choux-fleurs sont souvent absents de la partie supérieure des conduits trop exposée à la corrosion et dans laquelle on trouve plutôt des boxworks.

Cet ensemble d'observations rappelle des phénomènes déjà observés dans les grottes de Pigette (Gréoux-les-Bains, Alpes-de-Haute-Provence) et des Champignons (Montagne Sainte-Victoire, Bouches-du-Rhône), sans que le mécanisme du phénomène ait été alors vraiment intégré : les conclusions tirées lors de cet atelier éclairent ainsi pertinemment les processus constatés dans d'autres cavités, et peuvent donc se généraliser.

## C. Morphométrie des poches de substitution

Philippe AUDRA et Jean-Claude D'ANTONI-NOBECOURT, avec la participation de Tristan CHARLES, Fabien GANDON, Nuño JERONIMO et Pierre KETTELA

### 1. Objectif de l'atelier

Des formes de corrosion pariétales particulières, décrites antérieurement dans le système hypogène de Frassasi et interprétées comme des poches de substitution de carbonates par des sulfates en milieu aérien (Galdenzi & Maruoka 2003, *Journal of caves and karst studies*, p. 117), abondent dans la grotte du Chat.



Fig. 42 : les poches de substitution de la grotte du Chat (Photo J-Y Bigot, Nov. 2005)

Pour autant qu'on puisse en juger dans les parties non broyées, elles semblent réparties dans l'ensemble de la cavité : on les remarque de façon évidente dès le début de la salle des Santons et jusqu'à l'extrême terminus de la galerie de Cessole (paroi Ouest) ; même dans la zone comprise entre l'entrée et le début de la salle des Santons, dans laquelle on ne distingue guère de forme pariétale parce qu'elle est fort chaotique et passablement éboulée, il existe, à proximité du ressaut terminant la salle d'entrée, une paroi en place portant, très en hauteur, un panneau de poches de substitution bien marquées.

Elles sont présentes sur des parois subverticales, parfois déversées, et se peuvent se développer jusqu'au sommet des conduits, souvent au-dessus d'un niveau limite de l'ordre du demi-mètre ; dans les galeries ayant une certaine ampleur, cela correspond de façon évidente au sommet de la zone inférieure élargie, c'est-à-dire au niveau du plan d'eau. Sandro Galdenzi avait fait la même observation dans Frassasi (Galdenzi & Maruoka 2003, *Journal of caves and karst studies*, p. 117).

On peut également en observer sur des surfaces horizontales, quasiment au sol, bien qu'elles y soient alors généralement camouflées par des dépôts argileux ou engravées de débris de concrétions en chou-fleur : c'est le cas par exemple dans le diverticule occidental de la salle principale, où elles défoncent littéralement une banquette de corrosion. Dans cette disposition, l'hypothèse de marmites hydrodynamiques assez tentante ne résiste guère à l'analyse, car :

- cette banquette est perchée une dizaine de centimètres au dessus d'un chenal évident, dont le fond est précisément exempt de ces formes, ce qui conforte l'hypothèse d'une formation en milieu aérien ;
- il n'y a pas de galets dans la grotte, donc pas de possibilité de creuser des marmites, à plus forte raison de creuser des dizaines de marmites ;
- leur morphologie est en cet endroit assez uniforme, plus large que profonde, ce qui est notablement différent d'une morphologie de marmite ;
- il arrive qu'elles intersectent, et dans ce cas la jonction des poches affecte volontiers la forme d'une crête vive, et non pas émoussée comme cela se serait produit si un galet avait meulé le calcaire.

Il ne fait donc pas de doute que nous avons là les formes horizontales des poches de substitution que nous voyons en paroi.

Celles qui sont développées en paroi sont généralement propres et exemptes de dépôt ; la section initiale de la galerie de Cessole fait exception, puisque les poches de substitution y sont encroûtées de calcite secondaire en raison de ruissellements issus de la diaclase au plafond qui ont passablement concrétionné ce secteur.

Certaines poches de substitution pariétales présentent un rapport profondeur/diamètre très faible, et sont donc plus profondes qu'une demi-sphère : c'est en particulier le cas pour celle qui a été mesurée isolément sur la partie supérieure de la paroi orientale du diverticule parallèle à la salle principale : les bords de cette poche de substitution sont même légèrement débordants vers l'intérieur.



Fig. 43 : poche de substitution à bords débordants (Photo J-C d'A-N)

Elles sont suffisamment nombreuses (probablement plusieurs milliers) pour constituer une population statistiquement représentative, et offrir ainsi de bonnes perspectives d'échantillonnage. On se

propose donc de mener une étude aussi systématique que possible des grandeurs caractéristiques de ces poches de substitution.

On pointe dans cet atelier les deux objectifs suivants :

- comparer les caractéristiques morphométriques de ces objets à celles des formes de paroi ressemblantes connues dans les cavités classiques, pour confirmer que l'on peut (ou non) exclure que leur mécanisme de formation soit identique ;
- repérer si possible, dans les données topographiques liant ces formes aux principaux éléments contextuels, d'éventuels attracteurs permettant de définir ou d'étayer une hypothèse de formation ;
- in fine, identifier des indicateurs morphométriques pouvant différencier à coup sûr ces poches des autres types de forme.

## 2. Analyse de la répartition des poches de substitution

Problématique : on constate aisément que les poches de substitution ne se répartissent pas de manière homogène. Elles apparaissent par panneaux de forte densité de plusieurs mètres carrés, parfois en association de quelques individus isolés. Elles sont absentes en de nombreux endroits, ou peut-être de formes trop altérées pour être différenciées des irrégularités de la paroi. Il s'agissait d'essayer de trouver une logique à cette répartition.

Méthode d'observation : l'objectif était de consacrer un temps court d'observation afin de voir si une tendance apparaissait, quitte, au vu des résultats, à développer une stratégie plus ciblée afin d'obtenir ensuite des résultats plus fins. C'est le résultat de cette première étape qui est présenté ici.

Les observations ont été conduites dans l'ensemble de la partie orientale du réseau (Labyrinthe et galerie de Cessole), le réseau supérieur, la galerie d'entrée et la zone centrale n'ont pas été intégrés. Nous avons établi un relevé des observations de la présence des poches de substitution de manière semi-quantitative (absent / rare / peu dense / assez dense / très dense), par une représentation de plages de couleurs correspondantes reportées sur le plan.

Par ailleurs, leur répartition sur la hauteur de la section a été notée et reportée de la même manière.

### Premiers résultats d'observation :

- Aucune limite ne semble parfaitement horizontale, et il ne semble pas qu'il y ait de niveau altitudinal absolu préférentiel. Leur genèse en rapport direct avec une nappe d'eau semble exclue. Le processus est aérien, comme démontré dans la grotte de Frasassi (S. Galdenzi).
- Sur parois, la répartition en hauteur montre un développement quasi-systématique entre 1 et 2 m de hauteur. Elles sont absentes en dessous (du moins en paroi), en rares au-dessus.
- Confinement : elles semblent plus abondantes dans les zones confinées, dans les conduits de taille moyenne ; elles sont inexistantes dans les gros volumes des salles centrales.
- Leur surdéveloppement à proximité des événements ou d'une fissure émissive est évident ; toutefois la loi régissant cette relation ne semble pas simple. Notamment, il semble qu'elles se développent préférentiellement vers l'aval apparent de ces points d'émission de fluides.

# Répartition des poches de substitution (calcaire par gypse)

Synthèse N. Jeronimo

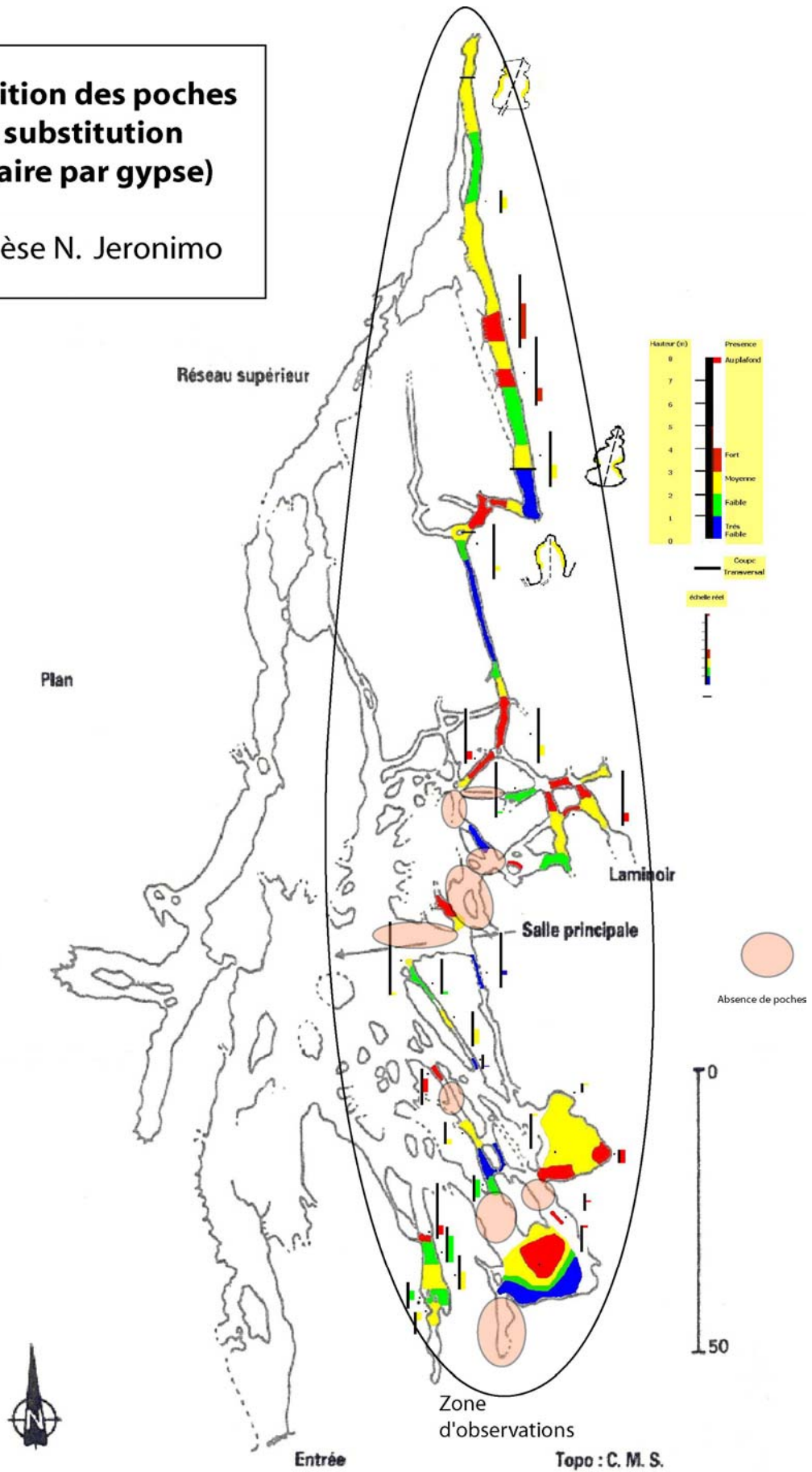


Fig. 44 : première approche de la répartition des poches de substitution (dessin N. Jeronimo)

### Premières interprétations :

- L'association des phénomènes de corrosion par substitution avec les points émissifs est évidente. Le décalage vers l'aval peut s'expliquer par le dégazage progressif de l' $H_2S$  lors de l'écoulement, qui diffère les phénomènes de corrosion vers l'aval.

- L'absence de poches de substitution en partie basse des sections peut s'expliquer de plusieurs manières : on peut penser par exemple que la condensation responsable de la corrosion est plus forte en hauteur, alors que l'évaporation prédomine dans les parties basses. Reste à expliquer la limite supérieure...

- L'absence de poches de substitution dans les grands volumes peut être reliée à la présence de grands mouvements de convection d'air (fort gradient thermique entre les fissures principales et le plafond élevé), plus favorable à une condensation forte produisant du ruissellement et le lessivage du gypse au fur et à mesure de sa formation, qu'à un développement diffus des poches de gypse. En ce sens, les conduits de taille réduite seraient plus favorables au développement des poches, alors que les grands volumes formeraient plutôt des vastes coupoles.

### 3. Méthodes



Fig. 45 : le cadre de carroyage conditionné (Photo J-C d'A-N)



Fig. 46 : utilisation du cadre de carroyage (Photo J-C d'A-N)

On utilise un cadre en aluminium démontable délimitant un carreau de 0,75 x 0,75 m que l'on positionne sur une paroi portant des poches de substitution. À l'aide d'un régleur et d'un pied à coulisse avec jauge de profondeur, on relève longueur, largeur et profondeur de chaque poche de substitution.

L'ensemble des relevés est intégré dans un tableur calculant les données géométriques (surface, volume, elliptisme, foration) ; chaque rubrique de données géométriques est découpée en une vingtaine de classes dimensionnelles entre 0 et le maximum mesuré dans la grotte, et chaque objet est décompté dans les classes auxquelles il appartient ; enfin une feuille de synthèse donne une représentation graphique de la distribution des caractéristiques morphométriques par rapport à ces classes dimensionnelles.

Le tableur délivre également les éléments statistiques que l'on juge pertinents, en l'occurrence les moyennes et écarts-type sur les formes et les volumes.

On considère pour ces calculs que la section d'une poche de substitution est proche d'une ellipse, et que son volume est proche d'une calotte de sphéroïde oblate (volume défini par la rotation d'une ellipse autour de son petit axe) ; par approximation, ce volume est calculé comme celui d'une calotte de sphère dont la section a une surface égale à celle de l'ellipse de référence. Les poches de substitution situées sur la limite du carreau de mesure sont prises en compte pour une demi-valeur, ce qui doit être statistiquement correct sur un nombre significatif de mesures (sur les 175 poches de substitution relevées, 35 étaient dans ce cas).

On appellera « foration » le rapport entre la profondeur de la poche de substitution et le rayon du cercle équivalent à sa surface ; une poche de substitution hémisphérique présente ainsi une foration de 100 %.

On appelle « elliptisme » le rapport entre la différence grand axe – petit axe de la surface de la poche de substitution, sur son grand axe. Si la poche de substitution est circulaire, cette différence est nulle et l'elliptisme est de 0 %.

Dans le recherche d'une relation entre la répartition des poches de substitution et la section de la galerie, cette dernière est arbitrairement considérée comme une ellipse ; de même, le volume d'air associé au carreau de mesure est arbitrairement estimé comme

le volume généré par cette ellipse et la moyenne entre son grand et son petit axe. Ces approximations ne sont naturellement pas parfaitement conformes à la réalité, mais permettent d'avoir une base d'appréciation et de détecter d'éventuelles relations causales.

#### 4. Déroulement in situ et limites de la méthode

L'expérimentation en conditions réelles de la méthode a présenté quelques difficultés.

La première est le choix des surfaces de travail ; en effet, malgré l'abondance des items, les surfaces qui soient suffisamment planes pour poser un carreau de 0,75x0,75 m. ne représentent qu'une faible proportion des parois perforées de poches de substitution. En revanche, un carreau plus petit ne recouvrirait pas une population de poches de substitution ayant valeur statistique. Aussi, la répartition du carroyage est essentiellement commandée par la conformation des parois, donc pas aléatoire : in fine, elle n'est pas totalement fidèle à la répartition réelle des poches de substitution dans la cavité. Un carroyage souple, à concevoir, constituerait sans doute un dispositif plus performant.

Par ailleurs, dans certains secteurs (notamment début de la galerie de Cessole), les parois sont encroûtées de calcite qui masque les poches de substitution ou en altère les dimensions, de sorte que ces secteurs ne sont pas exploitables.

La diversité des stades d'évolution des poches de substitution pose un second problème. Tout d'abord, il semble que les parois portent des formes très juvéniles non clairement lisibles, dont l'effectif et le volume ne sont pas insignifiants mais ne sont pas mesurables. Il existe donc une classe de proto-poches de substitution non prises en compte dans la statistique.

A l'inverse, certaines parois très corrodées présentent des formes complexes résultant de la coalescence ou de l'emboîtement de poches de substitution. A chaque fois que cela était évident, les coalescences ont été éclatées dans le relevé des cotes, ce qui implique une approximation des dimensions ; certaines formes plus évoluées et quasiment indissociables ont été relevées comme une poche de substitution unique, ce qui induit des valeurs morphométriques aberrantes par rapport au processus de corrosion, et dévie probablement la statistique. Il est probable que des formes particulièrement séniles ne se traduisent plus que comme un relief irrégulier sur la paroi, et ne sont par conséquent plus lisibles du tout.



Fig. 47 : coalescence de poches de corrosion attestée par un « hum » central (Photo J-C d'A-N)

Il faut enfin évoquer l'influence de l'expérimentateur sur les valeurs relevées : sur ces formes et ce support très irrégulier, même avec un instrument précis, la cote mesurée variera de façon significative en fonction du positionnement des points et des outils de mesure, choix arbitraire et subjectif adopté par l'opérateur. La multiplication des mesures et des opérateurs permettrait théoriquement d'optimiser la fiabilité statistique de l'échantillonnage, mais le choix des champs de travail n'est guère extensible dans cette cavité de développement réduit : même en travaillant le réseau supérieur qui n'a pas été exploité car, successivement très concrétionné et très broyé, il n'a conservé que peu de formes pariétales, il n'est guère envisageable d'aller très au-delà des 175 mesures réalisées sur 6 carreaux.

Ce protocole, passablement entaché d'approximation et d'arbitraire, n'est donc pas totalement rigoureux, mais il peut néanmoins mettre en exergue des anomalies ou des convergences statistiques notables s'il en existe.



## 5. Discussion

Statistiques et graphiques: pour détecter d'éventuels attracteurs statistiques, il convient tout d'abord de savoir quelles seraient les distributions morphométriques des poches de substitution dans des conditions non influencées ou aléatoires : à quoi peut-on s'attendre si l'on suppose que les dimensions sont uniformément réparties entre les minima et maxima constatés, ou bien a contrario si l'on suppose que leurs dimensions sont aléatoirement réparties entre les minima et maxima constatés ? Et en quoi, a fortiori, les mesures relevées diffèrent-elles de ces distributions ?

Une approche mathématique de la distribution des surfaces pour un ensemble de « cupolettes » dont les dimensions varient continûment entre le minimum et le maximum constatés est possible ; cela ne doit pas être très éloigné de l'étude d'une fonction  $y=f(S)$ ,  $y$  égalant l'intégrale de  $S/L$  entre

racine carrée de  $S$  et  $L_{max}$ . Aussi affriolante que puisse être une telle perspective, cette étude déborde quelque peu du cadre du stage ; à plus forte raison, l'étude mathématique de la distribution des volumes qui introduit une variable supplémentaire ne sera pas abordée...

Nous avons donc préféré utiliser pour réaliser cet « étalonnage à blanc des courbes » le même outil statistique que celui utilisé pour l'analyse des mesures de terrain, paramétré avec les mêmes classes dimensionnelles, une première fois en entrant des cotes définies régulièrement réparties dans la fourchette des dimensions effectivement relevées (série 1), une seconde fois en utilisant sur un grand nombre d'itérations des opérateurs aléatoires faisant varier au hasard les cotes dans la fourchette des dimensions effectivement relevées (série 2).



## SERIE 1 : DIMENSIONS REGULIEREMENT REPARTIES

On constate que la distribution des surfaces et des volumes pour des cotes supposées uniformément réparties présentent l'allure de courbes apparentées à  $1/x$ , avec des maxima de l'ordre de 15%. L'inflexion en fin de courbe est un artefact du tableur qui décompte dans la dernière classe toutes les valeurs maximales mathématiquement possibles dans la simulation, en réalité très peu représentées sur le terrain.

La distribution des elliptismes est quant à elle à peu près linéaire. Les petites irrégularités sont liées là encore au manque de finesse de l'outil tableur : on a en effet retenu pour les longueur/largeur une

collection de valeurs variant entre 1 et 27 cm au pas de 1 cm entier, ce qui induit des lacunes statistiques en limites de classe (le nombre de valeurs d'elliptismes possibles n'est pas identique dans chaque classe, il varie de 10 à 14).

La courbe de distribution des forations est quasiment linéaire entre 10 et 100%, avec une allure très faiblement gaussienne liée au simple fait qu'il existe peu de combinaisons d'opérateurs dont la division donne des valeurs extrêmes, alors que les valeurs médianes sont atteintes par un plus grand nombre de combinaisons.

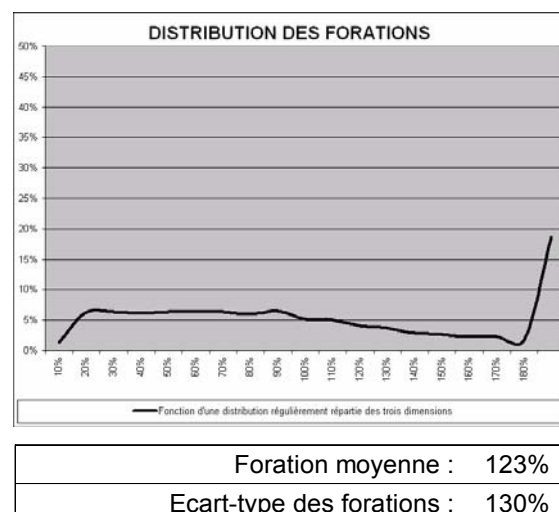
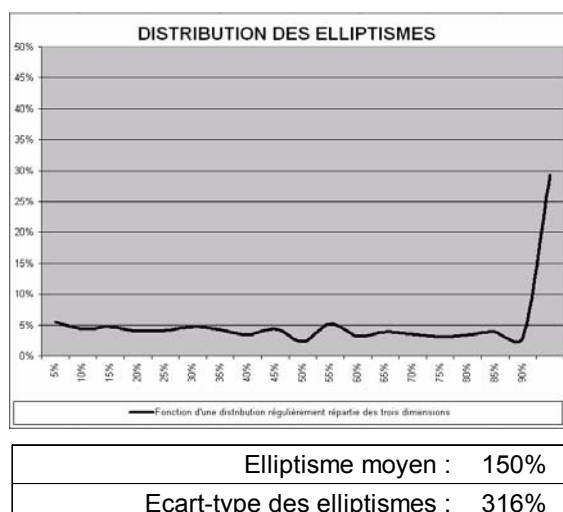
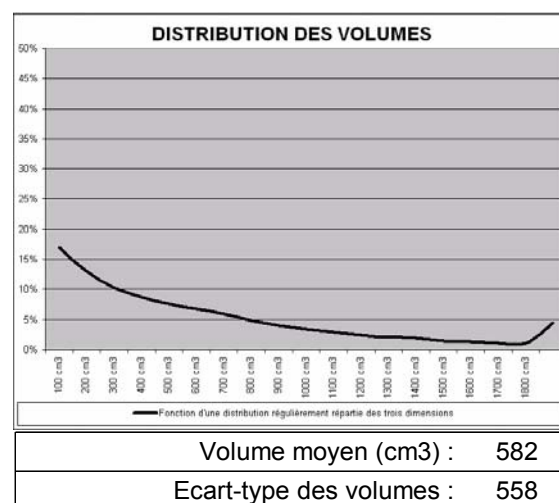
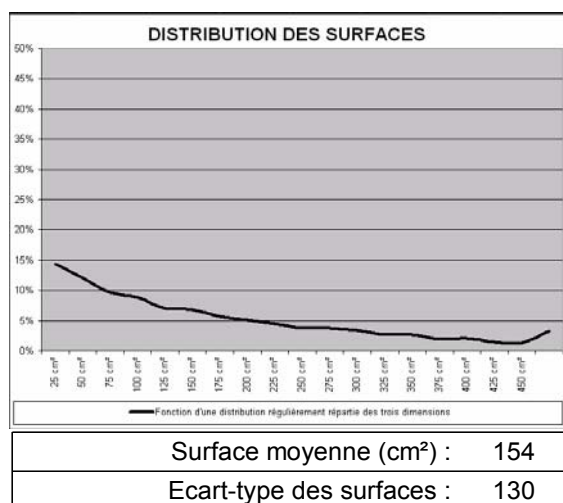


Fig. 48 : courbes de distribution des caractéristiques morphométriques de poches de distributions de dimensions aléatoires

## SERIE 2 : DIMENSIONS ALEATOIRES

Dans le cas de cotes définies aléatoirement, on constate que les courbes de distribution des surfaces, des volumes, des elliptismes, conservent la même allure générale à l'irrégularité près. La distribution des forations conserve également son allure linéaire, faiblement gaussienne. Invariablement, à chaque tirage de valeurs, l'outil

tableur montre une faible représentation des surfaces, des volumes et des forations dans la plus faible classe dimensionnelle.

Nous n'avons pas intégré les données de moyennes et d'écart-type, peu significatives dans ce cas de figure.

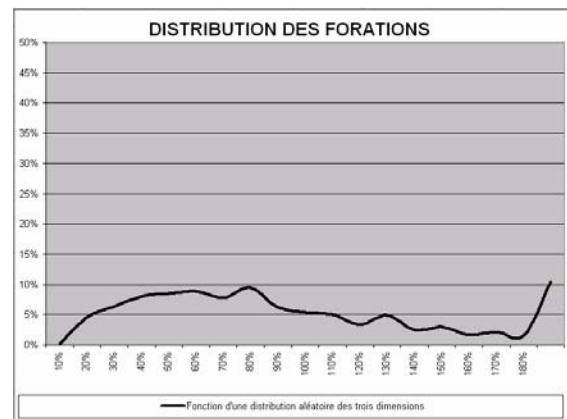
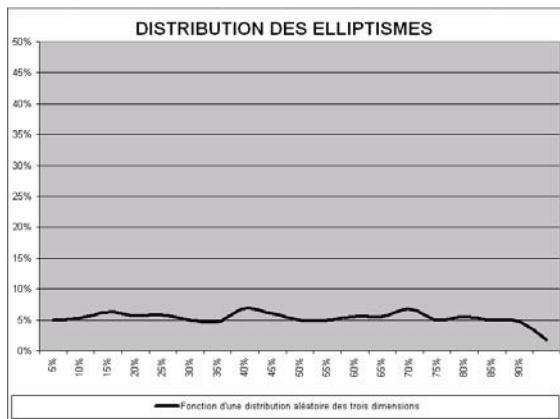
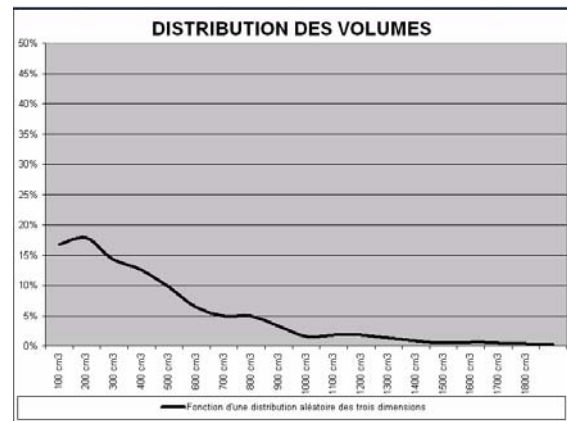
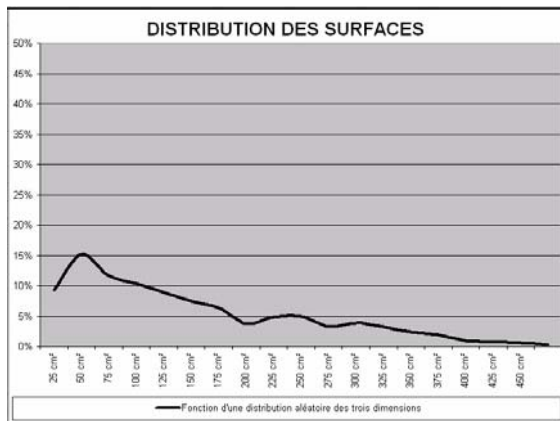


Fig. 49 : courbes de distribution des caractéristiques morphométriques de poches de distributions de dimensions aléatoires

Ayant ainsi « taré » notre outil de représentation, nous pouvons maintenant discuter les données de terrain relevées dans la grotte du Chat.

### SERIE 3 : DIMENSIONS REELLES RELEVÉES DANS LA GROTTÉ DU CHAT

- Les distributions des surfaces et des volumes sont marquées par une forte représentation d'éléments de taille petite à « normale », et une décroissance régulière de l'effectif des grands éléments : ainsi, 76,6 % des items ont une surface inférieure à 100 cm<sup>2</sup> et un volume inférieur à 300 cm<sup>3</sup>. Les

distributions sont relativement homogènes sur tous les carreaux examinés. Ceci semble indiquer une évolution relativement cohérente des poches de substitution, donc un développement monophasé du processus de corrosion, sans grande variation dans les facteurs qui y participent.

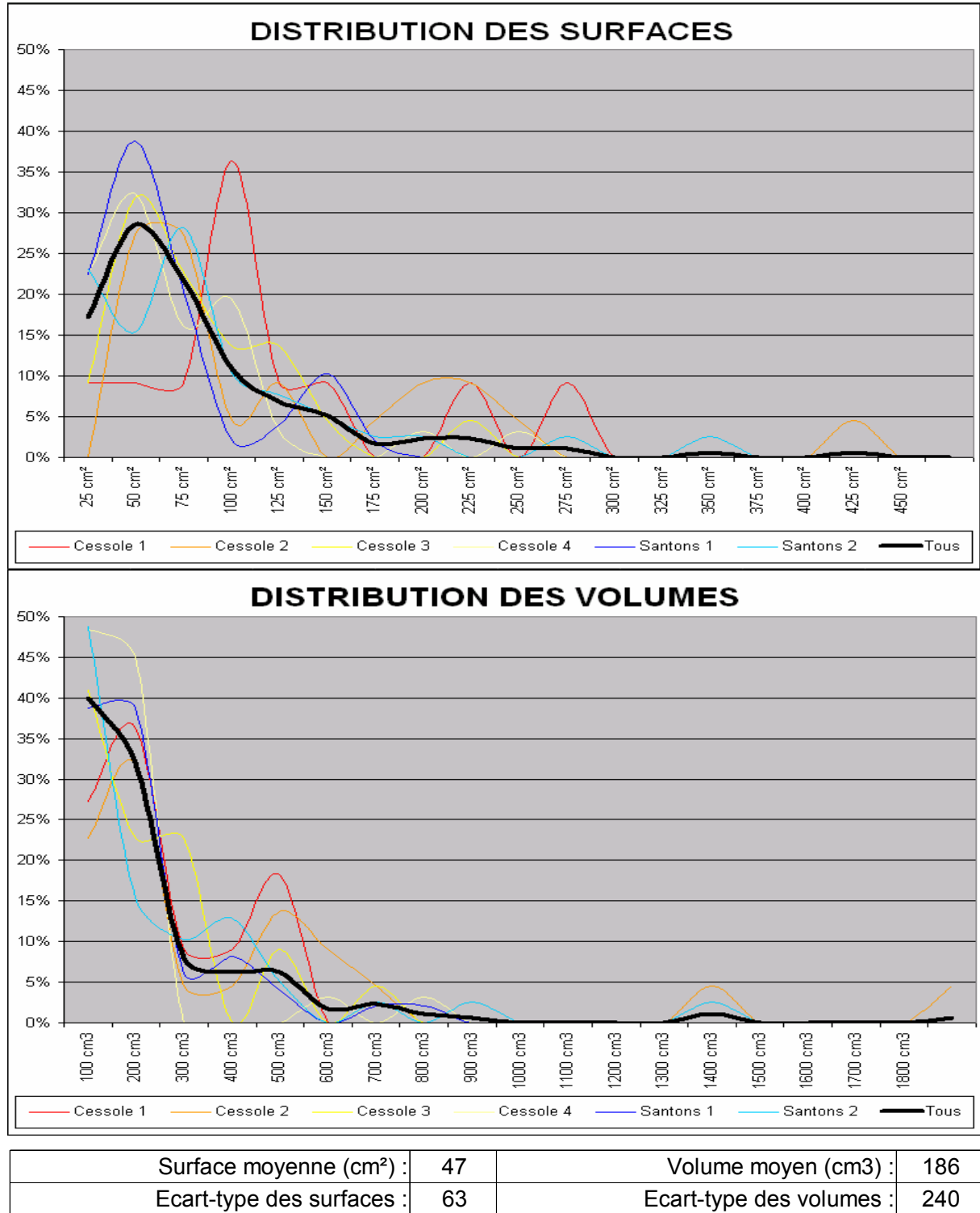


Fig. 50 : distribution des surfaces et des volumes des poches de substitution de la grotte du Chat

- La distribution des elliptismes semble chaotique et aléatoire lorsqu'on examine un carreau individuellement, cependant, sur le globalité des items, la courbe est certes quasiment linéaire, mais très fortement décroissante, indiquant une nette prépondérance des faibles elliptismes. La dispersion des valeurs est relativement faible, l'elliptisme

moyen étant de 19,8% avec un écart-type de 15%. Au global, 77,7 % des poches ne s'écartent pas de plus de 30 % du cercle parfait : il ne semble donc pas que le processus de corrosion obéisse à un tropisme directionnel, gravitaire ou autre. Sur le terrain, cela se perçoit par une certaine standardisation de la forme subcirculaire.

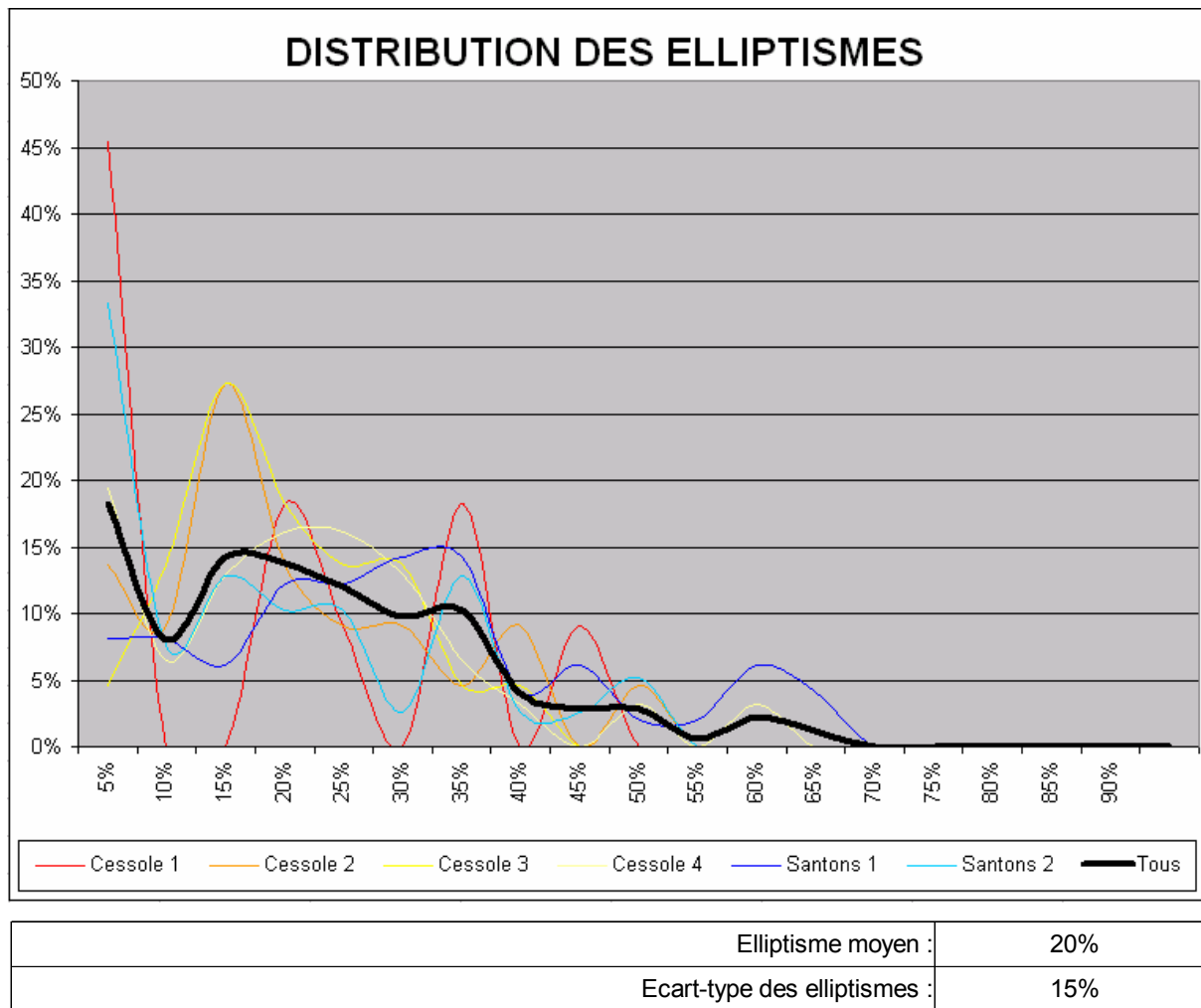


Fig. 51 : distribution des elliptismes des poches de substitution de la grotte du Chat

- La distribution des forations s'ajuste indiscutablement à une courbe de Gauss, certes ponctuellement altérée par les imperfections du protocole et des effets de composition de cloches mais fortement marquée par rapport à nos tableaux-étalon, et dont le sommet se situe aux alentours de 70 % ; en fait, en raison de l'asymétrie de la cloche, la moyenne est de 88%, avec un écart-type de 31%,

révélant une faible dispersion des forations autour de la moyenne. Il existe donc un attracteur qui fait tendre le creusement des poches de substitution vers la demi-sphère, sans pour autant que cette conformation soit limite puisque les poches de substitution plus creuses qu'une hémisphère (forations dites « aberrantes ») représentent plus de 27 % des items.

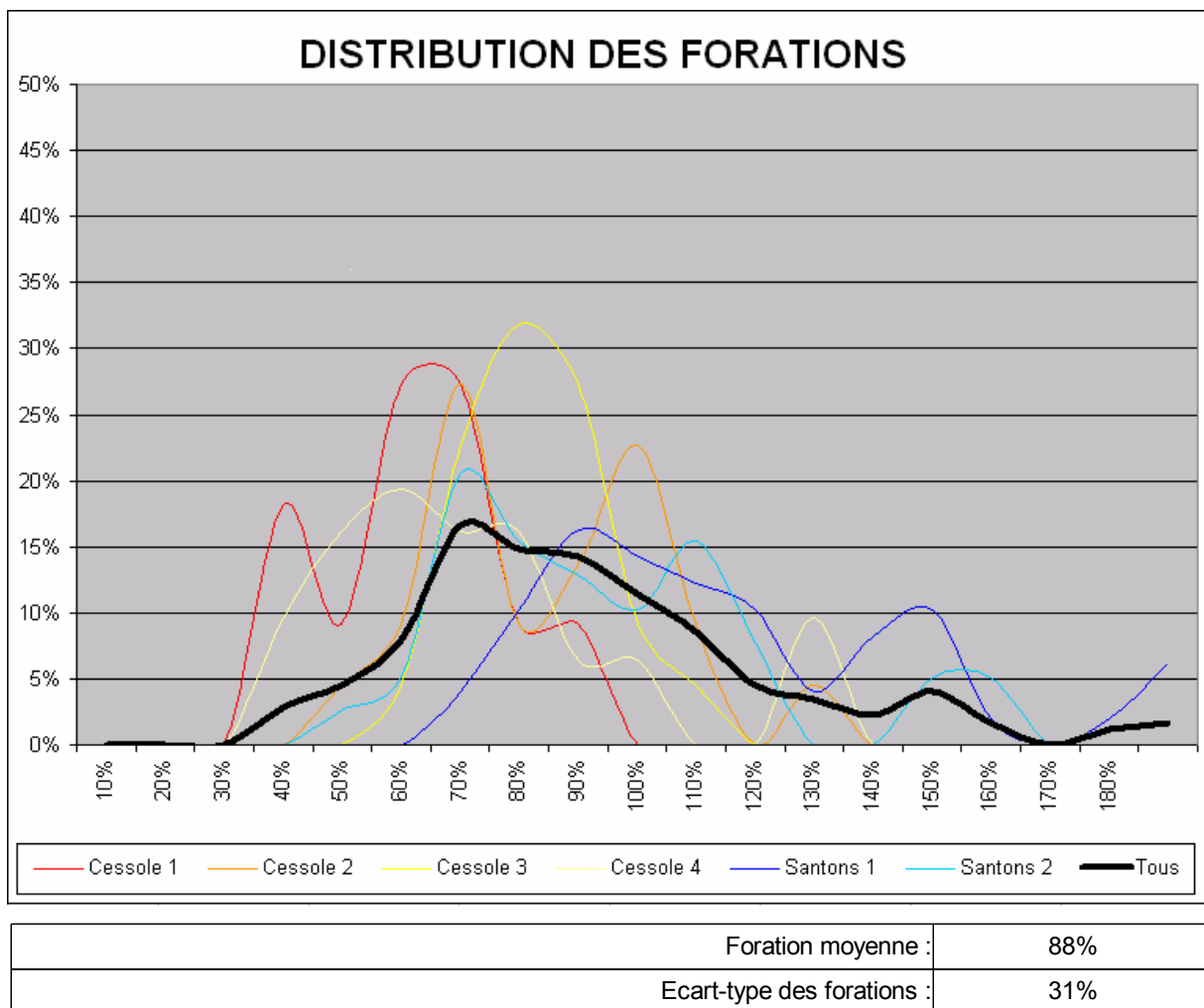


Fig. 52 : distribution des forations des poches de substitution de la grotte du Chat

Nous examinerons maintenant les caractéristiques individuelles des carreaux de mesure dans l'ordre où ils ont été relevés, c'est-à-dire du fond de la galerie de Cessole vers la salle des Santons :

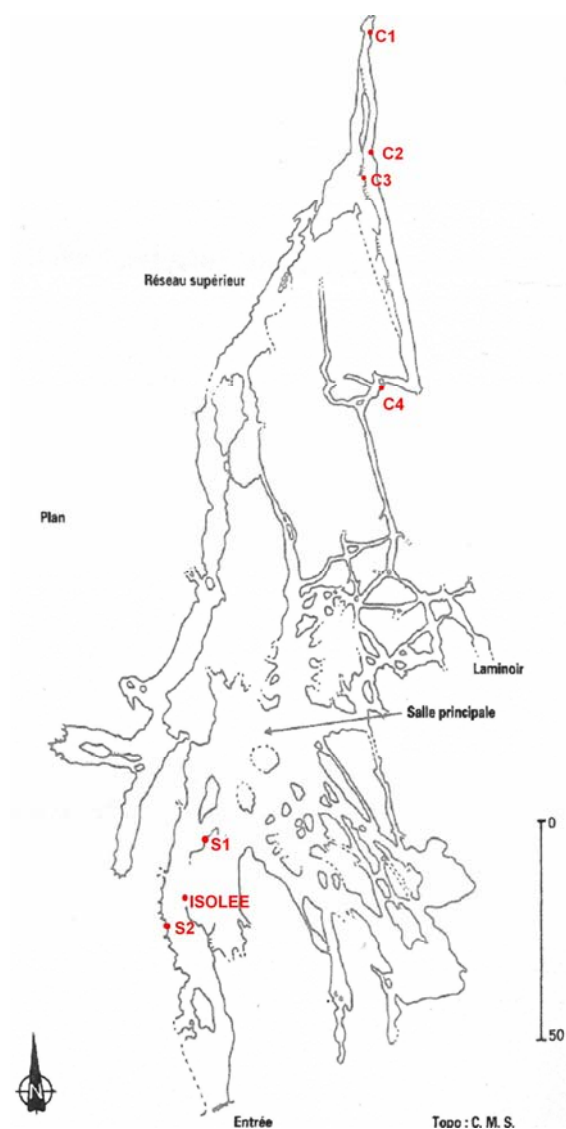


Fig. 53 : situation des carreaux de mesure dans la grotte du Chat

- Cessole 1 : il a été relevé dans la petite salle précédant le terminus Cessole, très en hauteur, au dessus d'une large fissure émissive décimétrique. 11 poches de substitution occupent le carreau. Les courbes de répartition des surfaces et des volumes semblent isoler une famille d'objets dont les surfaces dépassent 200 cm<sup>2</sup> et les volumes 400 cm<sup>3</sup> ; il s'agit des items C1/2 et C1/10 qui sont de formes subcirculaires comme c'est le cas général dans ce carreau (elliptisme moyen 16%), mais dont la profondeur n'est pas supérieure à celle d'autres poches de substitution de plus petites dimensions. Il

y a lieu de supposer que ces objets résultent de la coalescence de plusieurs poches de substitution, ce qui a échappé aux premières lectures. La courbe de distribution des profondeurs relatives est proche d'une courbe de Gauss centrée vers 60%. La corrosion globale est relativement faible ici, de l'ordre de 1900 cm<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.

- Cessole 2 : il a été relevé dans une petite salle de la section terminale de la galerie de Cessole, en contrebas du terminus du réseau supérieur. Au sud de cette salle existe un indice intéressant quant à la tectogenèse dans la cavité :



Fig. 54 : phase tectonique antérieure à la spéléogenèse, reprise par un rejeu néotectonique (Photo JC d'A-N)

la galerie est axée sur une diaclyse dont les deux compartiments portent des formes d'érosion décalées subhorizontalement de quelques centimètres, indiquant un rejeu néotectonique postérieur au creusement ; or, un banc de silex est de façon très évidente décalé verticalement d'une quarantaine de centimètres d'un compartiment sur l'autre (il apparaît sur la photo comme deux bandes sombres décalées verticalement, perpendiculaires à la diaclyse évidente), ce qui implique une phase tectonique primitive antérieure au creusement de la cavité. Malgré cette fracturation, on n'observe au sol aucune fissure émissive.

Les courbes de répartition de surfaces et de volumes ont une allure générale voisine de celles de C1, avec ici aussi deux items nettement marginaux : C2/19 et C2/3d. Ce dernier a été identifié comme faisant partie d'un ensemble de poches de substitution coalescentes, mais il est probable qu'il a été insuffisamment résolu. La courbe de distribution des profondeurs relatives est ici aussi proche d'une courbe en cloche, mais, alors que les arrivées de flux profonds étaient en ce point probablement moins massives qu'en C1, les valeurs de corrosion sont bien supérieures, avec une foration moyenne de plus de 80% (contre 58 en C1), et une surface corrodée de près de 40% (contre 17 en C1).

- Cessole 3 : il a été relevé à quelques mètres de C2, à la même hauteur, donc avec un positionnement dans la galerie comparable à celui de C2 ; la galerie est en C3 plus confinée qu'en C2, et on a en C3 une fissure émissive au sol tout à fait significative : or les valeurs de corrosion sont beaucoup plus faibles qu'en C2, relativement proches de celles de C1 (3100 cm<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>). En revanche, les courbes de distribution des surfaces et des volumes sont encore une fois voisines de celles de C1 et de C2, avec une superbe courbe en cloche centrée sur 80% pour les forations.

- Cessole 4 : il a été relevé dans la baïonnette de la galerie, pratiquement au dessus d'un conduit hypogène relativement important développé à la faveur du croisement de deux diaclases. De nombreuses poches de substitution coalescentes ont été dissociées dans ce carreau, de sorte que la distribution des surfaces et des volumes est relativement préservée d'items marginaux ; dans

ces conditions, la distribution paraît assez régulière. La dissociation de poches de substitution coalescentes induit en revanche trois valeurs de foration aberrantes qui produisent un pic artificiel dans la courbe correspondante, vers 120%. Malgré un effectif de poches de substitution plus important, la corrosion n'est guère plus significative (3378 cm<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>) en raison d'une surface et d'une profondeur moyennes plus faibles.

- Santons 1 et Santons 2 : on trouve sur ces panneaux, situés dans deux parties relativement séparées de la vaste salle principale, un nombre très important de poches de substitution (70 au m<sup>2</sup> environ) de petites dimensions mais souvent coalescentes, avec une foration importante : dans S1, la moitié des poches de substitution est plus creuse qu'une demi-sphère ! Les courbes de répartition de ces deux carreaux sont très voisines. La corrosion est importante ici, autant qu'à Cessole 2 (environ 6900 cm<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>).



	Cessole 1	Cessole 2	Cessole 3	Cessole 4	Santons 1	Santons 2	Tous
Densité poches de substitution au m <sup>2</sup> :	17	34	33	52	77	65	<b>47</b>
Surface moyenne (cm <sup>2</sup> ) :	110	117	73	62	53	75	<b>74</b>
<i>Ecart-type des surfaces :</i>	71	94	46	48	41	68	<b>63</b>
% surface corrodée en poches de substitution :	17%	39%	23%	31%	40%	44%	<b>32%</b>
Volume moyen (cm <sup>3</sup> ) :	197	370	169	114	157	189	<b>186</b>
<i>Ecart-type des volumes :</i>	149	432	160	151	156	257	<b>240</b>
Volume de calcaire substitué (cm <sup>3</sup> ) :	1869	7038	3123	3378	6833	6914	<b>29314</b>
Soit lame équivalente (cm) :	0,3	1,3	0,6	0,6	1,2	1,2	<b>0,9</b>
Elliptisme moyen :	16%	18%	18%	19%	27%	16%	<b>20%</b>
<i>Ecart-type des elliptismes :</i>	15%	12%	9%	14%	16%	15%	<b>15%</b>
Foration moyenne :	58%	81%	78%	68%	111%	91%	<b>88%</b>
Foration aberrantes :	0%	14%	5%	10%	55%	33%	<b>27%</b>
<i>Ecart-type des forations :</i>	14%	19%	12%	23%	32%	27%	<b>31%</b>
Hauteur sol/carreau :	2,00	1,40	1,00	1,20	1,00	1,50	
Distance à la diaclase :	2,00	7,00	1,30	1,80	?	?	
Largeur de la diaclase au sol :	0,10	0,05	0,05	0,40	?	?	
Hauteur galerie :	3,00	2,00	3,00	2,50	6,00	2,50	
Largeur galerie :	1,20	1,20	0,50	0,50	4,00	0,60	
Distance entrée :	265	240	234	175	40	94	
Distance centre salle des Santons :	165	120	114	55	40	30	

## 6. Conclusions

- Morphologie des poches de substitution : les attracteurs qui ressortent de l'étude de la morphométrie des poches de substitution tendent vers des formes simples proche de la demi-sphère ; les elliptiques sont faibles, et, bien que l'on n'ait pas relevé les inclinaisons grand axe et petit axe, il n'apparaît pas sur le terrain d'orientation préférentielle des elliptismes. L'ensemble implique des phénomènes non pas d'érosion dynamique, mais de corrosion en conditions relativement isotropes, suggérant une altération de contact progressant dans la masse calcaire à partir d'un germe ponctuel par diffusion uniforme d'un front d'altération ou de dissolution. Les distributions relativement linéaires des volumes et des surfaces indiquent que le phénomène s'est déroulé de façon relativement régulière et monophasée.

- Relation spatiale entre les poches de substitution et la cavité : la répartition des poches de substitution confirme une formation en conditions exondées, y compris pour celles qui sont positionnées sur une surface horizontale.

En préambule, nous avons supposé que la formation des poches de substitution a été dopée localement, soit par la proximité des exurgences de fluides chargés, soit par un plus grand confinement, soit par l'influence d'une stratification de l'atmosphère de la galerie ; or les valeurs de corrosion relevées en C2, en contexte confiné et loin d'un point d'émission, sont du même ordre que celles relevées dans la salle des Santons, véritable barycentre de la corrosion, et doubles de celles relevées auprès de fissures émissives à quelques mètres de C2 : ceci tend à prouver que la proximité des points d'émergence n'est pas un facteur prépondérant, et que la relation entre le volume de la galerie et la densité de la population de poches de substitution / l'intensité de la corrosion n'est pas univoque. S'il demeure flagrant que des facteurs multiples (la proximité de points d'émergence de fluides profonds et les variations thermiques que cela induit, la dimension de ces conduits ou cheminées et les volumes de fluides hydrothermaux « frais » au voisinage du point considéré, peut-être le volume aéré de la galerie) concourent à moduler l'intensité de la corrosion, aucun attracteur ne révèle en l'état la prépondérance de l'un ou l'autre de ces facteurs, dont les interactions sont manifestement complexes. Il semble même qu'intervienne un effet de corrosion-retard en aval des points d'émission de fluide hypogène, lié au délai d'oxydation de l'H<sub>2</sub>S.

Ces observations impliquent un mécanisme de corrosion multifactoriel, peut-être en partie

biogénique, et probablement lié à la géométrie de la cavité.

- La place des poches de substitution dans les formes de corrosion sulfurique aérienne : il existe plusieurs types de corrosion aérienne en contexte hypogène. Une première famille de formes de corrosion dérive des ruissellements chargés d'acide sulfurique, d'origine biogénique ou purement chimique : lapiès, rigoles, chenaux et surcreusements. L'oxydation de l'hydrogène sulfuré étant intense au contact de l'oxygène de l'air, une seconde grande famille de formes de corrosion dérive des convections et circulations d'air chargé de gaz ou d'aérosols corrosifs : chenaux de voûte et coupoles évoluant parfois en cheminées. Ces formes sont toutes représentées dans la grotte du Chat.

L'absence d'orientation préférentielle des poches de substitution prouve qu'elles ne sont pas formées par l'action de ruissellements, et suggère que la ségrégation entre poches de substitution et coupoles de corrosion est essentiellement liée à la dynamique aérologique : le développement de convections provoquant d'amples formes de coupoles et de chenaux de voûte rabotés par les courants d'air chargés d'H<sub>2</sub>S gazeux oxydable ou d'aérosols acides, tandis que l'isotropie (c'est-à-dire l'inertie totale) de l'atmosphère aboutit plutôt à des processus localisés où la diffusion de condensats acides par capillarité est prépondérante. Dans cette ségrégation interviennent donc, entre autres facteurs, la communication aérologique avec l'exokarst ou a contrario le confinement de la cavité, la température du milieu et de l'eau, mais aussi la géométrie des conduits qui peuvent localement ménager dans les voûtes des poches où l'air chaud est stable, non influencé par les circulations aérologiques de la galerie.

Les poches de substitution constituent donc une famille à part entière dans les formes de corrosion sulfuriques.

Une comparaison de cette étude avec une approche morphométrique semblable menée sur des cupules de dissolution en milieu noyé reste à faire, ce qui, hors contexte hypogène, peut s'avérer difficile voire impossible faute d'items : ainsi, lors de la visite du réseau épinoyé de Saint Benoît, nous avons emporté vainement notre matériel de carroyage, car sur les 600 mètres de la galerie principale, aucune forme pariétale ne ressemble de près ou de loin à ces poches de substitution. Quant à déployer un cadre de 0,75 x 0,75 dans le réseau Camille, nous ne l'avons même pas envisagé...



Carreau	Item	Longueur cm	Largeur cm	Profondeur cm	Elliptisme	Foration	Surface cm <sup>2</sup>	Diamètre équivalent cm	Volume cm <sup>3</sup>	En limite de carroyage ?	Note
Cessole 1	C1/1	12,5	12,5	4,0	0%	64%	122,7	12,5	278,8	o	
Cessole 1	C1/2	18,0	18,0	3,5	0%	39%	254,3	18,0	467,5	o	
Cessole 1	C1/3	10,5	10,0	2,0	5%	39%	82,4	10,2	86,6	o	
Cessole 1	C1/4	13,0	8,5	3,0	35%	57%	86,7	10,5	144,3		
Cessole 1	C1/5	9,8	9,5	4,0	3%	83%	73,1	9,6	179,7		
Cessole 1	C1/6	9,0	5,4	2,0	40%	57%	38,2	7,0	42,3		
Cessole 1	C1/7	13,3	8,7	3,3	35%	61%	90,8	10,8	168,7		
Cessole 1	C1/8	15,0	11,7	4,0	22%	60%	137,8	13,2	309,0		
Cessole 1	C1/9	4,3	4,2	1,6	2%	75%	14,2	4,2	13,5		
Cessole 1	C1/10	18,0	15,0	3,8	17%	46%	212,0	16,4	431,4		
Cessole 1	C1/11	12,2	10,0	3,1	18%	56%	95,8	11,0	164,0		
Cessole 2	C2/1	15,4	12,7	5,2	18%	74%	153,5	14,0	472,8	o	
Cessole 2	C2/2	7,1	6,1	1,6	14%	49%	34,0	6,6	29,3	o	
Cessole 2	C2/3a	13,9	10,7	5,7	23%	94%	116,8	12,2	429,7		coalescentes
Cessole 2	C2/3b	21,0	11,0	4,7	48%	62%	181,3	15,2	480,5		coalescentes
Cessole 2	C2/3c	9,0	6,3	3,1	30%	82%	44,5	7,5	84,6		coalescentes
Cessole 2	C2/3d	18,5	16,5	8,4	11%	96%	239,6	17,5	1316,7		coalescentes
Cessole 2	C2/4	19,0	15,0	4,6	21%	55%	223,7	16,9	565,5		
Cessole 2	C2/5	7,4	7,4	3,7	0%	100%	43,0	7,4	106,0		
Cessole 2	C2/6	19,0	12,2	5,3	36%	70%	182,0	15,2	560,2		
Cessole 2	C2/7	17,0	16,0	5,3	6%	64%	213,5	16,5	643,8		
Cessole 2	C2/8	10,4	7,8	3,0	25%	67%	63,7	9,0	109,7	o	
Cessole 2	C2/9	12,3	10,6	5,4	14%	95%	102,3	11,4	358,8		
Cessole 2	C2/10	8,5	7,4	3,9	13%	98%	49,4	7,9	127,3		
Cessole 2	C2/11	12,0	7,5	4,3	38%	90%	70,7	9,5	190,3		
Cessole 2	C2/12	8,0	7,7	3,0	4%	76%	48,4	7,8	86,7	o	
Cessole 2	C2/13	9,7	8,0	4,4	18%	100%	60,9	8,8	178,6	o	
Cessole 2	C2/14	7,2	6,4	3,6	11%	106%	36,2	6,8	89,5		
Cessole 2	C2/15	9,6	8,8	2,7	8%	59%	66,3	9,2	99,8		
Cessole 2	C2/16	9,9	8,7	5,7	12%	123%	67,6	9,3	289,7		
Cessole 2	C2/17	11,0	7,9	4,0	28%	86%	68,2	9,3	169,9		
Cessole 2	C2/18	11,8	9,9	3,5	16%	65%	91,7	10,8	182,9		
Cessole 2	C2/19	23,0	23,0	7,6	0%	66%	415,3	23,0	1807,9	o	
Cessole 3	C3/1	10,0	8,7	4,4	13%	94%	68,3	9,3	194,9	o	
Cessole 3	C3/2	8,4	7,5	2,1	11%	53%	49,5	7,9	56,8	o	
Cessole 3	C3/3a	12,3	10,4	4,4	15%	78%	100,4	11,3	265,5	o	coalescentes
Cessole 3	C3/3b	13,2	11,8	5,5	11%	88%	122,3	12,5	423,4	o	coalescentes
Cessole 3	C3/4a	12,8	9,4	3,9	27%	71%	94,5	11,0	215,2		coalescentes
Cessole 3	C3/4b	9,2	8,0	3,7	13%	86%	57,8	8,6	133,4		coalescentes
Cessole 3	C3/5	11,4	9,3	4,2	18%	82%	83,2	10,3	213,6		
Cessole 3	C3/6	9,2	6,9	3,0	25%	75%	49,8	8,0	88,9	o	
Cessole 3	C3/7	9,5	8,2	3,0	14%	68%	61,2	8,8	105,9		
Cessole 3	C3/8	10,9	10,3	4,4	6%	83%	88,1	10,6	238,5		
Cessole 3	C3/9	19,0	14,7	5,3	23%	63%	219,3	16,7	659,0	o	
Cessole 3	C3/10	17,0	10,5	5,4	38%	81%	140,1	13,4	460,8		
Cessole 3	C3/11a	7,4	5,7	2,2	23%	68%	33,1	6,5	42,0		coalescentes
Cessole 3	C3/11b	6,9	5,6	3,2	19%	103%	30,3	6,2	65,7		coalescentes
Cessole 3	C3/12	8,7	6,6	2,8	24%	74%	45,1	7,6	74,6		
Cessole 3	C3/13a	9,5	8,6	3,9	9%	86%	64,1	9,0	156,1		coalescentes
Cessole 3	C3/13b	4,9	4,8	1,9	2%	78%	18,5	4,8	21,1		coalescentes
Cessole 3	C3/14	5,6	5,2	1,7	7%	63%	22,9	5,4	22,0		
Cessole 3	C3/15	7,7	6,5	2,4	16%	68%	39,3	7,1	54,4		
Cessole 3	C3/16	14,2	9,6	4,4	32%	75%	107,0	11,7	280,0		
Cessole 3	C3/17	8,6	7,4	3,1	14%	78%	50,0	8,0	93,0	o	
Cessole 3	C3/18	10,2	7,2	4,0	29%	93%	57,7	8,6	148,8		

Carreau	Item	Longueur cm	Largeur cm	Profondeur cm	Elliptisme	Foration	Surface cm <sup>2</sup>	Diamètre équivalent cm	Volume cm <sup>3</sup>	En limite de carroyage ?	Note
Cessole 4	C4/1	10,5	8,7	3,2	17%	67%	71,7	9,6	131,9		
Cessole 4	C4/2	7,0	3,8	1,8	46%	70%	20,9	5,2	21,8		
Cessole 4	C4/3	10,2	8,4	2,1	18%	45%	67,3	9,3	75,5		
Cessole 4	C4/4	5,6	5,4	1,0	4%	36%	23,7	5,5	12,4		
Cessole 4	C4/5	6,4	4,1	1,8	36%	70%	20,6	5,1	21,6		
Cessole 4	C4/6	4,9	4,1	1,6	16%	71%	15,8	4,5	14,8		
Cessole 4	C4/7	20,5	14,3	5,4	30%	63%	230,1	17,1	703,8	o	
Cessole 4	C4/8	15,5	15,1	5,5	3%	72%	183,7	15,3	592,4		
Cessole 4	C4/9	8,0	8,0	3,5	0%	88%	50,2	8,0	110,4		
Cessole 4	C4/10	6,5	6,5	2,6	0%	80%	33,2	6,5	52,3		
Cessole 4	C4/11	8,7	6,5	2,6	25%	69%	44,4	7,5	66,9		
Cessole 4	C4/12a	8,2	7,2	4,6	13%	120%	46,0	7,7	156,8		coalescentes
Cessole 4	C4/12b	8,2	7,2	4,6	13%	120%	46,0	7,7	156,8		coalescentes
Cessole 4	C4/12c	8,2	7,2	4,6	13%	120%	46,0	7,7	156,8		coalescentes
Cessole 4	C4/13	16,7	7,2	2,1	57%	38%	94,4	11,0	104,0	o	
Cessole 4	C4/14	7,5	6,1	2,0	19%	59%	35,9	6,8	40,1		
Cessole 4	C4/15	9,6	7,6	2,1	21%	49%	57,3	8,5	65,0		
Cessole 4	C4/16	7,4	6,3	2,0	15%	59%	36,6	6,8	40,8		
Cessole 4	C4/17	13,7	10,9	2,3	20%	38%	117,2	12,2	141,2		
Cessole 4	C4/18a	6,4	4,7	1,9	27%	69%	23,6	5,5	26,0		coalescentes
Cessole 4	C4/18b	9,1	7,0	3,9	24%	98%	49,6	8,0	127,9		coalescentes
Cessole 4	C4/18c	9,1	7,0	3,9	24%	98%	49,6	8,0	127,9		coalescentes
Cessole 4	C4/19	6,8	5,2	2,1	24%	71%	27,8	5,9	34,0		
Cessole 4	C4/20a	10,3	9,8	3,0	5%	60%	78,8	10,0	132,4		coalescentes
Cessole 4	C4/20b	10,3	9,8	3,0	5%	60%	78,8	10,0	132,4		coalescentes
Cessole 4	C4/20c	4,4	4,4	1,0	0%	45%	15,2	4,4	8,1		coalescentes
Cessole 4	C4/21a	10,4	8,8	2,3	15%	48%	71,8	9,6	89,0		coalescentes
Cessole 4	C4/21b	12,3	8,4	2,4	32%	47%	81,1	10,2	104,6		coalescentes
Cessole 4	C4/22a	13,0	9,5	3,1	27%	56%	96,9	11,1	165,9		coalescentes
Cessole 4	C4/22b	13,0	9,5	3,1	27%	56%	96,9	11,1	165,9		coalescentes
Cessole 4	C4/23	3,1	3,1	1,1	0%	71%	7,5	3,1	4,8	o	

Carreau	Item	Longueur cm	Largeur cm	Profondeur cm	Elliptisme	Foration	Surface cm²	Diamètre équivalent cm	Volume cm³	En limite de carroyage ?	Note
Santons 1	S1/1	10,3	7,3	5,0	29%	115%	59,0	8,7	213,0	o	
Santons 1	S1/2	7,8	6,2	3,5	21%	101%	38,0	7,0	88,9	o	
Santons 1	S1/3	14,6	6,4	4,2	56%	87%	73,4	9,7	192,8	o	
Santons 1	S1/4	6,7	5,9	2,5	12%	80%	31,0	6,3	47,0		
Santons 1	S1/5	11,4	7,2	3,9	37%	86%	64,4	9,1	156,7		
Santons 1	S1/6	6,0	5,7	2,7	5%	92%	26,8	5,8	46,5		
Santons 1	S1/7	5,6	4,2	2,2	25%	91%	18,5	4,8	25,9		
Santons 1	S1/8	6,5	5,4	3,1	17%	105%	27,6	5,9	58,3		
Santons 1	S1/9	7,2	7,0	5,0	3%	141%	39,6	7,1	164,4		
Santons 1	S1/10	3,8	2,9	2,2	24%	133%	8,7	3,3	15,1		
Santons 1	S1/11	6,7	6,2	3,7	7%	115%	32,6	6,4	86,8		
Santons 1	S1/12	6,7	4,9	3,5	27%	122%	25,8	5,7	67,5		
Santons 1	S1/13	13,0	9,5	4,5	27%	81%	96,9	11,1	265,8		
Santons 1	S1/14	11,1	5,5	3,7	50%	95%	47,9	7,8	115,2	o	
Santons 1	S1/15	11,0	8,4	4,0	24%	83%	72,5	9,6	178,6		
Santons 1	S1/16	22,0	7,8	4,8	65%	73%	134,7	13,1	381,2		
Santons 1	S1/17	9,4	4,2	2,2	55%	70%	31,0	6,3	39,7		
Santons 1	S1/18	5,1	4,3	2,2	16%	94%	17,2	4,7	24,5		
Santons 1	S1/19	3,5	2,8	2,9	20%	185%	7,7	3,1	23,9		
Santons 1	S1/20	7,8	5,2	4,9	33%	154%	31,8	6,4	139,6		
Santons 1	S1/21	3,8	2,5	1,5	34%	97%	7,5	3,1	7,4		
Santons 1	S1/22	8,9	7,3	3,3	18%	82%	51,0	8,1	103,0		
Santons 1	S1/23	10,1	6,0	4,3	41%	109%	47,6	7,8	141,3		
Santons 1	S1/24	14,0	12,3	4,8	12%	73%	135,2	13,1	382,3	o	
Santons 1	S1/25	18,0	11,0	6,9	39%	98%	155,4	14,1	708,2		
Santons 1	S1/26	22,0	8,5	4,5	61%	66%	146,8	13,7	378,0		
Santons 1	S1/27	9,7	8,8	2,8	9%	61%	67,0	9,2	105,3	o	
Santons 1	S1/28	10,0	8,0	5,4	20%	121%	62,8	8,9	252,0		
Santons 1	S1/29	4,1	4,1	3,7	0%	181%	13,2	4,1	50,9		
Santons 1	S1/30	8,5	6,9	4,3	19%	111%	46,0	7,7	138,0	o	
Santons 1	S1/31	8,7	6,0	5,2	31%	144%	41,0	7,2	180,2		
Santons 1	S1/32	7,5	5,1	3,1	32%	100%	30,0	6,2	62,1		
Santons 1	S1/33	4,0	3,4	2,5	15%	136%	10,7	3,7	21,5		
Santons 1	S1/34	3,2	2,3	2,0	28%	147%	5,8	2,7	10,0		
Santons 1	S1/35	9,4	5,0	4,0	47%	117%	36,9	6,9	107,3		
Santons 1	S1/36	5,5	4,5	3,4	18%	137%	19,4	5,0	53,6		
Santons 1	S1/37	5,5	5,2	3,6	5%	135%	22,5	5,3	64,8		
Santons 1	S1/38	11,1	6,3	4,3	43%	103%	54,9	8,4	159,7		
Santons 1	S1/39	8,0	5,8	5,1	28%	150%	36,4	6,8	162,3		
Santons 1	S1/40	4,7	3,4	3,5	28%	175%	12,5	4,0	44,4	o	
Santons 1	S1/41	11,5	11,2	5,0	3%	88%	101,1	11,3	318,2		
Santons 1	S1/42	8,4	5,8	5,1	31%	146%	38,2	7,0	167,0		
Santons 1	S1/43	8,4	7,5	4,4	11%	111%	49,5	7,9	153,4		
Santons 1	S1/44	19,5	8,0	5,6	59%	90%	122,5	12,5	434,8		
Santons 1	S1/45	16,0	11,2	5,3	30%	79%	140,7	13,4	450,7	o	
Santons 1	S1/46	16,0	10,5	7,0	34%	108%	131,9	13,0	641,2	o	
Santons 1	S1/47	9,3	7,4	4,1	20%	99%	54,0	8,3	146,8		
Santons 1	S1/48	9,0	8,8	4,0	2%	90%	62,2	8,9	157,9		
Santons 1	S1/49	7,8	4,5	5,6	42%	189%	27,6	5,9	169,1	o	

Carreau	Item	Longueur cm	Largeur cm	Profondeur cm	Elliptisme	Foration	Surface cm <sup>2</sup>	Diamètre équivalent cm	Volume cm <sup>3</sup>	En limite de carroyage ?	Note
Santons 2	S2/1	9,9	8,9	2,8	10%	60%	69,2	9,4	108,3		
Santons 2	S2/2	10,2	6,8	2,3	33%	55%	54,4	8,3	69,0	o	
Santons 2	S2/3	4,0	3,2	1,8	20%	<b>101%</b>	10,0	3,6	12,1		
Santons 2	S2/4a	4,9	4,9	2,4	0%	98%	18,8	4,9	29,9		coalescentes
Santons 2	S2/4b	7,4	6,5	2,7	12%	78%	37,8	6,9	61,3		coalescentes
Santons 2	S2/4c	10,0	6,7	3,0	33%	73%	52,6	8,2	93,0		coalescentes
Santons 2	S2/4d	7,5	4,1	2,4	45%	87%	24,1	5,5	36,2		coalescentes
Santons 2	S2/4e	4,6	4,6	2,7	0%	<b>117%</b>	16,6	4,6	32,7		coalescentes
Santons 2	S2/4f	5,6	5,1	2,9	9%	<b>109%</b>	22,4	5,3	45,3		coalescentes
Santons 2	S2/4g	5,1	5,1	2,7	0%	<b>106%</b>	20,4	5,1	37,9		coalescentes
Santons 2	S2/5	13,7	10,6	4,1	23%	68%	114,0	12,0	269,8	o	
Santons 2	S2/6	7,0	5,7	2,2	19%	70%	31,3	6,3	40,0		
Santons 2	S2/7	11,7	7,3	2,0	38%	43%	67,0	9,2	71,2		
Santons 2	S2/8	12,8	12,3	4,0	4%	64%	123,6	12,5	280,7		
Santons 2	S2/9	16,0	11,6	5,4	28%	79%	145,7	13,6	475,8		
Santons 2	S2/10	15,0	8,2	5,2	45%	94%	96,6	11,1	324,7		
Santons 2	S2/11	2,7	2,3	1,9	15%	<b>153%</b>	4,9	2,5	8,2		
Santons 2	S2/12	1,7	1,4	1,2	18%	<b>149%</b>	1,9	1,5	1,9		
Santons 2	S2/13	10,3	7,0	2,9	32%	68%	56,6	8,5	94,8		
Santons 2	S2/14	15,5	13,3	5,1	14%	71%	161,8	14,4	482,1		
Santons 2	S2/15	11,0	9,3	4,7	15%	93%	80,3	10,1	243,1		
Santons 2	S2/16a	7,6	7,6	3,1	0%	82%	45,3	7,6	85,9		coalescentes
Santons 2	S2/16b	8,0	8,0	3,7	0%	93%	50,2	8,0	119,5		coalescentes
Santons 2	S2/16c	6,3	6,3	3,4	0%	<b>108%</b>	31,2	6,3	73,5		coalescentes
Santons 2	S2/16d	9,2	9,2	4,1	0%	89%	66,4	9,2	172,3		coalescentes
Santons 2	S2/16e	6,8	6,8	4,0	0%	<b>118%</b>	36,3	6,8	106,1		coalescentes
Santons 2	S2/16f	9,5	9,5	3,3	0%	69%	70,8	9,5	135,7		coalescentes
Santons 2	S2/16g	10,0	10,0	4,3	0%	86%	78,5	10,0	210,4		coalescentes
Santons 2	S2/17	26,9	15,5	6,9	42%	68%	327,3	20,4	1301,2	o	
Santons 2	S2/18	16,0	14,3	6,0	11%	79%	179,6	15,1	651,9		
Santons 2	S2/19	8,5	7,7	2,6	9%	64%	51,4	8,1	76,0		
Santons 2	S2/20	9,8	7,5	4,3	23%	<b>100%</b>	57,7	8,6	165,7		
Santons 2	S2/21	12,3	9,9	5,8	20%	<b>105%</b>	95,6	11,0	379,4		
Santons 2	S2/22	5,6	5,2	4,0	7%	<b>148%</b>	22,9	5,4	79,2		
Santons 2	S2/23	9,4	7,4	6,3	21%	<b>151%</b>	54,6	8,3	302,9		
Santons 2	S2/24	6,3	6,3	3,7	0%	<b>117%</b>	31,2	6,3	84,2		
Santons 2	S2/25	22,0	14,7	5,6	33%	62%	253,9	18,0	802,8	o	
Santons 2	S2/26	16,0	11,0	4,7	31%	71%	138,2	13,3	379,0		
Santons 2	S2/27	12,3	12,3	5,2	0%	85%	118,8	12,3	382,4	o	
Santons 3	l1	6,4	5,8	5,4	10%	<b>178%</b>	28,9	6,1	160,4		Bords débordants

## D. L'actif associé à la grotte du Chat

*Jean-Claude D'ANTONI-NOBECOURT, avec la contribution de Catherine BABY et la participation de Guillaume ISNARD, Eric MADELAINE et Bruno SCANU*

### 1. Présentation de la source

Connue de très longue date, citée (mais non localisée) dans l'inventaire Créac'h, modestement utilisée à des fins touristiques par les guides de randonnée locaux, elle sourd dans le lit même du torrent le Riou, 90 mètres en contrebas de la grotte du Chat et à son aplomb exact, sur la même rive et dans la même dalle redressée de calcaire barrémien. Ses coordonnées Lambert III sont 956,562 / 3201,730 / 830.

Elle est très peu visible car son exutoire se trouve normalement sous le niveau de l'eau du torrent, mais elle se trahit par une puissante odeur d'hydrogène sulfuré (boules puantes, oeuf pourri) perceptible à plusieurs mètres. Quelques blocs l'entourent qui lui aménagent une sorte de vasque, où l'on peut constater que l'eau qui en sort est assez nettement tiède et laiteuse.



*Fig. 55 : l'émergence sulfureuse du Riou  
(Photo J-Y Bigot, nov. 2005)*

### 2. Un biotope spécifique

A l'intérieur de cette vasque, les parois sont recouvertes de filaments bactériens blancs, fins mais très fournis, centimétriques. Un prélèvement a été tenté, mais n'a pu être utilisé en laboratoire de bactériologie car les conditions du stage n'ont pas permis la bonne conservation de l'échantillon : il est nécessaire en effet d'acheminer le prélèvement en quelques heures maximum vers le lieu de mise en culture, ce qui pose quelques problèmes. Par ailleurs, on s'attend à trouver des souches bactériennes spécifiques aux milieux sulfurés, ce que tous les labos ne peuvent pas nécessairement traiter.

Des filaments bactériens blancs identiques peuvent être observés dans d'autres sources sulfurées froides ou tempérées, par exemple dans la source Huguette (Saint-Martin-les-Eaux – 04). D'autres formes d'agrégats bactériens sont observées dans les sources sulfurées chaudes, comme par exemple dans la source d'Alun (Aix-les-bains).

Les chercheurs ayant analysé des dépôts bactériens issus de cavités hypogènes actives (Barton & Luiszer 2005 - Journal of cave and karst studies 67 (1), p. 28-38) y ont séparé de nombreuses souches différentes associées, constituant une chaîne biochimique en partie anaérobie, où certaines bactéries transforment les sous-produits de l'activité biologique d'autres souches : la production de sulfures à partir des sulfates et d'acide sulfurique à partir des sulfures ne constitue dans le cycle complexe décrit par ces chercheurs que des maillons ponctuels et relativement tardifs.

A l'origine de la chaîne interviennent des matières carbonées, prélevées soit dans les roches lessivées, soit dans les remplissages, et métabolisées en lactates, en propionates et en acétates. En relation avec ces approches, il est à noter que le Trias des Alpes Maritimes contient notamment des passées charbonneuses, qui furent par exemple exploitées



dans les mines de Lignite de Vescagne, dans la haute vallée de la Cagne : de telles passées peuvent fournir le carbone métabolisable nécessaire aux colonies bactériennes sulforéductrices à l'origine de la corrosion sulfurique dans la grotte du Chat. Les

marnes noires néocomiennes au contact desquelles se développe le système sont également riches en matières organiques diffuses (à plus proprement parler carbonées) qui ont pu également alimenter ce processus.

### 3. Caractéristiques physico-chimiques

Le 1<sup>er</sup> Novembre 2005, la température de la source était de 17,5°C, alors que celle du torrent était de 11°C (mesures Ph. Audra) ; lors du stage, le 18 Mars 2006, la température de la source était de 17,5° et celle du torrent de 6,7°C (mesures E. Gilli) ; la grotte du Chat est quant à elle entre 11°C (mesure prise en Novembre 2005) et 12,5°C (mesure prise au terminus Cessole en Avril 2006) ; dans son inventaire spéléologique, Y. Créach la crédite de 12,7° C.

La conductivité rapportée à 25°C a été mesurée à 417 $\mu\text{s.m}^{-1}$ , contre 217 $\mu\text{s.m}^{-1}$  pour l'eau du torrent (mesures E. Gilli au cours du stage).



Fig. 56 : mesures physiques et échantillonnage dans la source sulfureuse (Photo J-C d'A-N)

On constate que :

- La température de la source est très nettement supérieure à la température moyenne annuelle locale et à celle de l'endokarst, ce qui indique un transit en zone profonde ; la température de l'endokarst étant estimée de l'ordre de 11°C, compte tenu du gradient géothermique général qui est de 1°C pour 33 mètres, le différentiel thermique de 6,5°C implique que l'eau provient de 200 mètres au moins sous la surface ; en réalité, des échanges thermiques très significatifs entre l'eau et l'encaissant se produisent nécessairement au cours de l'ascension, de sorte que cette estimation est assurément sous-évaluée.

- Elle paraît très stable, et semble influencée ni par les conditions extérieures, ni par la température des

eaux de ruissellement : on peut donc supposer soit qu'elle reçoit des apports épigènes négligeables (et qu'elle est dans ce cas strictement hydrothermale), soit que les eaux qu'elle restitue ont un temps de transit important à travers un système de drainage peu transmissif, ce qui amortit les variations de température et de débit. Deux mesures sont insuffisantes pour en décider, seule une surveillance régulière et prolongée des variations de débit et de température de la source permettrait de mieux approcher ce point.

Globalement, la minéralisation de la source hydrothermale du Riou est nettement marquée par les chlorures et les sulfates de sodium et de calcium ; elle est d'ailleurs plus sodique que calcique, et salée autant que séléniteuse (est dite « séléniteuse » une eau chargée de sulfate de calcium) : c'est sans aucun doute la signature des évaporites du Trias lessivées en zone profonde.

Compte tenu de la spectaculaire odeur de sulfure d'hydrogène, de la couleur de l'eau et du creusement de la grotte, on s'attend à ce qu'au laboratoire apparaisse une très forte présence de sulfates et de sulfures ; or, l'analyse chimique (voir tableau) révèle une minéralisation en sulfates nette mais relativement modérée : un peu moins de 40 mg.l<sup>-1</sup> ; le taux de sulfates est donc vingt à trente fois inférieur à celui connu pour les grottes hypogènes actives de Villa Luz au Mexique et de Glenwood au Colorado ; il est vingt fois inférieur à celui de la source de la Mescla (06) en étiage prononcé (d'après Reynaud 2000, valeurs relevées en Octobre 1997), dont la part hydrothermale est encore insuffisamment cernée. En revanche, quoique plus faible, il se trouve dans l'ordre de grandeur de celui de la source hydrothermale d'Alun (grotte des Serpents à Aix-les-bains).

Cette relative pauvreté en sulfates (à titre de comparaison, Hépar, une eau minérale de consommation, en contient 1530 mg.l<sup>-1</sup> soit quarante fois plus !) est intuitivement perçue comme une condition plutôt défavorable à la spéléogénèse par corrosion sulfurique. Au-delà du fait que nous mesurons aujourd'hui une eau dont la chimie a pu varier depuis le stade actif de la grotte du Chat, il faut néanmoins dépasser cette première

impression subjective ; il convient en effet de remarquer que, curieusement, l'émergence hydrothermale du Riou émet de grandes quantités d'H<sub>2</sub>S alors que la source d'Alun, avec une teneur en sulfates supérieure, n'a qu'une très faible odeur, à peine perceptible même dans la salle confinée où elle est captée. Cette remarque est encore mieux vérifiée dans la grotte de la Mescla (Malaussène, Alpes Maritimes) : l'eau de la source de la Mescla en étiage prolongé (d'après Reynaud 2000, valeurs relevées en Octobre 1997), est globalement 15 fois plus minéralisée que celle de la source hydrothermale du Riou ; dans le détail, elle est 75 fois plus chlorurée mais nettement moins carbonatée. Quoique l'eau y soit 25 fois plus sulfatée que celle de la source hydrothermale du Riou, la présence d'H<sub>2</sub>S dans la grotte de la Mescla n'est pas signalée dans littérature.

Cette observation indique ou confirme que la présence de sulfates n'est qu'une condition nécessaire mais pas suffisante à la production d'acide sulfurique biogénique : le caractère multifactoriel de ce processus est ici parfaitement mis en évidence. On peut rappeler que Barton & Luiszer 2005 font intervenir dans la boucle biochimique de production d'H<sub>2</sub>S en milieu profond des bactéries chimiautotrophes et du carbone

métabolisable. On peut en conclure qu'il n'y a pas nécessairement de corrosion sulfurique en contexte très sulfaté, mais qu'il y a corrosion sulfurique en contexte sulfaté (même modérément) dès lors que les autres composantes du cycle biochimique sont représentées, en particulier le carbone métabolisable. Les composantes organiques de cette chaîne biochimique expliquent peut-être la chimie de l'écosystème de la grotte de Movile, dont l'eau contient 0,3 mMol.l<sup>-1</sup> de sulfures, mais également autant d'ammonium et presque autant de méthane, tandis que son atmosphère contient 1,5% de gaz carbonique d'origine biologique (Sarbu & Lascu 1997, Journal of caves and karst studies).

La température de l'eau intervient probablement aussi dans la partition des associations bactériennes qui s'établissent en milieu hydrothermal, donc dans la résultante de leur action biochimique et leur impact en matière de spéléogénèse. Dans cet ordre d'idées, dans le cas particulier de la grotte de la Mescla, les précipitations induisent dans la source des variations de température d'une amplitude de 10°C et des variations de concentrations dans un facteur de 1 à 100, ce qui constitue probablement un ensemble de facteurs défavorables au développement d'associations bactériennes stables.

	<u>Grotte du Chat, Daluis.</u> <u>06</u> (échantillon n°3489 prélevé le 18/03/06, analysé le 20/03/06)	<u>Source d'Alun, Aix les Bains</u> (1998)	<u>Cueva de Villa Luz, Mexique</u> (Gordon&Rose n, 1962)	<u>Glenwood Cave, Colorado</u> (1989)	<u>Grotte de la Mescla, d'après Reynaud 2000, étiage Octobre 1997</u>	
<b><u>PH</u></b>	non mesuré	6,5	7,1	6,4	7,15	
<b><u>Température</u></b>	17,5 °C	40 °C	29 °C	49,6 °C	23,5 °C	
<b><u>Chimie générale</u></b>	Calcium Ca <sup>2+</sup>	40,3 mg/l 2,01 meq/l	125 mg/l 6,24 meq/l	240,5 mg/l 12,00 meq/l	690,4 mg/l 34,45 meq/l	270 mg/l 13,47 meq/l
	Magnésium Mg <sup>2+</sup>	8,7 mg/l 0,72 meq/l	17,5 mg/l 1,44 meq/l		84,6 mg/l 6,96 meq/l	53 mg/l 4,36 meq/l
	Sodium Na <sup>+</sup>	51,4 mg/l 2,24 meq/l	30 mg/l 1,30 meq/l	0,5 mg/l 0,02 meq/l	6574 mg/l 285,86 meq/l	1360 mg/l 59,14 meq/l
	Potassium K <sup>+</sup>	1 mg/l 0,03 meq/l	4,5 mg/l 0,12 meq/l	11,7 mg/l 0,30 meq/l	125 mg/l 3,20 meq/l	47 mg/l 1,20 meq/l
	<b>Somme cations</b>	<b>4,99 meq/l</b>	<b>9,10 meq/l</b>	<b>12,32 meq/l</b>	<b>330,47 meq/l</b>	<b>78,17 meq/l</b>
	Chlorure Cl <sup>-</sup>	27 mg/l 0,76 meq/l	22,5 mg/l 0,63 meq/l	531,8 mg/l 15,00 meq/l	9706 mg/l 273,77 meq/l	2080 mg/l 58,67 meq/l
	Sulfates SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	36,4 mg/l 0,76 meq/l	145 mg/l 3,02 meq/l	864,5 mg/l 18,00 meq/l	1102 mg/l 22,94 meq/l	880 mg/l 18,32 meq/l
	Nitrates NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	<1 mg/l			0,2 mg/l	mg/l
	Sulfure S <sup>2-</sup>	1,7 mg/l 0,03 meq/l		Faible odeur d'H <sub>2</sub> S	1,7 mg/l 0,03 meq/l	mg/l meq/l
	TH en mg/l HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> <i>TH en degré Français :</i>	234,2 mg/l 3,84 meq/l 19,2 °F	262 mg/l 4,29 meq/l		664 mg/l 10,88 meq/l	180 mg/l 2,95 meq/l
<b>Somme anions</b>	<b>5,38 meq/l</b>	<b>7,95 meq/l</b>	<b>33,00 meq/l</b>	<b>307,62 meq/l</b>	<b>79,94 meq/l</b>	
<b><u>Métaux</u></b>	Fer total	22 µg/l				
	Cuivre total	<10 µg/l				
	Silice SiO <sub>2</sub>		24 mg/l		30,2 mg/l mg/l	

#### 4. Mesure du débit de la source active

La source émet ses eaux sulfureuses dans le lit même du Riou, aussi est-il difficile d'en estimer de visu le débit, lequel avait a priori été supposé modeste au vu des faibles turbulences dans la vasquette : pifométriquement de l'ordre du litre par seconde, sans aucun élément fiable pour conforter cette hypothèse.

L'émergence se situant sur la rive extérieure d'une courbe du Riou, il était envisageable de shunter le virage par un chenal de dérivation creusé dans les galets et les sédiments du lit, ce qui devait permettre d'isoler la source du torrent et de tenter une mesure de débit.



Fig. 57 : Le Riou à l'origine : la source se situe là où se tient le personnage (Photo J-C d'A-N)

C'est Guillaume Isnard, Eric Madelaine et Jean-Claude d'A-N qui se sont collés avec abnégation à cette corvée qui réclamait bien plus de compétence musculaire que de compétences scientifiques ; il faut croire qu'on avait misé sur les bons bourrins, puisqu'en une petite heure, une tranchée d'environ un mètre de large, quarante centimètres de profondeur et cinq mètres de longueur (soit 2 m<sup>3</sup> de galets, donc plus de 3 tonnes...) a été réalisée. Au bout du chantier, l'objectif était atteint : le Riou ne versait plus qu'un filet négligeable dans son chenal d'origine, que seule la source alimentait maintenant.



Fig. 58 : Le Riou après aménagement (Photo J-C d'A-N)

#### Premières constatations :

- L'émergence n'est pas unique ; un mètre à l'aval de la vasque, un griffon qui avait été suspecté et grattouillé le week-end précédent par Bruno coulait maintenant à l'air libre ; un autre griffon plus important, absolument invisible auparavant, jaillissait entre les galets de la rive deux mètres en amont de la vasque. Dans les deux cas, des filaments bactériens blancs identiques à ceux de la vasque principale, mais invisibles habituellement en raison de la turbidité des eaux du Riou chargées de marnes, tapissent localement les galets.

- Dans la vasque principale, l'eau sulfureuse, sans aucun mélange avec l'eau du torrent, présente de façon évidente un aspect laiteux et blanchâtre caractéristique.

- L'émergence principale sort verticalement d'une cheminée dans le fond de la vasque, où, le niveau

étant descendu d'environ quinze centimètres, elle se manifestait par un champignon d'eau d'une dizaine de centimètres de diamètre et de trois à quatre centimètres de hauteur. D'ores et déjà, on était visiblement au-delà du litre par seconde.



Fig. 59 : le champignon d'eau ; noter les filaments bactériens blancs sur les rochers (Photo J-C d'A-N)

La technique de mesure de débit prévue était un basique jaugeage au seau. Quelques mètres en aval des émergences, un petit seuil a été aménagé avec un kit en guise de déversoir de fortune : les 2/3 du débit approximativement étaient ainsi captés.



Fig. 60 : jaugeage au seau de la source sulfureuse (Photo Guillaume Isnard)

Au cours de tous les tests, le seau de 15 litres fut presque rempli en 3 secondes serrées : le débit au déversoir était donc supérieur à  $4 \text{ l.s}^{-1}$ , soit, compte tenu des pertes latérales, un débit total estimé au minimum à  $6 \text{ l.s}^{-1}$ , ce qui est plus important que l'estimation initiale « à l'œil » (ou plutôt au pif).

De plus, comme l'a fait remarquer Catherine Baby, il n'est pas exclu qu'il y ait des sous-écoulements diffus dans les alluvions : il a été noté en plusieurs endroits dans le chenal d'origine des filaments

## 5. Les conduits fossiles sur le versant

En escaladant le versant entre la source et la grotte, on observe au contact entre le calcaire et les marnes plusieurs conduits dont incontestablement certains sont des émissaires fossiles des eaux sulfureuses. Ils ont été inventoriés par Catherine Baby, Bruno Scanu et JC d'A-N, et calés en altitude relative grâce à un altimètre Thommen et à Catherine (« Là, c'est quand même vachement haut.. »).

- A +9 : conduit d'une vingtaine de centimètres de diamètre, bien érodé, de section subcirculaire et parfaitement horizontal sur la portion visible. Le recul du versant a laissé sur sa droite une forme pariétale qui est, soit le reste de sa paroi Est, soit une encoche de corrosion. L'horizontalité du conduit suggère un creusement par des flux corrosifs hypogènes s'extravasant au niveau de base correspondant à ce stade d'encaissement de la vallée.

bactériens fixés sur des galets, sans qu'on puisse savoir si les galets en question étaient en place ou non, et si les bactéries croissaient en raison de concentrations localisées de sulfures et de sulfates, ou si elles profitaient simplement des apports issus des griffons, dilués dans l'eau du torrent. Le fait qu'une vingtaine de mètres en amont de la source (avant le coude du ruisseau), on sente généralement de fortes émanations d' $\text{H}_2\text{S}$  peut être un autre indice de sous-écoulements. Le débit total des eaux sulfurées est donc en définitive peut-être très nettement supérieur à  $6 \text{ l.s}^{-1}$ .

Le régime de la source semble s'apparenter à celui, régulier, d'une exurgence artésienne alimentée par un aquifère profond régulant des apports lointains, bien plus qu'à celui, irrégulier et saisonnier, d'un drain karstique ; cependant, l'ordre de grandeur de son débit demeure théoriquement compatible avec un impluvium strictement limité à la surface demi-kilométrique du lambeau de calcaire barrémien, intégré selon le coefficient d'infiltration calculé par E. Gilli pour les karsts du Sud-Est. Pour l'heure, cette mesure de débit n'est donc pas suffisante pour infirmer ou confirmer l'hypothèse artésienne, pas plus que les deux mesures de température que nous avons collectées.

Là encore, une surveillance régulière et prolongée de la source permettrait de connaître sa réponse aux variations de pluviométrie et de température extérieure, et de mieux cerner ainsi son mode d'alimentation.



Fig. 61 : le conduit de +9 (Photo J-C d'A-N)

- A +17 : conduit pénétrable mais étroit, d'un développement de l'ordre de la dizaine de mètres, trouvé par Philippe Audra (donc étroit, c'est bien ce que je disais) en Novembre 2005 ; c'est probablement celui signalé par B. Ducluzaux en 1993 (3èmes Rencontres d'Octobre, Montpellier). Il est ventilé, mais simplement parce qu'il communique avec le conduit suivant.

- A +20 : cheminée impénétrable avec laquelle communique le conduit de +17.

- A +25 : diaclase ouverte très karstifiée, infradécimétrique, se développant obliquement dans le versant ; à +30, la même diaclase s'élargit au-delà du décimètre. L'ensemble évoque fortement la morphologie des fissures émissives de la grotte.

- A +60 : autre diaclase assez semblable, comportant un vrai conduit, subvertical mais impénétrable (cheminée). Les lèvres de la diaclase sont très concrétionnées, mais il s'agit manifestement de stalactites formées en milieu épigée (aérien) et non pas hypogée. L'érosion a considérablement modifié l'aspect de l'objet, et nuit à la lisibilité d'éventuels indices de karstogenèse.



Fig. 62 : anciens conduits creusés sur diaclase à +60 (Photo J-C d'A-N)

- Il existe, plus à l'intérieur de la lame de calcaire barrémien redressé, à +31 et à une dizaine de mètres à l'Ouest des conduits de +17 et +20, une coupole de corrosion pariétale d'environ un mètre de diamètre, montrant des boxworks particulièrement marqués semblables à

ceux qu'on observe dans la grotte ; cet objet appartenait de toute évidence à un vide souterrain fortement corrodé, et la relation avec la source sulfureuse à un stade intermédiaire d'encassement du Riou peut être supposée.

- Pour mémoire, à l'aplomb de cette coupole donc nettement à l'Ouest du contact marnes/calcaire, à +42 et à +50, on note sous des strates décollées et passablement broyées des traces bien marquées, marronnasses, d'écoulements karstiques : ils sont probablement liés à de petits drainages cutanés récents, et sont donc sans intérêt pour notre sujet.

- Enfin, un autre conduit fossile, situé également au contact marnes/calcaires mais en contre-haut de la grotte du Chat, a été signalé par Eric Gilli au cours du stage, et a ultérieurement été relevé par Philippe Audra 25 mètres au-dessus de la grotte ; il affecte la forme d'une cheminée remontante de plusieurs mètres de hauteur disséquée par l'érosion, portant des formes de convection, surmontée de deux conduits décimétriques subverticaux.



Fig. 63 : cheminée et conduit fossiles dans le versant au dessus de la grotte du Chat (Photo Ph. Audra)

En conclusion, la source a laissé sur le versant de nombreux indices étagés de son activité au cours de l'encassement de la vallée du Riou, mais a priori à aucun autre niveau la corrosion n'a été aussi active et/ou aussi durable que dans la grotte du Chat.

L'explication de ce fait peut être recherchée :  
- soit dans une longue stabilité du niveau de base au niveau de la grotte du Chat. (ou bien, si l'on préfère, dans une accélération de l'encaissement de la vallée). La stabilité du niveau de base pourrait peut-être correspondre au Pliocène, et l'encaissement rapide à l'incidence des régressions post-pliocène et quaternaires.  
- soit dans une variation localisée dans le temps ou dans l'espace des conditions physico-chimiques du

creusement : lessivage par la circulation hydrothermale de niveaux particulièrement riches en sulfates ou en matières carbonées/organiques, épuisés ou exondés depuis, favorisant le développement des réactions biochimiques produisant l'acide sulfurique, ou bien apports massifs d'oxygène par ventilation ou percolation d'eau météoriques à la faveur de la fracturation.

L'explication reste à trouver.



## V. BIBLIOGRAPHIE

- Louise D. Hose & James A. Pisarowicz 1999 - Cueva de Villa Luz, Tabasco, Mexico : reconnaissance study of an active sulfur spring cave and ecosysteme. *Journal of cave and karst studies* 61 (1), p. 13-21
- Sandro Galdenzi & Teruyuki Maruoka 2003 - Gypsum deposits in the Frassassi caves, central Italy. *Journal of cave and karst studies* 65 (2), p. 111-125
- Hazel Barton & Frederick Luiszer 2005 - Microbial metabolic structure in a sulfidic cave hot spring : potential mechanisms of biospeleogenesis. *Journal of cave and karst studies* 67 (1), p. 28-38
- Bruno Ducluzaux 1993 - Les karsts à alimentation diffuse. *Actes des 3èmes Rencontres d'Octobre du Spéléo-Club de Paris à Montpellier*, p. 45-47. Spéléo-club de Paris.
- Bruno Ducluzaux 1994 - La karstification hypogénique. *Actes des 4èmes Rencontres d'Octobre du Spéléo-Club de Paris*, p. 49. Spéléo-club de Paris.
- Philippe Audra, Jean-Yves Bigot & Jean-Claude Nobécourt 2006 – Une cavité hypogène liée à des remontées d'acide sulfurique : la grotte du Chat (Daluis, Alpes-Maritimes). *Actes numériques des 5<sup>e</sup> Rik-Rak, Nans-sous-Sainte-Anne, 14 & 15 janvier 2006*
- Philippe Audra & Jean-Yves Bigot 2005 – La grotte de Saint-Benoît, Alpes-de-Haute-Provence : un modèle de cavité épinoyée. *Actes numériques des 4<sup>e</sup> Rik-Rak, Seyssins, 15 & 16 janvier 2005*
- Yuri V. Dublyansky et Serguei E. Pashenko 1997 - Cave Popcorn – An Aerosol Speleothem ? *Actes du 12ème Congrès International de Spéléologie, Suisse, 1997*
- Victor N. Dublyansky et Yuri V. Dublyansky 1998 – The problem of condensation in karst studies *Journal of cave and karst studies* 60 (1), p. 3-17
- S.M. Sarbu et Ch. Lascu 1997 – Condensation corrosion in Movile cave, Romania *Journal of cave and karst studies* 59 (3), p. 99-102
- Sounier, Sounier et Oddou - L'aventure verticale dans les Alpes d'azur - *Edisud*
- Y. Créac'h - Inventaire spéléologique des Alpes Maritimes *Editions du B.R.G.M.*
- Carte géologique au 1/50000<sup>ème</sup>, feuille Entrevaux *Editions du B.R.G.M.*

Les articles de « Journal of caves and karst studies » sont consultables sur  
<http://www.caves.org/pub/journal/index.htm>



## VI. ANNEXES

### A. Lexique

Allochtone : qui provient d'un autre endroit (par opposition à autochtone)

Anoxique : où le taux d'oxygène est très réduit (en anglais : anoxic)

Aphotique : zone où ne pénètre aucune radiation solaire (en anglais : aphotic)

Binaire : qualifie un karst alimenté par un impluvium en partie non karstique ; par opposition au karst uniaire

Biogénique : qui résulte de l'activité biologique d'organismes vivants

Carboné : qui contient du carbone

Carbonique : relatif au carbone ou à ses dérivés, plus particulièrement au gaz carbonique CO<sub>2</sub> (en anglais : carbonic)

Chimiautotrophe : se dit des bactéries qui produisent des composés organiques sans utiliser l'énergie de la lumière. Elles produisent notamment des oxydes de substances inorganiques comme le soufre, l'azote ou l'ammoniac. (en anglais : chemautotrophe)

Diapir : déformation des couches superficielles par des matériaux sous-jacents relativement plastiques, ou extrusion à travers les couches superficielles de ces matériaux sous-jacents ; généralement, le diapirisme est provoqué par les évaporites (sel, gypse, halite...)

Évaporite : roche formée à la suite de l'évaporation d'eau de mer

Ferrique : oxydes et sels dont le fer est trivalent (FeCl<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> = hématite) (en anglais : ferric)

Ferreux : 1/ qui contient du fer - ou bien 2/ corps composé dont le fer est bivalent (FeCl<sub>2</sub>) (en anglais : ferrous)

Ferrugineux : qui contient du fer, généralement oxydé (source, roche...) (en anglais : ferruginous)

Fer : élément fer (Fe) (en anglais : iron)

Hydrothermal : relatif à des eaux souterraines chaudes et riches en fluides minéralisés

Sulfate : sel d'acide sulfurique caractérisé par le radical (SO<sub>4</sub><sup>-</sup>) (en anglais : sulfate)

Sulfaté : qui contient des sulfates

Sulfite : sel de l'acide sulfureux H<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>

Sulforéductrice : se dit des bactéries capables d'extraire métaboliquement de l'oxygène des sulfates, en les décomposant en sulfures, notamment d'hydrogène (H<sub>2</sub>S)

Sulfure : soufre + métal (pyrite, blende, galène...) ou cation complexe (en anglais : sulfide)

Sulfuré : combiné avec du soufre (par exemple hydrogène sulfuré H<sub>2</sub>S) (en anglais : sulfidic)

Soufre : élément soufre (S) (en anglais : sulfur, sulphur)

Sulfurique : produit des émanations sulfureuses, acide sulfurique (en anglais : sulfuric)

Sulfureux : contient du soufre libre ou l'ion sulfure (en anglais : sulfurous)

Uniaire : qualifie un karst alimenté par un impluvium totalement karstique ; par opposition au karst binaire

## B. Table des illustrations

Fig. 1 : la chaîne biochimique sulfates, sulfures, sulfites et acide sulfurique (Barton & Luiszer 2005)	5
Fig. 2 : concrétions de goéthite (oxyde de fer) provenant d'une vavité hypogène du Vaucluse (Photo J-C d'A-N)	6
Fig. 3 : calcite hydrothermale dans une cavité hypogène ardéchoise (Photo P. Deconinck)	7
Fig. 4 : contexte géologique de la cavité (d'après la carte géologique, B.R.G.M.)	8
Fig. 5 : profil caractéristique de galerie dans le Labyrinthe (Photo J-Y Bigot 2005)	9
Fig. 6 : rigoles sulfuriques pariétales dans la galerie de Cessole (Photo J-C d'A-N)	9
Fig. 7 : la salle des Santons ; les personnages se tiennent sur les tables de corrosion (photo Ludovic Mocochain)	10
Fig. 8 : schéma fonctionnel de la salle des Santons (dessin Philippe Audra, Octobre 2005)	10
Fig. 9 : encroûtements et crosse de gypse dans la grotte du Chat (Photo J-Y Bigot)	10
Fig. 10 : profil en long et nivellement de la grotte du Chat (dessin Ph. Audra)	11
Fig. 11 : répartition des témoins de gypse dans la grotte du Chat (Schéma Ph. Audra avec levés des stagiaires sur topo M. Rousseau, C.M.S.)	12
Fig. 12 : la fracturation dans la grotte du Chat (schéma Ph. Audra sur topo C.M.S.)	13
Fig. 13 : bande de géographes en goguette dans les roubines (Photo J-C d'A-N)	15
Fig. 14 : grimper un peu, qu'y disait... (Photo Catherine Baby)	16
Fig. 15 : la cheminée hydrothermale (Photo J-Y Bigot)	16
Fig. 16 : un conduit fossile 9 mètres au-dessus de la source (Photo J-Y Bigot)	17
Fig. 17 : profil caractéristique dans la galerie de Cessole : fissure émissive entaillant un bed-rock aplani et large encoche de corrosion à la base du conduit (Photo J-Y Bigot)	17
Fig. 18 : des concrétionnements spécifiques en position parfois paradoxale (Photo J-Y Bigot)	18
Fig. 19 : paroi perforée de « cupolettes » (Photo Catherine Baby)	18
Fig. 20 : la journée n'est pas terminée... (Photo J-C d'A-N)	18
Fig. 21 : Célébration du Mystère de la Sainte Régression (Photo J-C d'A-N)	19
Fig. 22 : c'est pas plus beau comme ça ? (Photo J-C d'A-N)	20
Fig. 23 : ça observe sérieux... (Photo Catherine Baby)	20
Fig. 24 : ça gratte sérieux... (Photo J-C d'A-N)	21
Fig. 25 : le Coulomp et le pont médiéval de la reine Jeanne, vue de la vire d'accès (Photo J-Y Bigot)	21
Fig. 26 : concrétions anciennes dégagées de leur gangue stalagmitique, probablement de type « chou-fleur », encroûtées d'oxyde de fer (Photo J-C d'A-N)	22
Fig. 27 : un tag du XVIIème siècle... (Photo J-Y Bigot)	22
Fig. 28 : l'accès au réseau Camille ; après, c'est un peu plus large. Mais pas tellement. (Photo J-C d'A-N)	22
Fig. 29 : celui-là, il ne vient pas de bien loin... (Photo J-Y Bigot)	23
Fig. 31 : topo de la grotte du Chat par la méthode traditionnelle (topo C.M.S.)	25
Fig. 32 : plan partiel de la grotte du Chat sous VTopo	25
Fig. 33 : coupe projetée de la grotte du Chat sous VTopo ; l'entrée est à gauche sur le dessin	25
Fig. 34 : vue 3D de la grotte du Chat sous VTopo ; l'entrée est à gauche sur le dessin	25
Fig. 30 : Exemple de carte donnée sur le site de Thérion	26
Fig. 35 : extrait de l'atlas et vue 3D de la grotte du Chat sous Thérion (l'entrée est en haut à gauche)	29
Fig. 36 : popcorns (Photo J-Y Bigot)	30
Fig. 37 : répartition altitudinale des popcorns et des figures de corrosion dans une galerie ; première approche théorique (Photo Ludovic Mocochain, dessin J-Y Bigot, 18/4/06)	30
Fig. 38 : popcorns recouverts de gypse (Photo J-Y Bigot)	31
Fig. 39 : popcorns en situation insolite et hypothèse de formation (Photo et dessin J-Y Bigot, 18/04/06)	31
Fig. 40 : ci-dessus, popcorns développés en position très haute dans une fissure étroite ; à droite, cupolettes et popcorns sur les deux faces d'un même objet : infractions évidentes à l'hypothèse altitudinale... (Photos J-Y Bigot)	32
Fig. 41 : la répartition des popcorns n'est pas altitudinale, mais liée à la dynamique de la circulation des aérosols : ils cristallisent « sous le vent » (Dessins J-Y Bigot, 25/4/06)	33
Fig. 42 : les poches de substitution de la grotte du Chat (Photo J-Y Bigot, Nov. 2005)	34
Fig. 43 : poche de substitution à bords débordants (Photo J-C d'A-N)	35
Fig. 44 : première approche de la répartition des poches de substitution (dessin N. Jeronimo)	36
Fig. 45 : le cadre de carroyage conditionné (Photo J-C d'A-N)	37
Fig. 46 : utilisation du cadre de carroyage (Photo J-C d'A-N)	37
Fig. 47 : coalescence de poches de corrosion attestée par un « hum » central (Photo J-C d'A-N)	38
Fig. 48 : courbes de distribution des caractéristiques morphométriques de poches de distributions de dimensions aléatoires	40
Fig. 49 : courbes de distribution des caractéristiques morphométriques de poches de distributions de dimensions aléatoires	41
Fig. 50 : distribution des surfaces et des volumes des poches de substitution de la grotte du Chat	42
Fig. 51 : distribution des elliptismes des poches de substitution de la grotte du Chat	43
Fig. 52 : distribution des forations des poches de substitution de la grotte du Chat	44
Fig. 53 : situation des carreaux de mesure dans la grotte du Chat	45
Fig. 54 : phase tectonique antérieure à la spéléogénèse, reprise par un rejeu néotectonique (Photo JC d'A-N)	45
Fig. 55 : l'émergence sulfureuse du Riou	54
Fig. 56 : mesures physiques et échantillonnage dans la source sulfureuse (Photo J-C d'A-N)	55
Fig. 57 : Le Riou à l'origine : la source se situe là où se tient le personnage (Photo J-C d'A-N)	58
Fig. 58 : Le Riou après aménagement (Photo J-C d'A-N)	58
Fig. 59 : le champignon d'eau ; noter les filaments bactériens blancs sur les rochers (Photo J-C d'A-N)	58
Fig. 60 : jaugeage au seau de la source sulfureuse (Photo Guillaume Isnard)	59
Fig. 61 : le conduit de +9 (Photo J-C d'A-N)	59
Fig. 62 : anciens conduits creusés sur diaclase à +60 (Photo J-C d'A-N)	60
Fig. 63 : cheminée et conduit fossiles dans le versant au dessus de la grotte du Chat (Photo Ph. Audra)	60

### C. Liste des participants

<b>NOM</b>	<b>Structure</b>	<b>Ville</b>	<b>Adresse mail</b>
BABY Catherine	G.S. Magnan	Nice	<a href="mailto:catherine.baby@wanadoo.fr">catherine.baby@wanadoo.fr</a>
CHARLES Tristan	Lou Pais	Caille	<a href="mailto:charles.tristan@wanadoo.fr">charles.tristan@wanadoo.fr</a>
GANDON Fabien	Sophi-Taupes		<a href="mailto:fabien.gandon@sophia.inria.fr">fabien.gandon@sophia.inria.fr</a>
ISNARD Guillaume	C.M.S.	Nice	<a href="mailto:guillaume_isnard@yahoo.fr">guillaume_isnard@yahoo.fr</a>
JERONIMO Nuño	U.N.S.A	Nice	<a href="mailto:jeronimo.nuno@gmail.com">jeronimo.nuno@gmail.com</a>
KETTELA Pierre	Sophi-Taupes	Le Rouret	<a href="mailto:kettela.cecile@wanadoo.fr">kettela.cecile@wanadoo.fr</a>
MADELAINE Eric	Sophi-Taupes	Opio	<a href="mailto:eric.madelaine@sophia.inria.fr">eric.madelaine@sophia.inria.fr</a>
OUAL GHAZI Moustapha	Univ. Paris VIII	Paris	<a href="mailto:moustaf4@hotmail.com">moustaf4@hotmail.com</a>
SCANU Bruno	G.S. Magnan	Nice	<a href="mailto:bruno.scanu@laposte.net">bruno.scanu@laposte.net</a>
SKOKAJIC Ana	C.M.S.	Grasse	<a href="mailto:anaskocajic@yahoo.com">anaskocajic@yahoo.com</a>
<b><u>CADRES ET INTERVENANTS</u></b>			
AUDRA Philippe	U.N.S.A.	Carros	<a href="mailto:Philippe.AUDRA@unice.fr">Philippe.AUDRA@unice.fr</a>
BIGOT Jean-Yves	F.F.S.	Barcelonette	<a href="mailto:Jean-Yves.BIGOT2@wanadoo.fr">Jean-Yves.BIGOT2@wanadoo.fr</a>
CAMERA Laurent	A.N.N.A.M.	Auvare	<a href="mailto:Laurent_camera@hotmail.com">Laurent_camera@hotmail.com</a>
D'ANTONI-NOBECOURT Jean-Claude	C.D.S. 06	Vence	<a href="mailto:jcnobecourt@free.fr">jcnobecourt@free.fr</a>
GILLI Eric	C.E.K.	Nice	<a href="mailto:e.gilli@wanadoo.fr">e.gilli@wanadoo.fr</a>
ISNARD Michel	C.M.S.	Grasse	<a href="mailto:mi_speleo06@yahoo.fr">mi_speleo06@yahoo.fr</a>
MARI Gilbert	A.N.N.A.M.	Nice	<a href="mailto:gilmarite@aol.com">gilmarite@aol.com</a>
MOCOCHAIN Ludovic	C.E.R.E.G.E.		<a href="mailto:mocochain@cerege.fr">mocochain@cerege.fr</a>

## **D. Contacts utiles**

- Fédération Française de Spéléologie, 28 rue Delandine 69002 - LYON
- Ecole Française de Spéléologie, 28 rue Delandine 69002 - LYON
- Comité Spéléologique Régional Côte d'Azur, C/O Gilles Colin, 1665 chemin du Raby 83870 - SIGNES
- Comité Départemental de Spéléologie des Alpes Maritimes, maison régionale des sports, Estérel Galerie, 809 boulevard des écureuils 06210 - MANDELIEU
- Comité Départemental de Spéléologie du Var, 142 rue Emile Ollivier 83000 - TOULON
- Association des Naturalistes de Nice et des Alpes Maritimes, Muséum d'Histoire Naturelle, 60 boulevard Risso - 06300 NICE : <http://asnatnic.club.fr/>

## *REMERCIEMENTS :*

- Nos premiers remerciements vont naturellement à la municipalité de Daluis en la personne de son maire, monsieur Paul Nobize, qui a autorisé nos travaux dans cette grotte d'un intérêt scientifique exceptionnel.
- Pour avoir accueilli avec une sollicitude sans faille notre stage et ses studieux désordres, nos remerciements vont également aux gérants du gîte Saint Pierre, au Fugeret.
- Pour la remarquable qualité de leurs interventions, pour l'ampleur du travail qu'ils ont réalisé tout spécialement pour notre stage, nous exprimons notre gratitude aux sympathiques intervenants de l'Association des Naturalistes de Nice et des Alpes Maritimes : tout d'abord Gilbert Mari, minéralogiste de renom qui préside aux activités de cette association, et Laurent Camera, doctorant en géologie et enfant du pays du Var et de la Vaire.
- Pour son soutien financier à l'organisation de ce stage, nous remercions le C.S.R Q et plus particulièrement son président, Gilles Colin.
- Pour leurs contributions qui ont participé à la rédaction de ce compte-rendu, pour une participation toujours active et impliquée, pour avoir contribué à une bonne humeur qui donne envie de participer à d'autres stages scientifiques, chacun des stagiaires peut être remercié chaleureusement.
- Enfin, pour les bons mots et les bons moments, pour les contrepèteries plus ou moins acrobatiques, en un mot pour promouvoir la science sans en faire une discipline, merci aux cadres dans leur ensemble.

Achevé d'imprimer le 2 Juin 2006 en 99 exemplaires sur les imprimantes de S.M.B. (Monaco)

Du fait du procédé d'impression et du tirage, ce document n'est pas soumis à la numérotation I.S.B.N.