



Fédération Française
de Spéléologie

Stage M2, 19-25 avril 2019

Grotte du Chat, Daluis (06)



Photographie 1 : La falaise d'entrée de la grotte, avec sa barrière de protection. Photo L. Benoist

Stagiaires

Beaucaire F.	Durand L.	Malien V.
Benoist L.	Guérin R.	Marche J.-P.
Delaire C.	Lecrinier X.	Milasewicz C.
Demimuid D.	Lizotte V.	Racape B.

Cadres :

Arnaud J.	Lankester M. C.	Madelaine E.
Emmer S.	Lemaire J.-M.	Nobécourt J.-C.

Et... le Chat :





Table des matières

1	Introduction.....	7
2	Contexte réglementaire de la pratique de la spéléologie.....	7
2.1	Contexte général : Art 552 du Code Civil.....	7
2.1.1	Accès aux cavités.....	7
2.1.2	Protection du patrimoine.....	7
2.2	Code de la Santé publique.....	8
2.3	Code du patrimoine.....	8
2.4	Les mines et les carrières.....	8
2.5	Conduite à tenir en cas de découverte archéologique.....	8
3	Les espaces protégés.....	9
3.1	Classement au titre des Monuments Historiques.....	9
3.2	Arrêté préfectoral de protection de biotope (APPB).....	9
3.3	Zone Natura 2000.....	9
3.4	Réerves Naturelles Régionales (RNR).....	10
3.5	Espace naturel sensible.....	11
3.6	Commission départementale des espaces, sites et itinéraires. Plans départementaux des espaces sites et itinéraires (CDESI – PDESI).....	11
3.7	Parc National.....	12
3.8	Parc Naturel Régional (PNR).....	12
3.9	L'exemple des Alpes Maritimes.....	13
3.9.1	Les différents dispositifs du département.....	13
3.9.2	Les enjeux de protection sur le territoire.....	14
3.9.3	Le PDESI du département.....	15
3.9.3.1	Fonctionnement.....	15
3.9.3.2	Espaces, Sites et Itinéraires.....	16
3.9.4	Interactions avec le milieu souterrain : cas de la Grotte du Chat :.....	16
4	Elements de karstologie.....	16
4.1	Modes de creusement du karst.....	16
4.2	Agencement des cavités.....	18
4.2.1	Paysages.....	18
4.2.2	Développement des grottes et morphologies résultantes.....	18
4.2.2.1	Développement épigène.....	18
4.2.2.1.1	Organisation générale.....	18
4.2.2.1.2	Types d'organisation possibles :.....	19
4.2.2.1.3	Morphologie verticale des grottes en fonction de leur age.....	20
4.2.2.1.4	Effets des changements de niveaux de base.....	22
4.2.2.2	Développement hypogène.....	24
4.2.2.2.1	Processus de creusement.....	24
4.2.2.2.2	Formes résultantes.....	25
4.2.3	Conclusion :.....	26
5	Elements de Biospéléologie.....	26
5.1	La vie dans le karst.....	26
5.2	L'Homme et la vie cavernicole :.....	26
5.3	Les spécificités de l'environnement souterrain.....	27
5.3.1	Différentes zones à coloniser.....	27
5.3.2	Règne végétal.....	29
5.3.3	Champignons.....	29
5.3.4	Description de la faune.....	29
5.3.4.1	Classification de SCHINER (1854).....	29
5.3.4.2	Micro-organismes.....	29
5.3.4.3	Notion de chaîne alimentaire.....	30



5.4 Les chiroptères.....	30
5.4.1 Généralités.....	30
5.4.2 Cycle reproductif.....	31
5.4.3 Cycle de vie annuel.....	32
5.4.4 Suivi scientifique, mesures de protection.....	32
5.4.5 Conduite à tenir pendant les sorties sous terre :	32
6 Instrumentation au service de l'exploration.....	33
6.1 La topographie.....	33
6.1.1 Les instruments.....	33
6.1.2 La méthode.....	35
6.1.2.1 prise de mesure sur le terrain.....	35
6.1.2.2 Les calculs.....	36
6.1.2.3 Le dessin du plan et de la coupe.....	37
6.1.2.4 Signes topographiques conventionnels.....	38
6.1.2.5 Pour aller plus loin.....	38
6.2 Les mesures d'autres paramètres physico-chimiques.....	39
6.2.1 Mesures ponctuelles.....	39
6.2.2 Mesures sur une période temporelle.....	40
6.3 Les mesures concernant le biotope.....	42
7 La grotte du Chat et la source dans le torrent du Riou.....	42
7.1 Contexte géologique.....	42
7.2 Description.....	45
7.3 Etat des lieux.....	48
7.4 Travaux entrepris pendant le stage et résultats obtenus.....	50
7.4.1 Groupe Topographie-Instrumentation.....	51
7.4.1.1 Topographie.....	51
7.4.1.2 Mesures de température dans la grotte.....	51
7.4.1.3 Source sulfureuse.....	52
7.4.1.3.1 Mesures de température et de conductivité.....	52
7.4.1.3.2 Mesure de concentration en H ₂ S atmosphérique.....	54
7.4.1.3.3 Mesure de débit de la source.....	55
7.4.1.4 Les autres mesures effectuées dans la grotte.....	56
7.4.2 Groupe Biospéléologie-Balisage.....	57
7.4.2.1 Description physique.....	57
7.4.2.1.1 Extérieur de la cavité – Zone 0.....	57
7.4.2.1.2 Zone d'entrée – Zone 1.....	58
7.4.2.1.3 Salle des Santons – Zone 2.....	58
7.4.2.1.4 Labyrinthe Sud – Zone 3.....	59
7.4.2.1.5 Salle des tables – Zone 4.....	59
7.4.2.1.6 Labyrinthe Est – Zone 5.....	60
7.4.2.1.7 Galerie de Cessole – Zone 6.....	61
7.4.2.1.8 Réseau supérieur – Zone 7.....	62
7.4.2.1.9 Galerie Ouest – Zone 8.....	63
7.4.2.2 Biospéléologie.....	64
7.4.2.3 Enjeux de protection.....	65
8 Conclusions, préconisations.....	65
8.1 Un accès raisonnable et conventionné.....	66
8.2 Une valorisation scientifique du site de la grotte du chat.....	67
8.3 Un suivi de l'évolution physique de la grotte.....	69
9 Bibliographie.....	71
10 Annexes.....	72
10.1 Signes topographiques conventionnels.....	72
10.2 Topographies.....	78



10.2.1 La galerie d'entrée et la falaise.....	78
10.2.2 La galerie Ouest.....	79
10.3 Cartes des enjeux de protection.....	80
10.3.1 Anthropisation.....	80
10.3.2 Archéologie.....	81
10.3.3 Biospéléologie.....	82
10.3.4 Hydrologie.....	83
10.3.5 Spléléogènes.....	84
10.3.6 Spéléothèmes.....	85
10.4 Tuto balisage.....	86
10.5 Rappels de chimie élémentaire :	91
10.5.1 Atomes ions, molécules, késaco ?.....	91
10.5.2 Les réactions chimiques.....	92
10.6 Méthode de jaugeage au sel.....	94
10.7 Fiches pédagogiques.....	96



« Choisir,c'est renoncer »
Judicaël Arnaud.

« L'instrument doit être au service du savant et pas l'inverse »
Jean-CLaude Nobécourt.

« Alors, où on en était, déjà ? Ah oui. »
Karst Marx Brother



Fédération Française
de Spéléologie

Remerciements.

1 Introduction

Samedi 20 avril 2019, Annot, Alpes de Haute-Provence. Douze stagiaires et cinq cadres se retrouvent pour le module Equipier Environnemental du cursus de monitorat de la Fédération Française de Spéléologie. La cavité support sera la grotte du Chat, située sur la commune de Daluis (06), choisie en raison de ses caractéristiques, qui font d'elle un lieu tout à fait particulier.

Au cours du stage seront abordés à plusieurs reprises les différents thèmes liés à la pratique de la spéléologie replacée dans son environnement, que ce soit sous l'angle de la législation, de la protection, de la formation des cavités ou de la vie qu'elles abritent et des moyens physiques mis en œuvre pour son étude.

Les stagiaires compléteront de leurs observations sur le terrain la description déjà existante de la cavité, dans l'objectif de formuler un certain nombre de préconisations en vue de la réouverture du site aux visites. Ils proposeront également un certain nombre de pistes de médiation scientifique à destination des publics (scolaire ou plus familiaux) qui viendront sur place.

2 Contexte réglementaire de la pratique de la spéléologie.

Cette partie aborde la pratique de la spéléologie dans un contexte lié à l'environnement et non en tant que pratique sportive.

2.1 Contexte général : Art 552 du Code Civil.

Cet article dispose que «*La propriété du sol emporte la propriété du dessus et du dessous*». Cette disposition permet au propriétaire toutes les fouilles sauf la recherche de substances minières et biens archéologiques. Il peut en retirer tous les produits d'exploitation des cavités présentes dans le sous-sol de son bien, notamment à des fins touristiques.

Dans certains cas, toutefois, il est possible, par acte notarié, de dissocier la propriété souterraine de la propriété du sol (cas du Gouffre de Padirac et de son réseau, par exemple).

2.1.1 Accès aux cavités

L'accès aux cavités est régi par cet article, ce qui implique qu'il faut négocier avec le propriétaire (voire, établir une convention avec lui) pour pouvoir accéder aux grottes qui s'ouvrent sur son terrain, à défaut, il est en droit de porter plainte. Le propriétaire de l'entrée d'une grotte n'est toutefois pas propriétaire de la cavité au-delà des limites de son terrain (cf. Art 552 du Code Civil).

2.1.2 Protection du patrimoine.

L'Art. 554 du C.V. indique que toute personne est libre de détruire le patrimoine géologique situé sur un terrain lui appartenant, sauf si une loi ou un règlement l'interdit (c-à-d si il existe une mesure de protection de quelque nature que ce soit sur ce bien). Il est cependant le seul à y être autorisé. En ce qui concerne le vol, il est protégé par l'Art. 552 du C.V.

2.2 Code de la Santé publique.

La première prise en compte de la qualité des eaux remonte à la Loi Martel de 1902, abrogée depuis. Actuellement, c'est le Code de la Santé Publique qui définit les pollutions et les normes applicables aux eaux potables. Ainsi, toute personne qui offre au public de l'eau en vue de la consommation humaine, à titre onéreux ou à titre gratuit et sous quelque forme que ce soit, doit s'assurer de la potabilité.

Le code de la Santé Publique prévoit la mise en place de périmètres de protection et en définit les trois niveaux : Protection immédiate, rapprochée ou éloignée.

- Le périmètre immédiat est celui qui protège le captage lui même. Il doit aussi empêcher le déversement de substances polluantes à proximité du captage. Toute activité y est interdite
- Le périmètre rapproché représente tout ou partie du bassin d'alimentation du captage. Les activités polluantes y sont interdites, ou au moins réglementées.
- Le périmètre éloigné n'a pas de caractère obligatoire. Il est défini uniquement dans le cas où existent des activités qui pourraient être à l'origine de pollutions importantes et si cette mesure est de nature à réduire significativement les risques.

Ces périmètres ont un caractère obligatoire depuis la loi sur l'eau de 1992 et sont établis sur proposition d'un hydrogéologue agréé.

La Loi du 16 décembre 1964 porte création des agences de l'eau.

La Loi du 3 janvier 1992 met en place des Schémas Directeurs d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SDAGE) et les Schémas d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SAGE).

Les services de l'état agissant en matière d'eau agissent en matière d'eau sont réunis au sein de la mission inter-service de l'eau (MISE).

2.3 Code du patrimoine.

La Loi du 27 septembre 1941 porte obligation de déclaration en cas de découverte, réglemente les fouilles archéologiques ou paléontologiques.

Les biens archéologiques immobiliers ou mobiliers présentant un intérêt scientifique appartiennent intégralement à l'état depuis juillet 2016.

2.4 Les mines et les carrières.

A la suite de la réforme du code minier en 1999 (li n°99-2451 du 30 mars 1999), l'Etat devient l'unique responsable du suivi de ces installations. Une carrière est une exploitation de matériau brut, alors qu'une mine produit un minerai destiné à être raffiné.

2.5 Conduite à tenir en cas de découverte archéologique.

Celui qui découvre un site d'intérêt archéologique ne peut prétendre à aucune récompense de la part du propriétaire.

Seule la découverte fortuite d'un site qui donnerait lieu à une exploitation permet d'assurer au découvreur une indemnité forfaitaire ou un intérressement de la part d'un exploitant éventuel.



En cas de suspicion de découverte archéo/paléontologique, il conviendra, sans déplacer les artefacts, de documenter au mieux la découverte, en prenant des croquis et des photos situant le/les artefacts dans leur contexte. On peut également envisager de baliser la zone de découverte si l'on dispose du matériel adéquat. ET surtout, dès la sortie, il faut déclarer la découverte (c.f. loi du 27 septembre 1941) en se mettant en rapport avec la personne compétente au sein de la Direction Régionale des Affaires Culturelles. Ensuite, le processus suit son cours.

3 Les espaces protégés.

Dans cette partie, nous établirons un inventaire des outils de protection de l'environnement, ainsi que des différents acteurs susceptibles d'intervenir dans chaque cas. Nous brosserons ensuite un tableau du département des Alpes maritimes du point de vue de la protection de l'environnement.

3.1 Classement au titre des Monuments Historiques.

Un site peut être classé au titre du code de l'environnement. Il doit s'agir d'un monument naturel ou d'un site dont la conservation ou la préservation présente au point de vue artistique, historique, scientifique, légendaire ou pittoresque, un intérêt général. Le classement d'un site offre une protection renforcée en comparaison de l'inscription, en interdisant, sauf autorisation spéciale, la réalisation de tous travaux tendant à modifier l'aspect du site.

Acteurs :

- Commission départementale de la nature, des paysages et des sites (CDNPs)
- Etat/propriétaires/élus locaux. Espace d'application.

3.2 Arrêté préfectoral de protection de biotope (APPB).

Les milieux naturels peu exploités par l'homme et abritant des espèces faunistiques non domestiques et/ou floristiques non cultivées peuvent être protégés au titre du code de l'environnement, par arrêté préfectoral. Il a un caractère réglementaire et peut donc interdire certaines pratiques sur tout ou partie de l'année. Il permet de prévenir la disparition d'espèces protégées, par des mesures réglementaires spécifiques de préservation de leurs biotopes. On compte en France 672 sites, dont 31 en Outre-Mer, qui couvrent 0,22% du territoire.

3.3 Zone Natura 2000.

La transposition des Directives Européennes «habitats» et «Oiseaux» dans la législation française s'est traduite par le dispositif Natura 2000, qui permet la constitution d'un réseau écologique européen de sites N2000 comprenant à la fois :

- des zones spéciales de conservation classés «habitats»
- des zones de protection spéciale au titre de la directive «oiseaux»

Le Classement en zone Natura 2000 comporte une certain nombre d'étapes :

- Le document écrit (DOCOB) définit les modalités de gestion.
- L'évaluation d'incidence porte sur les habitats et les espèces qui ont justifié la désignation du site. Il s'agit de l'unique obligation réglementaire du dispositif. Son principe consiste à :



- vérifier la compatibilité d'un projet, d'un plan ou d'une activité avec les objectifs définis,
 - évaluer les effets,
 - adapter le projet.
- Le Décret du 16 août 2011 prévoit que le préfet peut inscrire sur une liste locale que les «travaux ou aménagements sur des parois rocheuses ou des cavités souterraines» soient soumis à l'évaluation d'incidence.
 - La Circulaire du 26 décembre 2011 précise le champ d'application de cette mesure en indiquant que « les équipements spécifiques indispensables à la progression et à la sécurité des grimpeurs et des spéléo n'entrent pas dans le champ d'application visé, dès lors qu'ils sont temporaires ou réversibles.»

La Zone Natura 2000 poursuit ses objectifs aux moyens de contrats Natura 2000 ; qui peuvent être :

- agricoles : plans de gestion pastoraux,
- forestiers : entretien de la forêt,
- ni agricoles, ni forestiers : ré-ouverture de milieux, restauration de mares,

Le dispositif prévoit la possibilité de souscrire une charte Natura 2000 pour accompagner les propriétaires, les exploitants ou les usagers dans le respect de bonnes pratiques de gestion ainsi que pour les pratiques sportives et de loisirs.

3.4 Réserves Naturelles Régionales (RNR).

Les réserves naturelles sont un des outils chargés de la mise en œuvre de la stratégie nationale de la biodiversité. Les territoires classés en réserve naturelle ne peuvent être ni modifiés ni détruits.

Ces réserves résultent d'une démarche participative du territoire. Elles sont dotées d'un comité consultatif qui propose un plan de gestion d'une durée de 5 ans, avec comme objectifs : Protéger – gérer – sensibiliser. Ce comité prend des mesures en matière de :

- gestion du patrimoine
- éducation, loisirs
- espèces protégées

Le Comité consultatif peut prendre des réglementations locales spécifiques en fonction des espèces à protéger : activités réglementées ou interdites.

Le tableau ci-dessous compare l'organisation des zones Natura 2000 et celle des RNR

	Natura 2000	RNR
Document de référence	DOCument d'OBjectifs	Plan de gestion
Instance de gouvernance	COmité de PIlotage	Comité consultatif
Financements	U.E., Etat, Communautés de Communes	Région et Communautés de Communes
Outils spécifiques	Contrats et charte	Espace réglementé
Des missions communes et transversales	Gestion, valorisation, sensibilisation	

3.5 Espace naturel sensible.

Ce dispositif résulte de la mise en œuvre par le département d'une politique de protection, de gestion et d'ouverture au public des espaces naturels sensibles boisés ou non, devant permettre :

- la préservation d'espaces naturels sensibles, sites, paysages, milieux naturels,
- la création de zones de préemption spécifiques sur ces territoires. Cet instrument permet au Département d'acquérir un terrain, par préférence à tout acquéreur.

A cet effet, le Conseil Départemental peut voter une taxe n'excédant pas 2% (TDENS) qui porte sur la construction, la reconstruction et l'agrandissement des bâtiments.

Le classement en Espace Naturel Sensible a pour objectifs :

- Protéger un patrimoine naturel, paysager et géologique, menacé ou vulnérable,
- Accueillir le public et le sensibiliser au patrimoine naturel,

3.6 Commission départementale des espaces, sites et itinéraires. Plans départementaux des espaces sites et itinéraires (CDESI – PDESI).

Ce dispositif comporte trois étapes :

- Conception
- Consultation
- Conciliation

Les espaces inscrits au PDESI sont valorisables car accessibles et de qualité.

Des mesures compensatoires pourront être mises en œuvre pour maintenir l'offre d'ESI.

Les ESI inscrits peuvent faire l'objet d'interventions publiques.

3.7 Parc National.

La loi du 22 juillet 1960 a défini la notion de Parc National. Un Parc National est une zone classée en raison de sa richesse naturelle. Il comprend une zone « cœur », fortement réglementée et, en périphérie, une zone d'adhésion qui recouvre la totalité du territoire des communes sur lesquelles s'étend la zone cœur. La zone d'adhésion est un secteur sur lequel les communes sont incitées à une démarche de développement durable. Il existe en France 10 sites dont 3 en Outre-Mer, qui représentent 9,5% du territoire français.

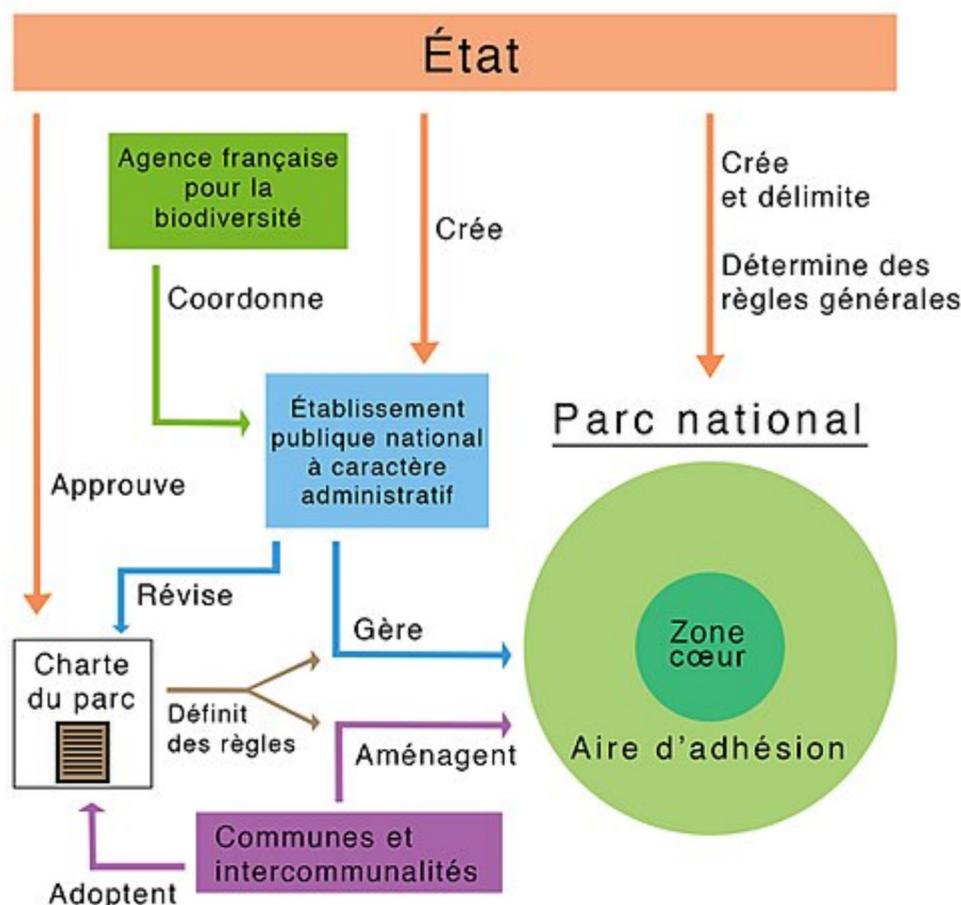


Figure 1 : Schéma de gouvernance d'un Parc National en France.
Source : wikipédia

3.8 Parc Naturel Régional (PNR).

Il s'agit d'un territoire à dominante rurale dont les paysages, les milieux naturels et le patrimoine culturel sont de grande qualité, mais dont l'équilibre est fragile. Il résulte d'une démarche volontaire de la part des acteurs du territoire concerné et ne dispose d'aucun pouvoir réglementaire. Il en existe 53 en France, qui couvrent 15,5 % de la superficie du territoire et rassemblent 6 % de la population. Les objectifs de cette démarche sont :

- protéger et mettre en valeur de grands espaces ruraux habités
- assurer un développement durable, économique et social

Il est doté d'une Charte, qui décrit le projet de territoire en termes de développement, d'aménagement et de préservation du patrimoine.

3.9 L'exemple des Alpes Maritimes

3.9.1 Les différents dispositifs du département.

Le département des Alpes maritimes regroupe l'ensemble de ces dispositifs, qui, en dehors du Parc National du Mercantour, se superposent souvent. On trouve ainsi dans ce département :

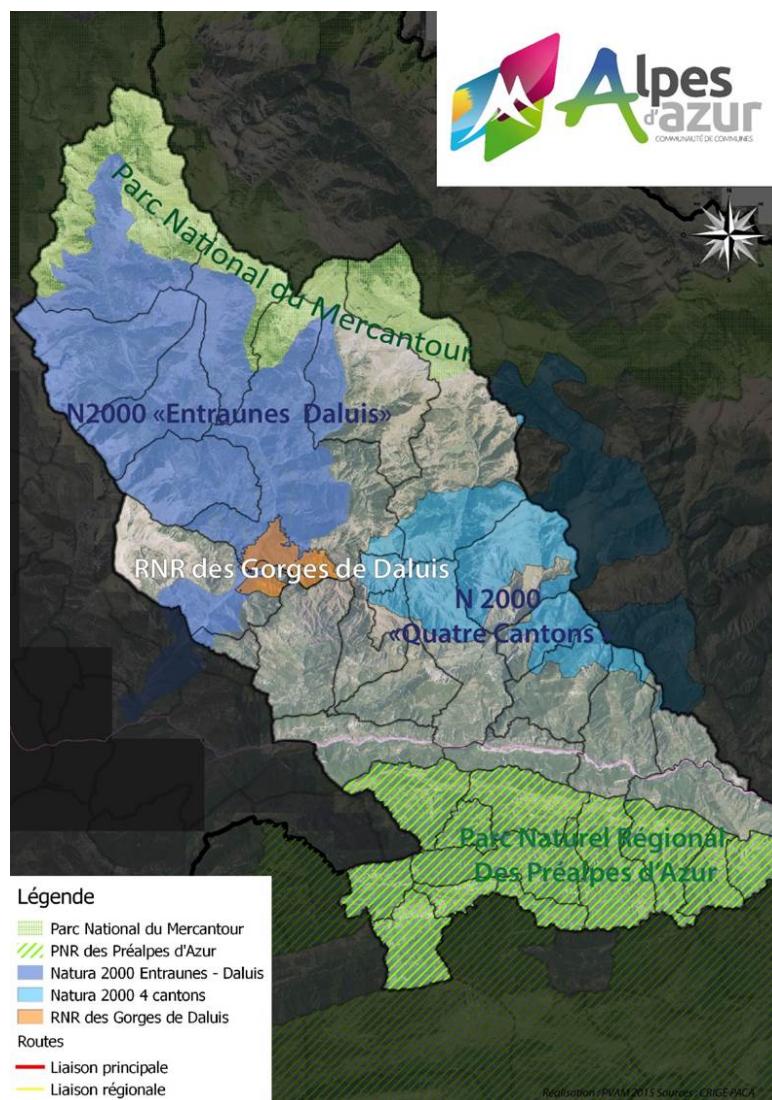


Figure 2 : Une partie des espaces de protection de la nature du département des Alpes Maritimes.

- Le Parc National du Mercantour.

Créé en 1979, classé zone naturelle auprès de l'UNESCO, d'une richesse naturelle exceptionnelle. Créé en 1979, il regroupe 22 communes adhérentes. Il est caractérisé par la diversité des paysages et la richesse du patrimoine naturel et culturel dû à sa situation au carrefour des influences ligure, alpine, méditerranéenne et provençale.



- Le Parc Naturel Régional des Alpes d'Azur.

Créé en 2012, il regroupe 45 communes adhérentes, autour d'enjeux tels que : biodiversité, villages de caractère, paysages et mode de développement durable.

- 3 zones Natura 2000, gérées par le PNR des Alpes d'Azur, dont celle des Entraunes et le site de Castellet-Les Sausses-Entraunes, qui abrite de nombreux gîtes à chauves-souris et dans le périmètre duquel se trouve la Grotte du Chat.
- La Réserve Naturelle Régionale des Gorges de Daluis, co-gérée par la L.P.O. et le PNR.
- Des arrêtés de protection du biotope. Par exemple au collet de Sen, sur la commune de Chateauneuf d'Entraunes, un arrêté protège les oiseaux rupestres. La fréquentation des falaises, la pénétration humaine, le camping et le survol sont interdits.
- Plusieurs ENS, dont celui des grès d'Annot, qui s'étend hors des limites du département voisin, sur lequel se situe la commune d'Annot.
- Un PDESI.

3.9.2 Les enjeux de protection sur le territoire.

Ces enjeux sont de différentes natures :

- Géologiques : Gilmarite (un minéral de cuivre découvert dans une grotte des gorges du Var).
- Faunistiques : Lézard ocellé, Petit Rhinolophe, Spéléomante de Strinati , salamandre.
- Floristiques : lichens, Ancolie de Bertoloni (calcaires, provençale), Orthotric de Roger
- Paysagers : Pelouse sur vire rocheuse d'ubac à saxifrage, forêts montagnardes subalpines à pins à crochets.
 - paysage typique
 - originalité écologique
 - fréquentation humaine
 - compatibilité des aménagements et activités humaines

Ils sont sous-tendus par des objectifs à long terme :

- Maintenir un réseau de gîtes à chiroptères et les milieux fréquentés : réadaptation de l'éclairage du clocher de l'église d'Entraunes.
- Rechercher un état de vieillissement optimal des habitats forestiers : ne plus abattre d'arbres pendant une longue durée (îlot de senescence).
- Maintenir les milieux ouverts dans un bon état de conservation : chantier de réouverture de prairies.
- Exemples d'actions :
 - Chantiers bénévoles de ramassage de déchets.
 - Suivis scientifiques d'espèces protégées.
 - Valorisation écotouristique : projet de balcon.



- Missions transversales de communication et de sensibilisation, production de dépliants, lettre d'infos, films et vidéos, sites Internet, ...
- Suivis scientifiques :
 - chiroptères en milieu souterrain (mines et grottes) : 8 espèces sur 9 sont suivies tout au long de l'année, pour connaître leurs périodes de transit.
 - spéléomante : au printemps, en automne

3.9.3 Le PDESI du département.

Dans les Alpes Maritimes, on recense 3600 sites de pratique sportive. Parmi eux, une cinquantaine seulement ont été retenus pour le PDESI. En effet, il n'y a pas forcément d'intérêt à connaître tous les lieux. En revanche ceux qui sont retenus le sont car ils méritent d'y être inscrits *pour en pérenniser l'accès*.

3.9.3.1 Fonctionnement

La Commission Départementale des Espaces, Sites et itinéraires, installée par le Président du Conseil Départemental, se compose de trois collèges :

- Utilisateurs : CDOS et 12 fédérations sportives délégataires pour les sports de nature (c-à-d : se déroulant, pour tout ou partie dans la nature).
- Acteurs de développement durable : ONF, LPO, Fédération de Chasse, Parc National du Mercantour, ...
- Collectivités Territoriales et Etat : Préfecture, Direction des Services Départementaux de l'Education Nationale, Association des Maires Ruraux, ONEMA, ...

Elle s'est fixé comme objectifs :

- Soutenir le développement économique des territoires et des entreprises du secteur des sports de nature.
- Structurer l'accessibilité maîtrisée aux espaces naturels,
- Contribuer à la promotion et à la préservation des espaces naturels,
- Soutenir le mouvement sportif local et le développement du sport scolaire,
- Favoriser le sport pour tous et le sport santé,
- Coordonner la concertation territoriale dans une stratégie globale de développement durable.

La Commission Permanente du Conseil Départemental

- Adopte les objectifs de la stratégie départementale de pérennisation des sports de nature.
- Lance les études d'incidence.
- Approuve les inscriptions au PDESI

La CDESI va mener des études sur les activités de manière à maintenir le patrimoine naturel en adaptant les pratiques sportives pour les pérenniser. C-à-d : on cherche aussi (surtout?) à éviter les interdictions.

Chaque département va appliquer une stratégie qui lui est propre et sera (on l'espère) adaptée à son contexte. Et, en général, basée sur la concertation pour arriver à une stratégie de développement durable. La première étape de cette démarche est l'étude d'incidence.

L'étude d'incidence environnementale s'appuie sur la réglementation (document de planification), propose une gestion (outils d'aide à la décision et convention de pérennisation) et une valorisation (outil d'aide à la connaissance, règles de fréquentation, panneaux, etc...).

Dans certains cas, si les sites/itinéraires sont déjà dans des zones protégées, ils ne seront pas nécessairement inscrits au PDESI, même si une étude a été réalisée, car on peut les considérer comme déjà protégés et pérennisés.

3.9.3.2 **Espaces, Sites et Itinéraires.**

Depuis la loi de 2000, le département est chargé d'un développement maîtrisé des sports de nature (activité se déroulant en tout ou partie dans le milieu naturel). Il récolte à cet effet la TDENS (taxe d'aménagement sur la construction) pour organiser ces activités.

En ce qui concerne la spéléologie, 1 site est inscrit au PDESI (« Grotte des eaux salées -La Mescla» à Malaussène), 11 autres, dont la Grotte du Chat sont à l'étude.

3.9.4 **Interactions avec le milieu souterrain : cas de la Grotte du Chat :**

La grotte est à l'étude pour son inscription au PDESI et a fait l'objet d'un contrat Natura 2000 entre 2012 et 2017 pour le suivi des chiroptères, du spéléomante et la restauration de la naturalité du site. La cavité était fermée par un mur et une porte. En 2011, une clôture grillagée a été posée et le mur et la porte ont été abattus en 2013. Jusqu'en 2017, l'accès à la grotte a été fermée et une étude de suivi aérologique et faunistique a été mise en place.

- Pose de sondes de mesure de pression et de température,
- Suivi des chauves-souris par ultrasons

Ce contrat a fait l'objet d'une étude d'évaluation en 2017 et a débouché sur des préconisations en vue de la réouverture de la grotte. Nous reviendrons plus en détail sur cette étude et ses résultats dans la partie 7.

4 Elements de karstologie.

L'intérêt pour le karst en tant qu'unité paysagère et particularité hydrologique est due à Janez Vajkard Valvasor et remonte à 1641. Plus tard, Edouard-Alfred Martel invente le terme de spéléologie mais, à l'époque, il nourrit avant tout un projet économique de développement touristique visant la bourgeoisie du 19^e siècle ; la connaissance du milieu souterrain et de son fonctionnement global représentant la couche culturelle de ce tourisme éclairé.

4.1 Modes de creusement du karst.

Actuellement, on recense 5 types de creusement :

1. Dynamique érosive fluvio-karstique : les eaux de surface s'infiltrent dans le karst à la faveur de pertes concentrées, puis circulent sous terre et ressurgissent au pied des plateaux, au niveau de base;
2. Corrosion carbonique : l'eau de pluie s'infiltre dans le sol, où, au contact de la biomasse (racine des végétaux et faune hypogée) elle dissout du dioxyde de carbone (CO₂). Il se forme alors de l'acide carbonique (H₂CO₃). Au contact du calcaire (CaCO₃, insoluble dans l'eau non acidifiée), l'acide carbonique réagit avec la calcite pour former des ions Calcium (Ca²⁺) et hydrogénocarbonates



(HCO_3^-), selon la réaction : $\text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{CO}_3 \leftrightarrow (\text{Ca}^{2+}) + 2(\text{HCO}_3^-)$. Il est à noter que cette réaction est un équilibre. Elle peut donc s'effectuer, selon les conditions, dans le sens de la dissolution ou du dépôt de calcite. La dissolution prendra majoritairement place dans les fissures, où le gaz carbonique ne peut pas s'échapper de la phase liquide. Si le temps de séjour dans les fissures est suffisamment long, l'eau atteint la saturation et le processus de dissolution s'arrête. Dans ce cas, lorsque l'eau retrouvera un milieu ouvert, il y a toutes les chances pour que les conditions d'équilibre soient changées et qu'elle puisse libérer du CO_2 , ce qui conduira au dépôt concomitant de calcite sur les bords de la fissure et à la formation des concrétions.

Formes de corrosion et morphologies reliées : épikarstique (Lapiaz), pertes souterraines concentrées, zone de transfert vertical, zone de transfert horizontal, zone de résurgence sans perte de masse.

Ce processus de creusement est appelé épigène car l'alimentation en eau est assurée par la surface et la circulation a lieu du haut vers le bas sous l'influence de la pesanteur dans la masse rocheuse.

3. Corrosion sulfurique: de l'eau s'infiltre dans une couche perméable et traverse une couche de gypse (CaSO_4). Ce minéral étant très soluble dans l'eau, elle le dissout. Le gypse se trouve alors dissocié, sous forme d'ions Calcium et sulfate (SO_4^{2-}). Si du carbone est disponible dans le sous sol, sous forme de matière organique ou de méthane, des bactéries (dites chimiolithotrophes) peuvent alors se développer et métaboliser le carbone, l'oxygène et l'hydrogène, en produisant de l'hydrogène sulfuré (H_2S) qui se dissout dans l'eau. En remontant au niveau de base dans une couche calcaire fissuré, H_2S en présence d'oxygène atmosphérique, forme de l'acide sulfurique (H_2SO_4) qui attaque la roche au niveau de la surface de l'eau. Il en résulte un modèle caractéristique (voir figure 12) : galerie au plancher horizontal, plus large à la base qu'au sommet. Le plancher de la galerie présente une fissure dite « émissive » par laquelle l'eau chargée de H_2S est arrivée. Ce type de creusement est appelé hypogène car l'eau est issue des profondeurs du sous-sol et circule dans la masse rocheuse du bas vers le haut sous l'action de la pression artésienne.
4. Condensation-corrosion : l'humidité de l'air ambiant, sous l'action d'un courant d'air motivé par la pression ou la convection, récupère le CO_2 et éventuellement H_2S pour attaquer la roche. Le modèle produit consiste en des larges coupoles plus ou moins hémisphériques.
5. Fantômatisation : ce processus très lent résulte de l'équilibre entre deux facteurs :
 - le potentiel hydrodynamique doit être faible (relief peu marqué ou faible transmissivité hydraulique initiale). L'eau circule ainsi à des vitesses très lentes dans l'encaissant, ce qui permet la mise en solution de certains minéraux.
 - l'eau doit pouvoir s'évacuer continuellement car les échanges s'arrêteraient si elle atteignait la saturation.

Cela engendre une migration des ions carbonate et calcium tant que l'eau n'est pas saturée. Un front d'altération se propage à partir de la discontinuité et des poches d'altérite se forment, qui ne contiennent que les minéraux insolubles (les fantômes de roche) et conservent la structure initiale de la roche (présence de fossiles, stratification conservée, etc). Ces poches restent en place jusqu'à



leur ouverture et leur vidange par gravité [DOUCET, 2017]. Les vides produits ne montrent aucun amont fonctionnel.

Nous invitons le lecteur désireux d'en apprendre plus sur ces différents procédés de creusement à se référer à [K. M. B., 2011], [K. M. B., 2014], [K. M. B., 2017-1], [K. M. B., 2017-2], [K. M. B., 2018-1] et [K. M. B., 2018-2], la série d'articles parus dans les Spelunca n°124, 133, 145, 147, 149 et 151 sous la plume de Karst Marx Brother.

4.2 Agencement des cavités.

4.2.1 Paysages

Le Karst regroupe un ensemble de paysages variés se développant majoritairement en zone calcaire. La distribution des terrains calcaires en France intéresse majoritairement la moitié nord avec ses grands bassins sédimentaires, mais les zones karstiques sont plutôt dans les massifs montagneux (moitié sud) et représentent en réalité une petite partie de la surface calcaire du territoire. En surface, les modélés sont :

- le Polje (plaine karstique fermée présentant parfois un lac temporaire),
- les karsts à buttes (ex. :morphologie en climat tropical ou tempéré : Baie d'Halong),
- les vallées sèches (anciens réseaux hydrographiques fossilisés par la descente du niveau de base),
- les canyons,
- en zone polaire, les dolines formées de façon plus anciennes se vidangent lors de la fonte de la glace,
- en zone semi-aride, les karst sont peu actifs (anciens réseaux). On trouve également des karst dans des pointements de sel (Salt Cave, Qesm Island, Iran), dans lesquels le concrétionnement se développe sur des durées très rapides, de l'ordre de quelques mois à quelques années.

4.2.2 Développement des grottes et morphologies résultantes.

4.2.2.1 Développement épigène

Dans ce mode de développement, le karst contient un aquifère organisé . Dans les fissures, l'eau dissout le calcaire en régime laminaire (c-a-d : les écoulements sont lents) dans la masse . A partir du moment où l'eau est passée par un conduit plus large, l'écoulement turbulent apparaît et la vitesse d'écoulement augmente. Si l'eau n'est pas saturée, elle va poursuivre son action de dissolution et élargir encore le conduit. Il se forme alors très rapidement un drain, qui va avoir tendance à capturer les autres infiltrations voisines et les conduits se creusent alors beaucoup plus vite jusqu'au collecteur, où l'eau généralement saturée, ne dissout plus que lors des crues car elle n'a, alors, pas eu le temps d'arriver à saturation pendant son transit très rapide. La vitesse de formation de ce type de cavité est de l'ordre de 10kA à 100kA.

4.2.2.1.1 Organisation générale.

L'organisation est majoritairement verticale, avec deux modes de recharge :

- Diffuse, par les fissures, ce qui produit une eau plutôt saturée et incrustante.
- Concentrée, par des pertes en surface, ce qui produit une eau qui peut ne pas être saturée en carbonate de calcium.

On distingue trois zones:

- l'épikarst : les fissures ont tendance à se développer du lapiaz au méandre ;
- la zone vadose ou non saturée, dans laquelle l'eau circule majoritairement verticalement, empruntant des vides aérés ;
- la zone saturée ou phréatique (noyée), dans laquelle l'eau coule plus ou moins à l'horizontale, dans des conduits temporairement ou constamment noyés, vers une sortie à l'air libre (émergence).

4.2.2.1.2 Types d'organisation possibles :

- Karst perché : la source apparaît en versant de vallée au-dessus d'une base imperméable. Exemple : Réseau de la Dent de Crolles, Réseau du Granier.

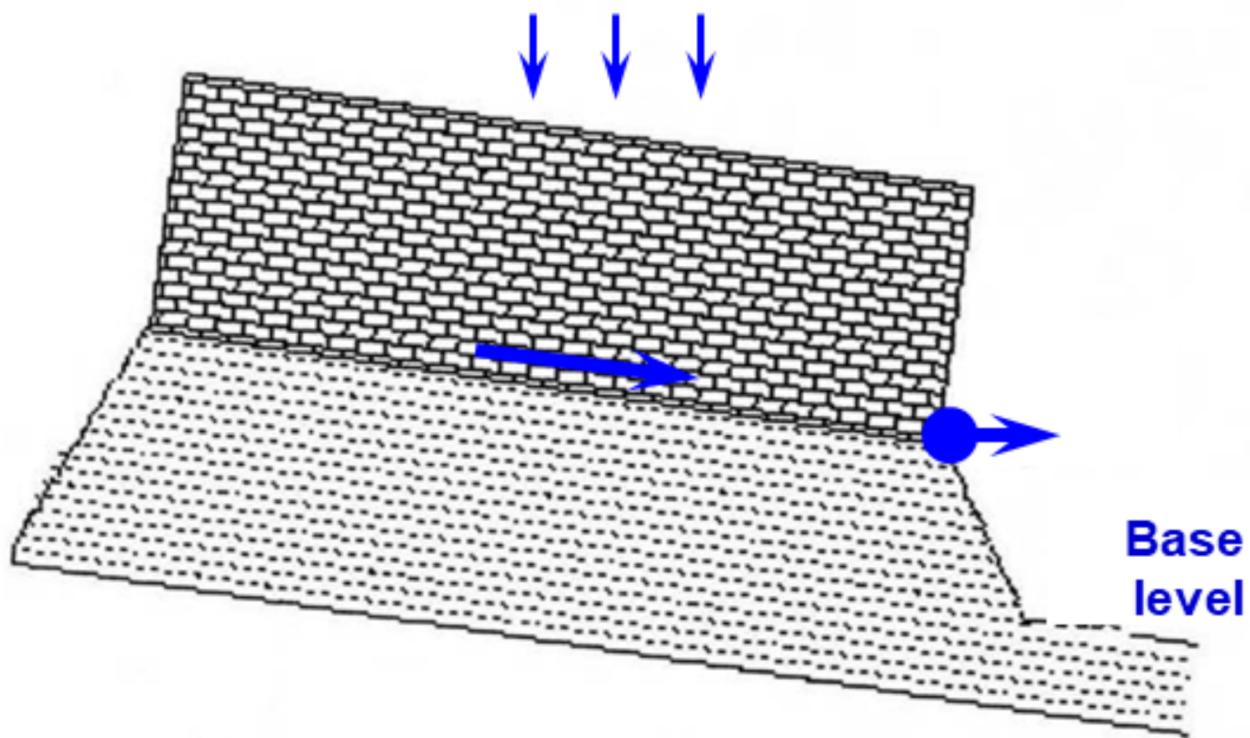


Figure 3: Karst perché : l'eau s'infiltre jusqu'à une couche imperméable à la surface de laquelle elle se rend, par la ligne de plus grande pente, jusqu'à son exutoire. Dessin P. Audra.

- Karst barré (dammed karst) : la source apparaît à la base dans la vallée, au-dessus de la nappe phréatique (figure 4).

La notion de niveau de base est fondamentale. Elle désigne, selon les cas, l'altitude de la couche imperméable sur laquelle repose le lambeau karstifiable, ou bien le niveau de la nappe phréatique quand elle est confinée par une couche imperméable agissant comme un barrage, ou encore l'altitude des émergences pérennes lorsqu'elle est simplement rabattue par les vallées périphériques.

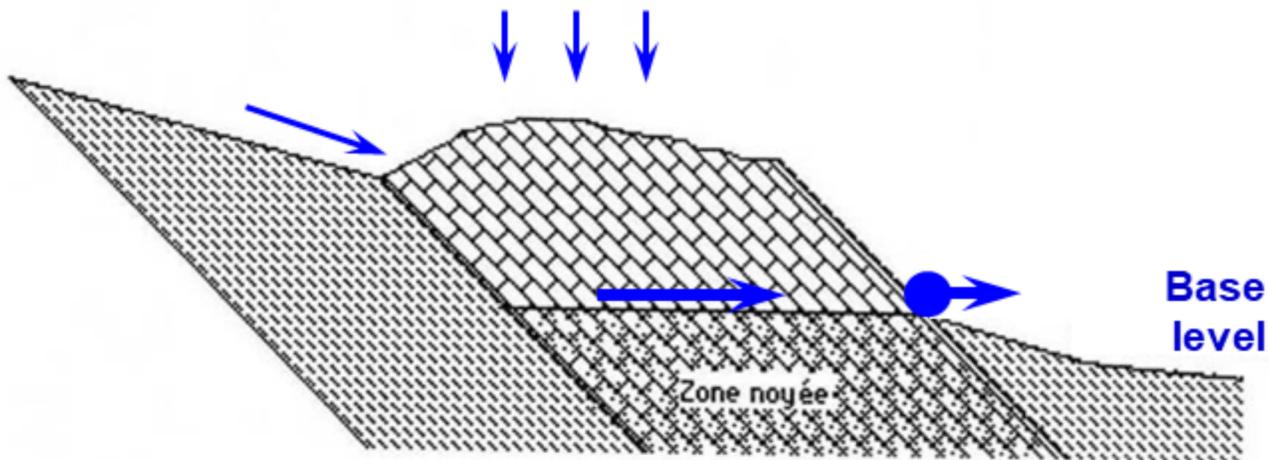


Figure 4: Karst barré : l'eau s'infiltre là où elle peut, dans le calcaire, puis descend jusqu'à la zone noyée, où elle forme une nappe phréatique. L'exutoire est situé l'altitude la plus basse à laquelle la couverture imperméable se trouve. L'alimentation peut également se faire sous formes de pertes concentrées, à l'interface entre le calcaire et les couches imperméables. Dessin P. Audra.

4.2.2.1.3 Morphologie verticale des grottes en fonction de leur age.

- Les cavités juvéniles (figure 5) résultent d'une première karstification rapide, suivant le trajet le plus rapide, avec peu de puits et peu profonds.

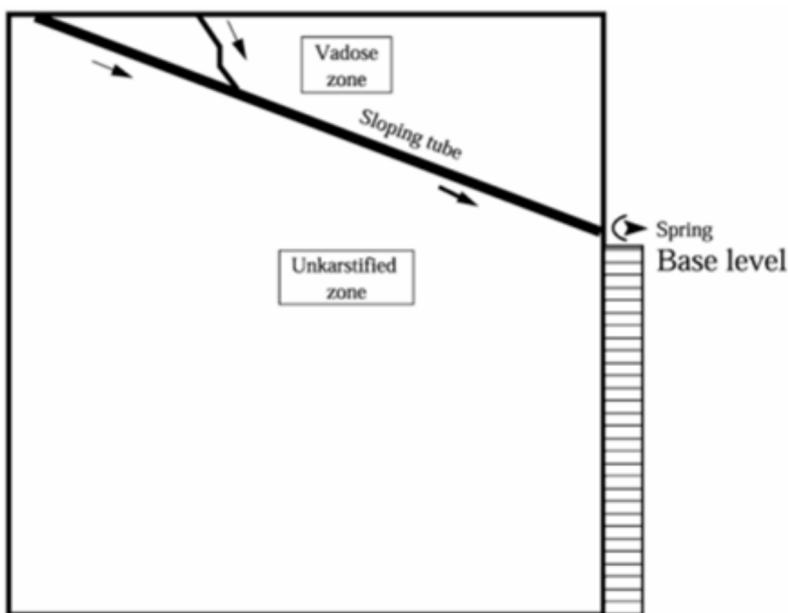


Figure 5: Karst juvénile. L'exutoire se situe au niveau le plus bas possible et juste à l'altitude de la couche imperméable encaissant la roche karstifiable. Dessin P. Audra.

- En karst perché (Figure 6, par exemple, au gouffre Berger), on rencontre des puits et des méandres. La circulation au niveau de base est marquée par des écoulements torrentiels (provoquant une érosion mécanique) et de larges galeries.

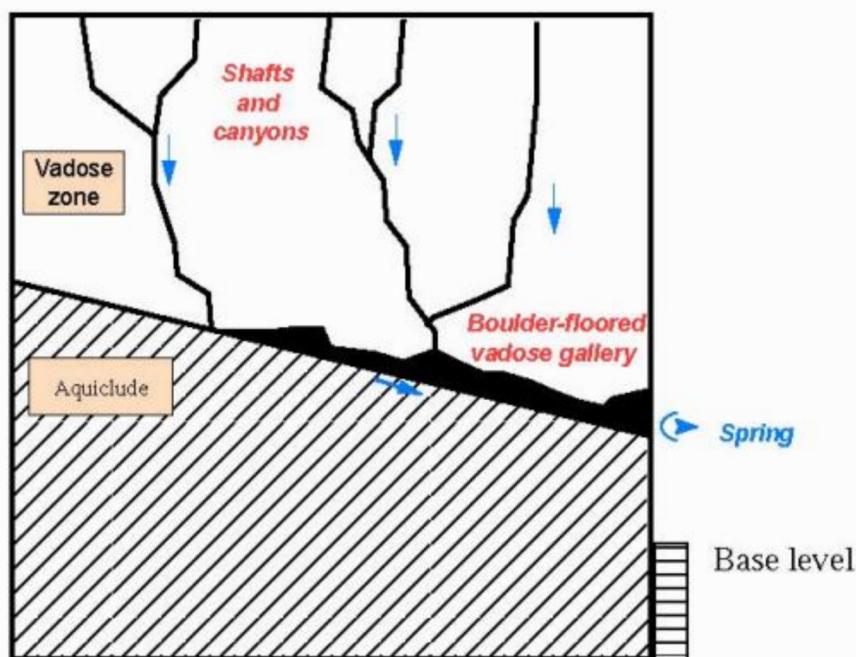


Figure 6: Karst perché mature : existence des trois zones : épikarst, zone vadose et zone de transfert horizontal. L'eau a exploité au maximum le potentiel gravitaire au travers des couches karstifiables. Dessin P. Audra.

- Looping caves (figure) : A l'interface des zones phréatique et vadose on trouve des conduits en montagnes russes. Le drain principal conduit l'eau de manière

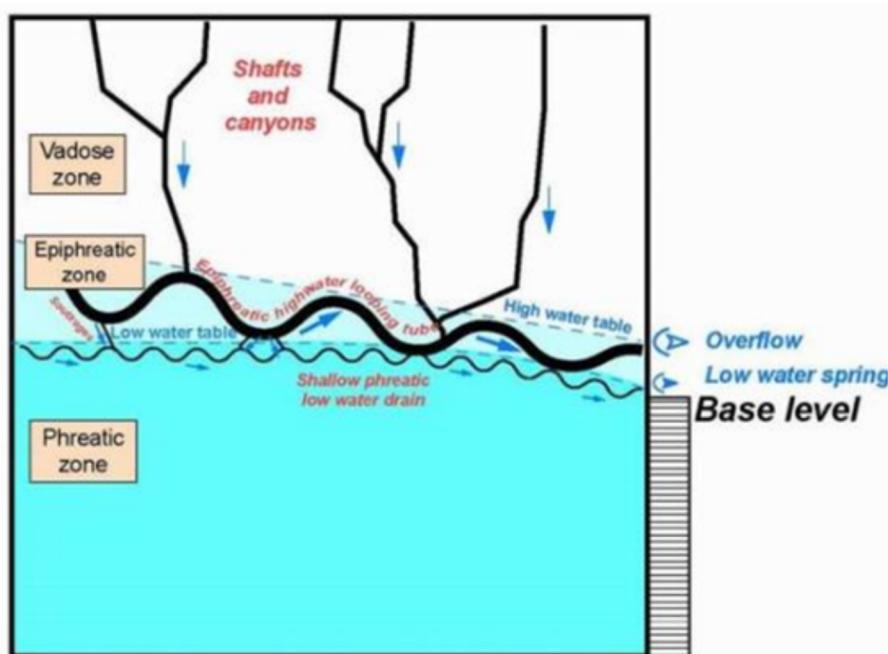


Figure 7: Looping cave : le conduit de base est toujours noyé. Le réseau se met en charge sur une certaine hauteur lors des crues. On trouve donc un drain qui fait des montagnes russes au dessus de la zone noyée. L'amplitude des "loops" est un indicateur de la hauteur de mise en charge. Dessin P. Audra.

lente à l'étiage et il est généralement ennoyé. Lors d'une crue, la montée en charge élève l'eau dans les fractures jusqu'à trouver d'autres chemins qu'elle élargit, créant des boucles au-dessus du drain pérenne. L'ampleur de la montagne russe correspond à l'ampleur des crues. Le sommet des loops correspond au plus haut niveau d'eau (zone de transition). Un exemple de ce type de réseau est le système Bange-Prépoulain, dans le massif des Bauges.

- Water table caves (figure 8): typiquement sur un karst barré, les infiltrations, régularisées par une couverture peu perméable, rejoignent le toit de la zone noyée au niveau duquel elles creusent un conduit suivant le niveau du piézomètre, lequel fluctue de façon modérée puisque la recharge est régulée. Exemple typique : les grottes tunnels (tropiques).

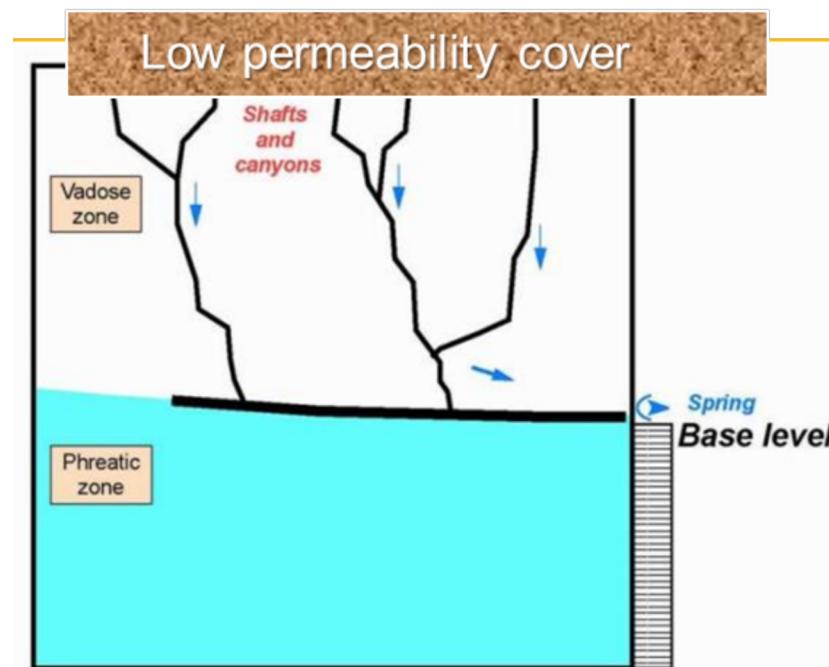


Figure 8: L'infiltration est régulée par la couverture supérieure peu perméable. Le drain au niveau de base est rectiligne car la nappe ne change pas de niveau.
Dessin P. Audra.

4.2.2.1.4 Effets des changements de niveaux de base.

- Descente du niveau de base (figure 9) : le réseau s'étage en altitude, le plus ancien en haut, le plus jeune en bas. C'est le cas du réseau de la Dent de Crolles .
- Remontée importante de niveau de base (Base level rising, figure 10), à la faveur d'une transgression marine ou de la fermeture de la source active lors du comblement d'une vallée : réactivation de conduits fossiles (relicts) ou création de nouveaux conduits remontants. Il existera aussi des conduits profonds, entièrement noyés sous le niveau de base. C'est le cas des réseaux de la Fontaine de Vaucluse et Saint-Marcel d'Ardèche.

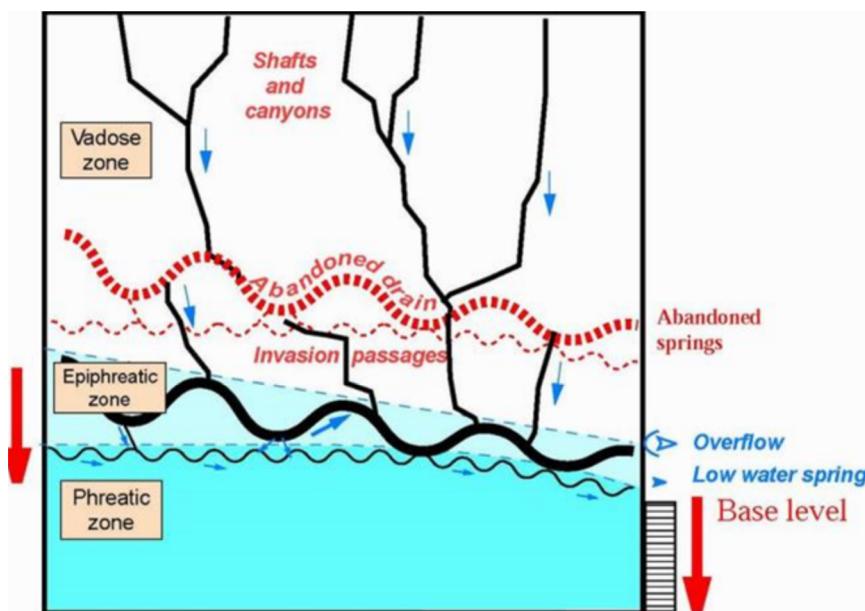


Figure 9: La descente du niveau de base avec l'encaissement de la vallée où se situe l'exsurgence se traduit par l'étagement de différents niveaux recoupés par des puits. Dessin P. Audra.

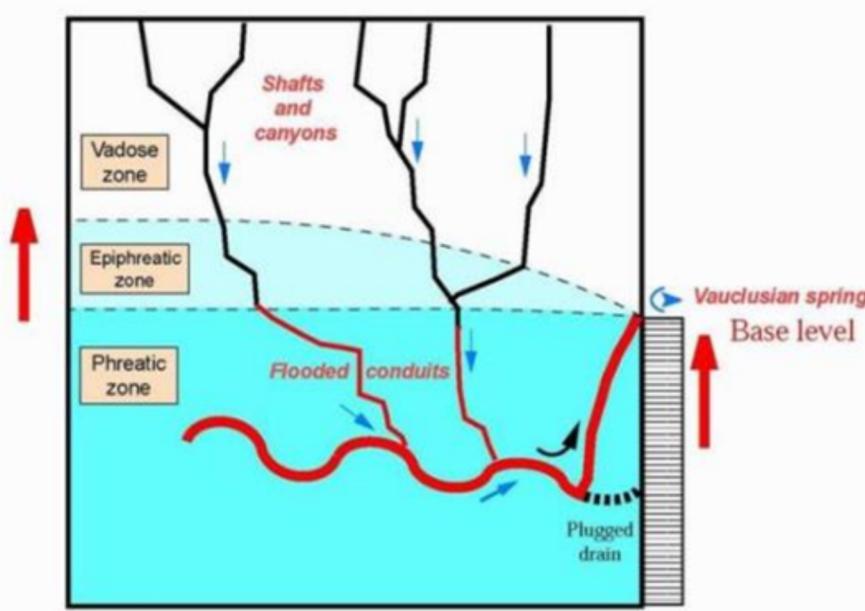


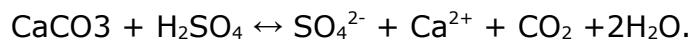
Figure 10: Le comblement de la vallée par des alluvions fluviatiles ou marines constraint le réseau à se réajuster et à creuser un nouvel exutoire remontant en exploitant éventuellement d'anciens conduits désactivés (puits ou galeries de drainage). Dessin P. Audra.

4.2.2.2 Développement hypogène.

4.2.2.2.1 Processus de creusement.

Ce type de développement correspond à un contexte géologique particulier : une série karstifiable et plissée en synclinal repose sur un soubassement imperméable, ce qui forme une bassin (figure 11). Cette couche de calcaire se trouve recouverte par des roches imperméables. Les eaux de pluie ruissent et s'infiltrent dans le calcaire par des pertes concentrées aux interfaces avec le soubassement ou directement dans le calcaire là où il affleure, ce qui forme un aquifère captif. Les précipitations qui arrivent sur le couvercle imperméable ruissent tranquillement en surface et finissent par inciser des vallées, qui s'encaissent et finalement, arrivent à entailler la série karstifiable. Dans ce cas, une exsurgence artésienne va se mettre à fonctionner, qui va drainer l'aquifère sous-jacent, prisonnier dans les calcaires.

Si la couche karstifiable contient du gypse (CaSO_4) et des matières organiques fossiles (pétrole, charbon, lignites... contenant donc du carbone (C) et de l'hydrogène (H) sous formes de molécules plus ou moins complexes), une activité bactérienne peut alors se mettre en place. Les bactéries vont métaboliser les sulfates (SO_4^{2-}) et les matières organiques pour en tirer le carbone, l'oxygène et l'hydrogène nécessaires à leur subsistance et vont rejeter du sulfure d'hydrogène (H_2S), lequel se dissout très bien dans l'eau dans les conditions de pression et de température auxquelles est soumis l'aquifère. On obtient donc une eau chaude, riche en sulfure d'hydrogène, qui va s'écouler par la source. Or, en présence de l'oxygène atmosphérique, le sulfure d'hydrogène ne résiste pas, il est oxydé en acide sulfurique (H_2SO_4). De l'eau acide et du calcaire, on ne demande pas mieux pour creuser des grottes... La réaction chimique correspondante est la suivante :



Les ions calcium (Ca^{2+}) et sulfate sont susceptibles de précipiter sous forme de gypse si l'eau s'évapore, ou de rester dissous dans l'eau, en fonction des conditions. Le dioxyde de carbone produit par la réaction est également susceptible de se

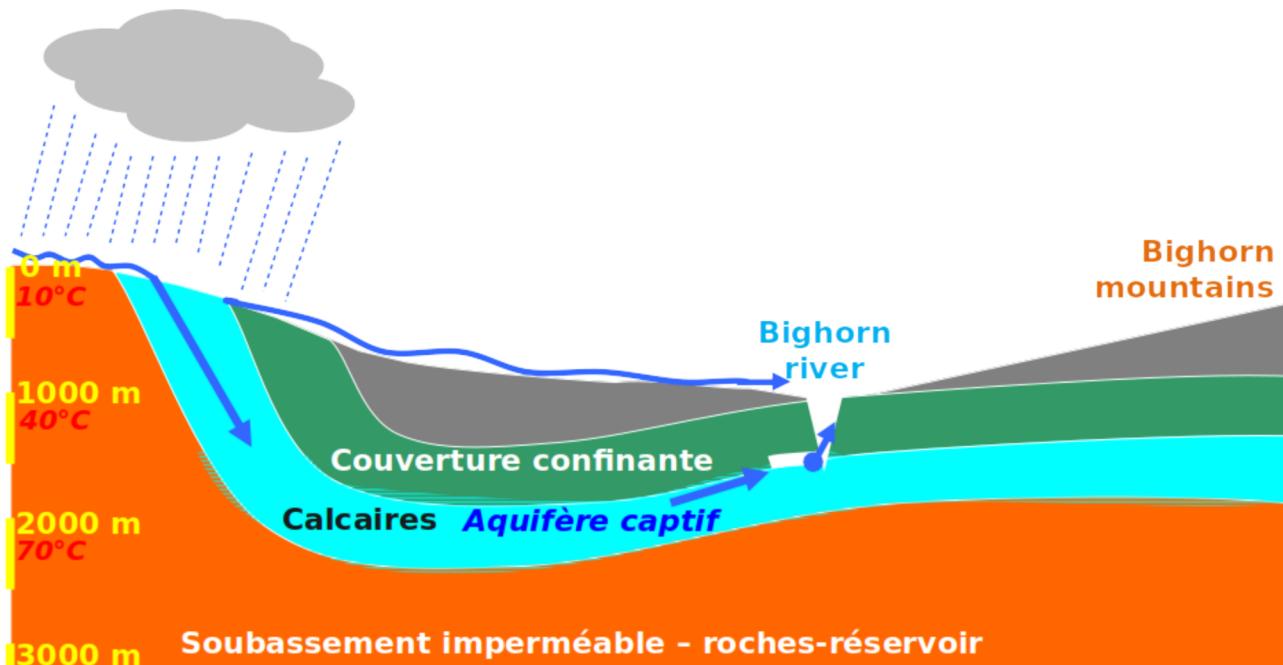


Figure 11: Contexte géologique lié au creusement de Lower Kane Cave (Wyoming). D'après J.C. Nobécourt.

dissoudre dans l'eau, ce qui pourra alimenter un phénomène de dissolution carbonique secondaire. Il peut aussi dégazer dans l'atmosphère de la cavité où il pourra alors participer, conjointement avec le sulfure d'hydrogène, à un phénomène de corrosion-condensation des parois.

4.2.2.2 Formes résultantes.

Les formes de creusement résultant de ce processus sont caractéristiques. Le creusement intervient dans un premier temps à la faveur de la fracturation de la roche, produisant des galeries qui sont alignées sur les fractures préexistantes. L'alimentation en eau sulfurée est assurée par la nappe, via une fissure émissive (« feeder »). L'acide sulfurique va élargir la fissure préférentiellement au niveau de base, ce qui produit un sol plan parcouru par la fissure émissive. Ensuite, la convection et la condensation-corrosion prennent le relais pour élargir le toit de la galerie (figure 12). Au cours du processus de corrosion, il se forme un dépôt de gypse saccharoïde sur les parois au dessus de la nappe. A d'autres endroits, on peut observer des cupules de remplacement (« replacement pockets ») qui sont des demi-sphères évidées dans le calcaire et remplies ou non de gypse, en fonction du caractère actif ou non du creusement. Ces poches se forment lorsque du gypse cristallise sur la paroi. Etant très hydrophile, le cristal de gypse va absorber l'eau acidifiée présente dans l'atmosphère de la galerie, ce qui va déclencher un nouveau processus de corrosion du calcaire à son contact. Dans ces conditions, l'eau présente n'est pas en capacité de dissoudre immédiatement le gypse tant que la phase de corrosion sulfurique alimentée par la nappe est active. En revanche, quand ce processus cesse, le gypse est très rapidement dissout et lessivé par la simple condensation de l'eau sur les parois. A terme, on observera seulement les poches vides.

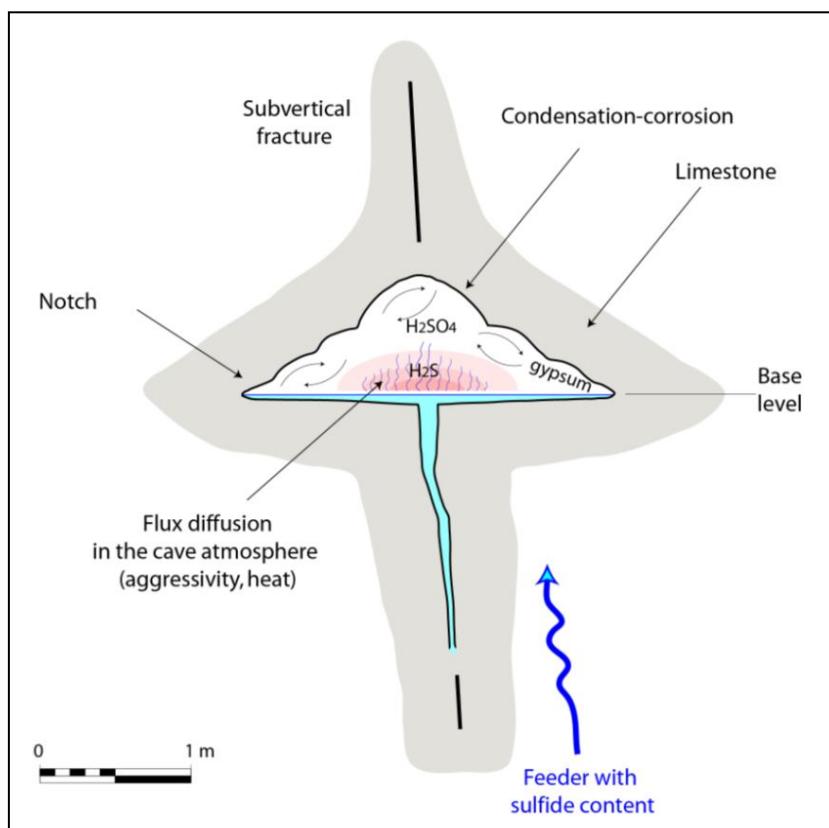


Figure 12 : Profil en coupe caractéristique d'une corrosion sulfurique hypogée. Dessin JC Nobécourt.

4.2.3 Conclusion :

Un réseau karstique est un objet :

- hétérogène et polygénique,
- évolutif,
- complexe.

Les conditions influant sur la spéléogénèse sont :

- la structure géologique adaptée (perché ou barré),
- les conditions de recharge de l'aquifère,
- l'évolution géomorphologique (qui conditionne les variations du niveau de base) de l'environnement de la grotte.

Pour le comprendre, il est nécessaire de bien l'observer dans son ensemble.

5 Elements de Biospéléologie.

5.1 La vie dans le karst

Les conditions régnant dans le karst en font un environnement à priori «hostile» à la vie. Il convient cependant de se poser la question de savoir s'il s'agit d'un désert ou d'une niche écologique. Absence de lumière, de saisonnalité, pas ou peu de sources trophiques (nous avons tous vu du guano sous terre), humidité et froid sont les conditions dans lesquelles la vie doit se développer dans le milieu souterrain. Si la vie existe dans ce milieu, elle doit y être hautement adaptée.

5.2 L'Homme et la vie cavernicole :

Dès le paléolithique, l'ours des cavernes est associé à l'univers sacré de l'animal concurrent de l'Homme dans le milieu souterrain. On trouve cependant des traces archéologiques attestant de l'observation de petits animaux présents dans les grottes. De l'antiquité grecque au Moyen-age la caverne est associée au légendaire (présence de dragons et autres bêtes fantastiques sous terre). Au XVII^{ème} siècle, Valvasor observe de «petits dragons» (des protées) près de Ljubljana, à la source de la Bela. Puis, la science reprend les rênes et en 1772, Giovanni Scopoli classe ces «dragons» parmi les amphibiens. En 1776 Johan Heinrich Sulzer décrit pour la première fois un insecte complètement inféodé au monde souterrain : Dolichopoda Palpata. En 1792, dans la grotte de Fabiano, Spadoni trouve et décrit un spéléomante.

1799 : Alexander von Humbolt explore en Colombie et découvre Steatornis caripensis, un oiseau dans la Cueva de los Guacharos. C'est un oiseau frugivore. Il se nourrit de graines de palmiste. Ses petits fournissent après cuisson une ressource alimentaire pour les populations locales, qui en retirent une huile.

Les XIX^{ème} et XX^{ème} siècle voient l'essor de la systématique et la découverte de nombreuses espèces nouvelles, qui vont poser des problèmes de classification dans un premier temps :

- En 1822 : Samuel Rafinesque Lexington étudie les amphibiens.
- 1830 : Cuvier et Lamarck étudient le protée et considèrent son évolution comme une adaptation au milieu souterrain.



- 1831 : Luka Čeč étudie la grotte de Postojna en Slovénie et recueille un insecte, Leptodirus Hohenwarti(1833) ;
- 1842 : James Ellsworth De Kay décrit un poisson anophtalme (aveugle), Amblyopsis spelaeus dans Mammoth Cave (Kentucky) ;
- 1854 : A Shmidl décrit les grottes slovènes* (et leur faune) ;
- Ignaz Rudolf Schiner définit les notions de
 - troglodytes : animaux qui utilisent les grottes ponctuellement comme abri,
 - troglophiles : animaux qui accomplissent une partie de leur cycle vital dans les grottes
 - trogloxènes : animaux qui ne vivent que dans les grottes.
- 1870 : Eugène Simon étudie les arthropodes ;
- 1897 : Armand Viré fonde le 1er laboratoire souterrain dans les catacombes sous le jardin des plantes de Paris et étudie la faune souterraine. Il crée le terme de biospéléologie.

Les notions de spécialisation et d'évolution n'apparaîtront qu'au XX^{eme} siècle.

- 1907 : Emil Gustav Racovitza développe la «biospéologie» ; qui deviendra plus tard, et en français la biospéléologie.
- 1945 : René Jeannel, qui défendra la théorie de la tectonique des plaques de Wegener, propose de créer en France un laboratoire souterrain consacré à l'étude de l'environnement souterrain dans les Pyrénées ; ce laboratoire impulsé par Albert Vandel, sera dirigé par Alain Mangin à Moulis en Ariège.
- A la fin du XX^{eme} siècle, des chercheurs comme John Avise, aux Etats -Unis, Valerio Sbordoni et Christian Juberthie portent les travaux les plus marquants, avec, par exemple, l'apport de la génétique. En 1980, Juberthie définit la notion de Milieu Superficiel Souterrain (MSS) et publie avec Vasile Decu entre 1994 et 2001 « l'Encyclopeadia Biopseleogica », alors que les travaux de Serban M. Sarbu sur la grotte de Movile (Roumanie) commencent en 1991 et aboutissent à la description du biotope particulier, isolé depuis 5MA, qui s'est développé dans cet environnement. On y trouve toute une faune spécialisée fondée sur la métabolisation de H₂S et CO₂.

5.3 Les spécificités de l'environnement souterrain.

5.3.1 Différentes zones à coloniser.

Dans la cavité, l'éclairement diminue, alors que les variations de température s'atténuent lorsqu'on s'éloigne de l'entrée. La variation de l'éclairement (figure 13) permet de définir un certain nombre de zones en fonction de la profondeur :

Ainsi, on trouve entre :

- zone euphotique, dans laquelle l'éclairement varie de 100 à 38 % de l'éclairement extérieur : saxifrage, aster, quelques animaux de l'extérieur.
- zone photique (entre 38 % et 11 % d'éclairement) : Quelques fougères y poussent, ainsi que des lichens. On y trouve quelques insectes, mais la faune extérieure n'y séjourne pas.

Flux lumineux mesuré en fonction de la profondeur à la grotte de Castelltendine (lt.)

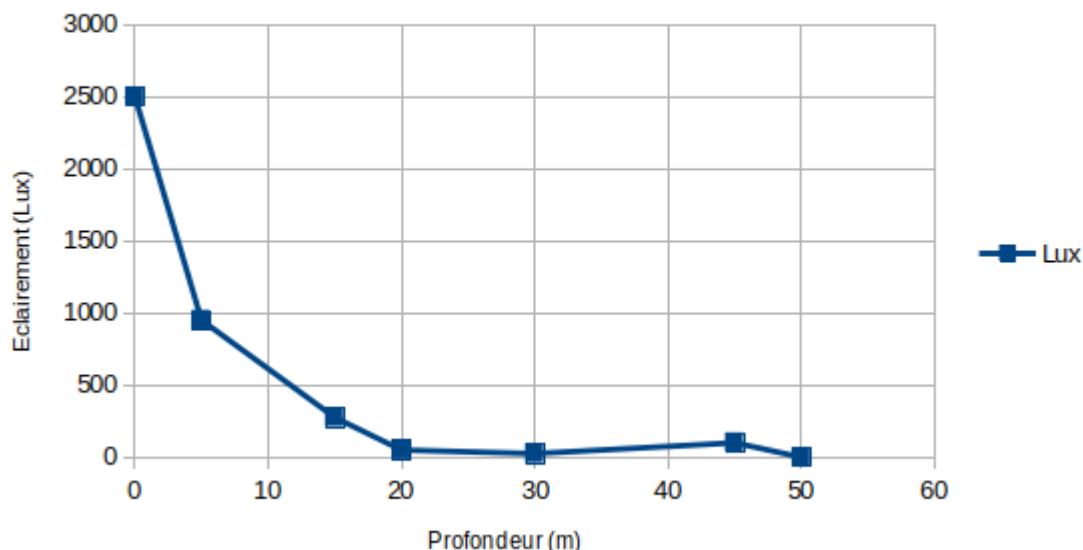


Figure 13: Variation de l'éclaircissement avec la profondeur. D'après JC Nobécourt.

- zone dysphotique (11 %-2 %) : gastéropodes, arachnides, moustiques. Les plantes sont à la limite de leurs capacités d'adaptation, on commence à rencontrer de la faune trogloxène ou troglobie.
- La zone de transition entre l'extérieur et l'intérieur commence dès que l'éclaircissement a diminué de 90 %. On peut également définir une zone dite d'inversion, qui peut être éclairée par réflexion (après un coude de la galerie, par exemple).
- L'obscurité est totale quand il n'y a plus d'apport lumineux de l'extérieur. On parle de zone aphotique.

Dans l'encaissant, on trouve une faune dite Endogée*(racines) qui se trouve dans le Milieu Fissural. Elle rassemble l'essentiel de la biomasse (invisible), par opposition au M.S.S., qui est pénétrable au regard.

Parallèlement, dans un système aquatique, on distingue également :

- La zone interne : stygobiontes (azelles, niphargus),
- La zone intermédiaire : crénobiontes¹ (mollusques),
- La zone extérieure (épigée) : non crénobiontes et faune classique, dominée par les stades larvaires de nombreux insectes.

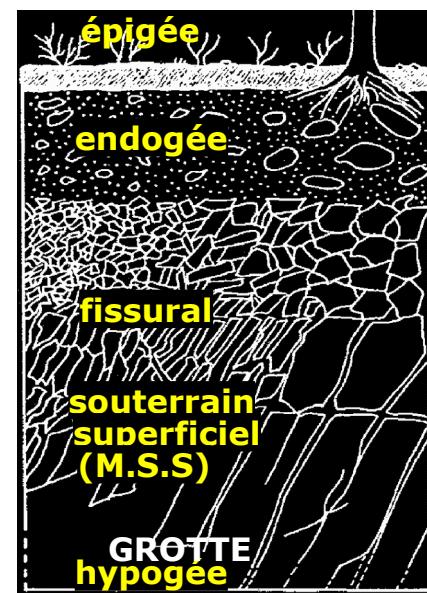


Figure 14: Les différents types de milieux abritant la vie dans le sol. D'après Juberthie et Decu.

1 Le crénion est la zone intermédiaire en termes d'éclaircissement, dans un système aquatique. Il s'agit de la source elle-même et des suintements qui en dépendent.

5.3.2 Règne végétal.

Aucun végétal ne vit dans la zone aphotique. Ceux qui sont présents dans les autres zones sont dits cryptophiles et vivent là au prix d'une augmentation de la surface foliaire. Certaines espèces sont spécifiques de la zone photique, d'autres ont disparu de l'environnement épigée mais trouvent dans la grotte des conditions propices à leur maintien. On les dit « relictus ». Enfin, jusqu'à la limite de la zone aphotique, on rencontrera des algues cyanophycées et rhodophycées.

5.3.3 Champignons.

Dans la zone aphotique, on trouvera des champignons basidiomycètes (pourvus d'un pied et d'un chapeau) importés de l'extérieur, qui peuvent coloniser n'importe quel substrat organique, mais également des ascomycètes parasites vivant sur le tégument des insectes.

5.3.4 Description de la faune

5.3.4.1 Classification de SCHINER (1854)

Il s'agit de la classification la plus usuelle. Elle regroupe la faune que l'on peut rencontrer dans le milieu souterrain en trois catégories :

- Trogloxènes : qui se trouvent dans la grotte par hasard, opportunisme ou pour s'abriter (Ursus Spealeus, spéléologue et karstologue, par ex.).
- Troglophiles : qui se trouve dans la grotte pour accomplir une partie de son cycle vital, mais passe également une partie de son existence à l'extérieur. (chiroptères, lépidoptères, acariens) Parmi eux, on distingue :
 - subtroglophiles : qui fréquentent la grotte pour se reproduire ou à certaines périodes de l'année (trichoptères et lépidoptères)
 - eutroglophiles : qui vivent en grotte mais sortent plus ou moins régulièrement pour se nourrir (speleomantes, dolichopodes, chiroptères).
- Troglobies, qui montrent une adaptation totale au milieu souterrain. Incapables de survivre à l'extérieur. On les regroupe parfois avec les eutroglophiles sous le vocable de : eucavernicoles.

De la même manière, pour le milieu aquatique, on classe la faune en :

- stygoxènes : pour les hôtes occasionnels,
- stygophiles : pour ceux qui y sont à l'aise
- stygobies : strictement adaptés.

5.3.4.2 Micro-organismes

- Bactéries

La plupart des surfaces humides des cavités souterraines sont recouvertes de micro-organismes, sous forme d'enduits bactériens, biofilms et champignons (actinomycètes) ex : baguettes de gours (poolfingers).

En particulier :

- Dans les grottes sulfuriques : on trouve des enduits muqueux sur les parois et dans l'eau, des mucolites produisant des jus acides dont le degré d'acidité peut descendre jusqu'à pH = 2.
- En zone désertique, des dépôts de ferromanganèse se révèlent colonisés par des bactéries qui métabolisent la roche-mère, produisent des acides organiques et intègrent des molécules minérales par chélation. Il s'agit d'un processus proche de celui qui permet la formation des sols en surface et dont il résulte ici un discret « sol sur la roche » ou spéléosol. (Spider Cave, USA).

5.3.4.3 Notion de chaîne alimentaire.

A l'extérieur, pour les espèces épigées, les végétaux sont au début de la chaîne alimentaire car ils disposent de l'énergie de la lumière pour métaboliser des substances élémentaires et fabriquer de la matière organique (on parle d'autotrophisme).

Dans le milieu hypogée, ce sont les bactéries qui tiennent ce rôle et les chaînons suivants sont :

- Saprophages (ils se nourrissent de débris organiques divers),
- Limivores (qui filtrent la boue pour en extraire les nutriments, parmi lesquels des bactéries),
- carnivores.

l'apport nutritif peut être d'origine exogène (guano, sol, cours d'eau, ...) ou endogène, c-à-d dû à des producteurs primaires.

5.4 Les chiroptères.

5.4.1 Généralités

La chauve souris est le seul mammifère volant qui pratique un vol battu. D'autres pratiquent seulement le vol plané. Ses mensurations sont comprises entre 1,5 g pour 15 cm d'envergure et 1400g pour 50 cm d'envergure (roussettes)

Le premier fossile connu date de 50 millions d'années

On recense actuellement 1200 espèces dans le monde (frugivores, hémophages (les vampires), insectivores ou carnassières), dont :

- 34 espèces en France, toutes protégées. Ces espèces sont toute insectivores, avec des



Figure 15 : Squelette de chiroptère en vol. Noter la taille de la clavicule et du sternum ainsi que la position du bassin et des genoux.

mensurations allant de 4g pour 18 cm d'envergure à 76 g pour 50cm d'envergure.

- 31 espèces sont recensées PACA, notamment :
 - Le Minioptère de Schreibers devenu rare (mortalité massive due à une pathologie),
 - Le Murin de Carpaccini
 - Le Rhinolophe euryale devenu rare en PACA (plus fréquent dans le Lot)

Leur aptitude au vol résulte d'une adaptation des membres supérieurs. La membrane alaire (le patagium) est tendue entre les doigts et les flancs/pattes. Il existe aussi un voile tendu entre les pattes et dans lequel s'insère la queue de l'animal : l'uropatagium, tandis que la partie de la membrane qui s'insère entre l'épaule et le poignet (le protatagium), incurvée, forme le bord d'attaque de l'aile et participe de manière très importante à la sustentation en vol.

Les côtes sont toutes soudées au sternum, sur lequel sont attachés les muscles qui permettent à l'animal de voler. Les clavicules sont comparativement plus grosses que chez d'autres mammifères.

Par ailleurs, le bassin est très petit et reculé, ce qui a pour effet de ramener le centre de gravité de l'animal dans sa poitrine plutôt que dans son abdomen et facilite le vol.

Les chiroptères se repèrent grâce à l'écholocation ou sonar (émission de son par la bouche ou le nez et réception de l'écho par les oreilles) et ce système leur permet de chasser. En Europe, les chiroptères sont régulateurs des nuisibles des cultures. Ils mangent jusqu'à 1/3 de leur poids en insectes chaque nuit : une pipistrelle peut manger jusqu'à 3000 insectes par nuit.

5.4.2 Cycle reproductif.

L'accouplement a lieu à l'automne, dans des cavités et à un horaire bien particuliers, entre minuit et 3h du matin (on parle de « swarming »). Toutes les espèces pratiquent la fécondation différée ou la diapause embryonnaire (chez le minioptère). Dans un cas comme dans l'autre, la période de développement de l'embryon ne commence qu'au printemps. La naissance a lieu au début de l'été. La femelle accouche la tête en bas, puis son petit s'accroche à sa fourrure. Ils restent ensemble quelques jours, puis, dès que le petit est capable de rester accroché seul, sa mère repart chasser. En quelques semaines, le petit atteint sa taille adulte et il va vivre sa vie dès l'automne suivant. Il est à noter que, chez certaines espèces, la gestation n'arrive pas à terme si les

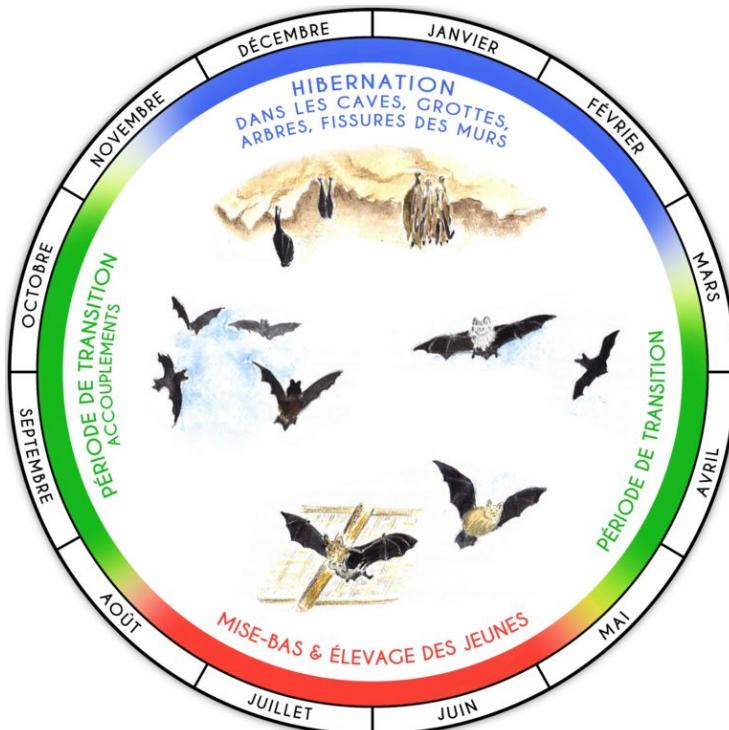


Figure 16 : Cycle biologique de chiroptères en Europe. Source : L.P.O.



ressources nutritives dont dispose la mère ne sont pas suffisantes. Ainsi, il peut y avoir des années avec une très faible natalité si les conditions ont été mauvaises.

5.4.3 Cycle de vie annuel.

Le cycle biologique des chiroptères se décompose en 4 phases, qui correspondent avec les saisons :

- au printemps, l'animal sort d'hibernation et part chasser. La gestation des femelles démarre ou reprend à ce moment-là, et va durer entre 45 et 90 jours. On parle de transit printanier, car les chauves souris vont changer de gîte régulièrement.
- l'été est la saison de la mise bas et de l'éducation des petits. Il se passe dans un gîte en général assez chaud, dans lequel les animaux changent de place au cours de la journée, en fonction de la température.
- L'automne est la période des amours. Les chauves souris de l'année commencent leur vie d'adulte. L'ensemble des individus changent de gîte, ce qui a pour effet de brasser les gênes de la population.
- L'hiver est la saison de l'hibernation. Les chauves souris consomment les réserves qu'elles ont accumulé sous forme de graisse brune au cours de l'été et de l'automne. Elles se réveillent de temps en temps pour changer de place si besoin. L'hibernation correspond à un ralentissement extrême des fonctions vitales, ainsi, chez le Murin à moustaches, on observe un rythme cardiaque de 4 battements/min et une température corporelle de 6°C.

Les gîtes choisis peuvent être des grottes offrant une température constante indispensable aux chauves souris endothermes, mais également sous les plafonds ou dans des loges, dans les arbres vivants, en falaise, dans les ponts, derrière les volets ou dans les combles. Le type de gîte diffère d'une espèce à l'autre, en fonction de la température à laquelle elles doivent hiberner et des circulations d'air. Ainsi, à la Grotte de Bangs, dans les Bauges, on observe des espèces différentes en fonctions de l'endroit où l'on se situe dans la grotte.

5.4.4 Suivi scientifique, mesures de protection.

Les modalités de suivi des populations comportent :

- des comptages visuels durant l'hiver, sur les mêmes sites chaque année,
- des captures assorties de mesures vétérinaires,
- de la télémétrie : Batbox, écoute des sons et ultrasons émis.

Il existe une Convention cadre de partenariat (projet 2019) entre les Conservatoires d'espaces naturels, la SFEPM et la FFS pour le suivi des populations de chiroptères.

5.4.5 Conduite à tenir pendant les sorties sous terre :

On ne saurait trop souligner l'importance du cadre qui accompagne la sortie dans ce rôle de protection :

- En amont : adapter le lieu de pratique à la période de l'année, en fonction des enjeux de chaque site. Cela implique de connaître les lieux fréquentés par les chiroptères et de communiquer en cas de rencontre inopinée.
- Pendant la sortie :
 - Être attentif aux indices de présence :
 - Traces d'urine,
 - salissures,



- guano,
- déchets d'élytres,
- etc
- En cas de rencontre :
 - Limiter le temps d'attente sous la chauve-souris, surtout en hiver, car il s'agit d'une période sensible. Un animal réveillé trop souvent et qui aurait épuisé ses réserves pourrait décéder ou ne pas mener sa gestation à terme.
 - Éviter les photographies, pour les mêmes raisons, sauf à des fins de documentation.
 - Être attentif aux premiers signes de dérangement et de réveil (les rhinolophes vont faire des tractions, par exemple),

6 Instrumentation au service de l'exploration.

La connaissance du milieu souterrain passe par la prise d'un certain nombre de renseignements, parmi lesquelles des mesures physiques (de dimension, d'autres paramètres physico-chimiques ou encore du biotope, des concrétions, etc.).

6.1 La topographie.

La topographie consiste à relever les dimensions de la cavité, afin d'en établir le plan et des coupes pour mieux comprendre son agencement spatial. S'il s'agit, en première approche, d'un outil pour ne pas se perdre, c'est également l'indispensable canevas sur lequel on s'appuiera pour imaginer d'autres mesures, les mettre en œuvre et en reporter les résultats, ou planifier des explorations.

Selon le but que l'on se fixe, la topographie sera faite à plus ou moins grande échelle et comportera dans son rendu les détails qui paraissent importants à son auteur. Il s'agit donc aussi d'une interprétation de la cavité. Ce dernier aspect n'est pas à négliger, car il différenciera le rendu final.

6.1.1 Les instruments.

Le levé topographique consiste à définir un certain nombre de points (les stations) entre lesquels le topographe fera des visées. Il relèvera la distance entre les stations, la pente (l'angle de la visée par rapport à l'horizontale) et l'azimut (la direction de la visée par rapport à une référence, en général, le Nord magnétique), ainsi que la largeur et la hauteur de la galerie et d'autres détails. Les outils utilisés doivent permettre de recueillir l'ensemble de ces données et d'en garder la trace.

- Mesure des distances. Il convient de se mettre d'accord sur l'unité dans laquelle le résultat sera annoncé.
 - Le topofil mesure la longueur de fil dévidée entre deux stations à l'aide d'un index. Il est assez peu précis et nécessite deux lectures (index de départ et d'arrivée) pour chaque mesure.
 - le décamètre : lecture directe de la distance entre les stations sur le ruban. Limité par la longueur du ruban.
- Mesure de la pente: le clinomètre ou le clisimètre est un appareil qui mesure l'angle de la visée par rapport à l'horizontale ou à la verticale. Il faut tenir l'appareil dans un plan vertical pour faire une mesure précise.

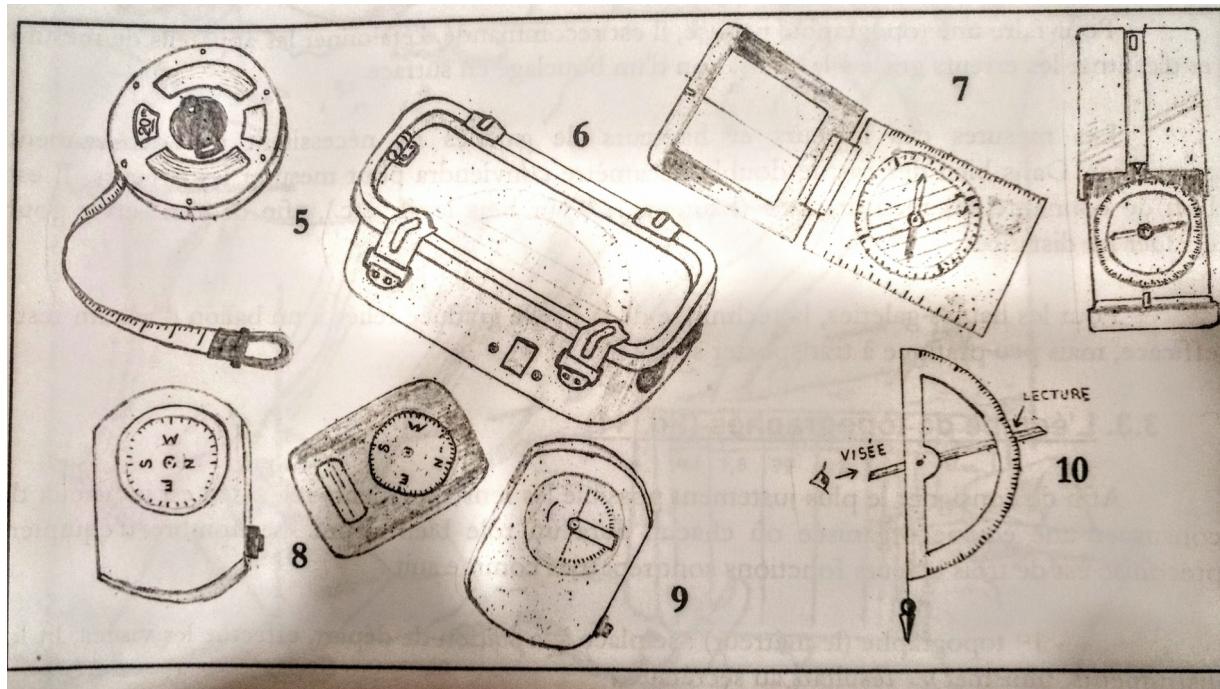


Figure 17 : Les instruments traditionnels de topographie souterraine :

5 : décamètre	6 : topo fil	7 : boussoles
8 : compas	9 : clinomètre	10 : clisimètre

D'après P. Prophète

- Mesure de l'azimut.
 - la boussole est constituée d'une aiguille aimantée, qui pointe vers le Nord Magnétique. On lit l'angle de la visée sur la rosace fixe par rapport au bâti..
 - Le compas est une roue graduée, solidaire de l'aiguille. On lit l'angle sur la roue, par rapport à une repère solidaire du bâti.
 - Quelque soit l'instrument utilisé, il convient d'être vigilant aux perturbations du champ magnétique terrestre causées par les appareils électroniques en fonctionnement (notamment les LEDs) et à la présence de masses métalliques contenant du fer près de l'appareil de mesure. Pour les LEDs, on conseille en général, de tenir son éclairage à plus de 10cm de l'appareil pour ne pas perturber le champ magnétique local.

N.B. Attention aux unités de mesure d'angle lors des calculs : un tour complet fait 360° ou 400 grades (gon). Ne pas utiliser l'unité correcte lors des calculs conduirait inévitablement à des erreurs.

- Le Disto-X est un appareil qui combine un distance-mètre laser, un clinomètre constitué de trois accéléromètres qui permettent à l'appareil de mesurer la pente de la visée avec une assez bonne précision, quelle que soit la position de l'appareil et d'un compas numérique. Les trois valeurs s'affichent à l'écran. Il est également capable d'enregistrer la série de mesures effectuée sous terre et de la transférer directement par Bluetooth dans un logiciel comme topodroid, dans un Palm ou dans un ordinateur, au format .csv. Il s'agit de l'équivalent d'une station totale pour le spéléologue. La principale difficulté liée à son utilisation est d'arriver à viser



Photographie 2 :
Un distoX.

précisément (sans trembler) le point topo. Dans la suite, nous détaillerons la prise de mesure à l'aide du Disto-X exclusivement.

- la mémoire de la topo : le carnet.

Le carnet topo est le support essentiel car il permet de garder la trace de toutes les mesures. Il doit être préparé avant la sortie. Il est constitué d'une page de garde sur laquelle on inscrit :

- le nom de la cavité,
- ses coordonnées (si on les connaît),
- la date,
- le nom des topographes,
- le sens dans lequel sont effectuées par défaut les visées (direct, c.-à-d dans le sens de la progression, ou inverse).

Les pages suivantes sont les tableaux de mesure. Ils comportent 9 colonnes : le nom de la visée, sa longueur (L), l'azimut (Az), la pente, la largeur à gauche (\leftarrow), la largeur à droite (\rightarrow), la distance entre la station et le plafond (\uparrow) ou le sol (\downarrow), ainsi que les notes qui paraissent utiles (cf figure 18).

6.1.2 La méthode.

6.1.2.1 prise de mesure sur le terrain.

La prise de mesure est la première étape du processus et la plus importante car si elle comporte des erreurs, il faudra certainement revenir sur place pour les éliminer. Une équipe de lever topographique comporte deux ou trois opérateurs. Le premier fait les mesures et les communique, le second les note sur le carnet et le troisième dessine le croquis de la topographie sur un autre carnet, en prenant soin d'y reporter l'emplacement des points topo. Si l'équipe ne comporte que deux personnes, celui qui tient le carnet doit également faire le croquis. L'un des équipiers qui ne prend pas les mesures peut également anticiper l'emplacement de la prochaine station. A cet effet, il peut utiliser des cairns, des marques rétro-réfléchissantes,

Visée	L	Az	Pente	\leftarrow	\rightarrow	\uparrow	\downarrow	Notes
20								
0-1	8,05	124,5	-30,7					souquet piquet D
	8,06	123,3	-31,1					porte-pièce
2-1	10,4	85,5	-14,1					souquet, hor. inf
2-3	8,24	261,2	+5,7					souquet veine calcaire blanche
4-3	7,16	115,6	-29,1					judi-folaise
4-5	12,37	246,6	+2,6					bloc devant entrée.
5-6	4,4	305	+10,4	1		0	1,8	entrée parche sup.
6-7	4,58	2,2	-26,9					fourd perch.
7								sol cailloutis galeté
2-8	5,04	338	-8,1	1,30				fourd trou 14f
								visée 20 au en dessous
								2
								couloir clair souterrain.

Figure 18 : Page d'un carnet topo. Certaines visées ne comportent pas d'indication de largeur ni de hauteur de la galerie car elles ont été effectuées à l'extérieur de la cavité. La troisième visée a été effectuée en sens inverse à la progression, c'est pourquoi elle est notée 2-1.

ou encore du vernis à ongle ou des Posca pour le matérialiser. Voir les figures 19 et 20.

Le mesureur pointe la station avec le laser du Disto-X, puis déclenche la mesure. Il annonce alors les valeurs fournies par l'appareil, toujours dans le même ordre, en utilisant les mêmes unités et la même précision (sur laquelle l'équipe aura pris soin de se mettre d'accord au préalable). Il annonce ensuite les dimensions de la galerie au voisinage de la station qu'il occupe, puis passe à la suivante.

l'opérateur qui tient le carnet de notes reporte les résultats annoncés par son équipier, note tout ce qui lui paraît pertinent, puis va repérer le point suivant, en accord avec lui.

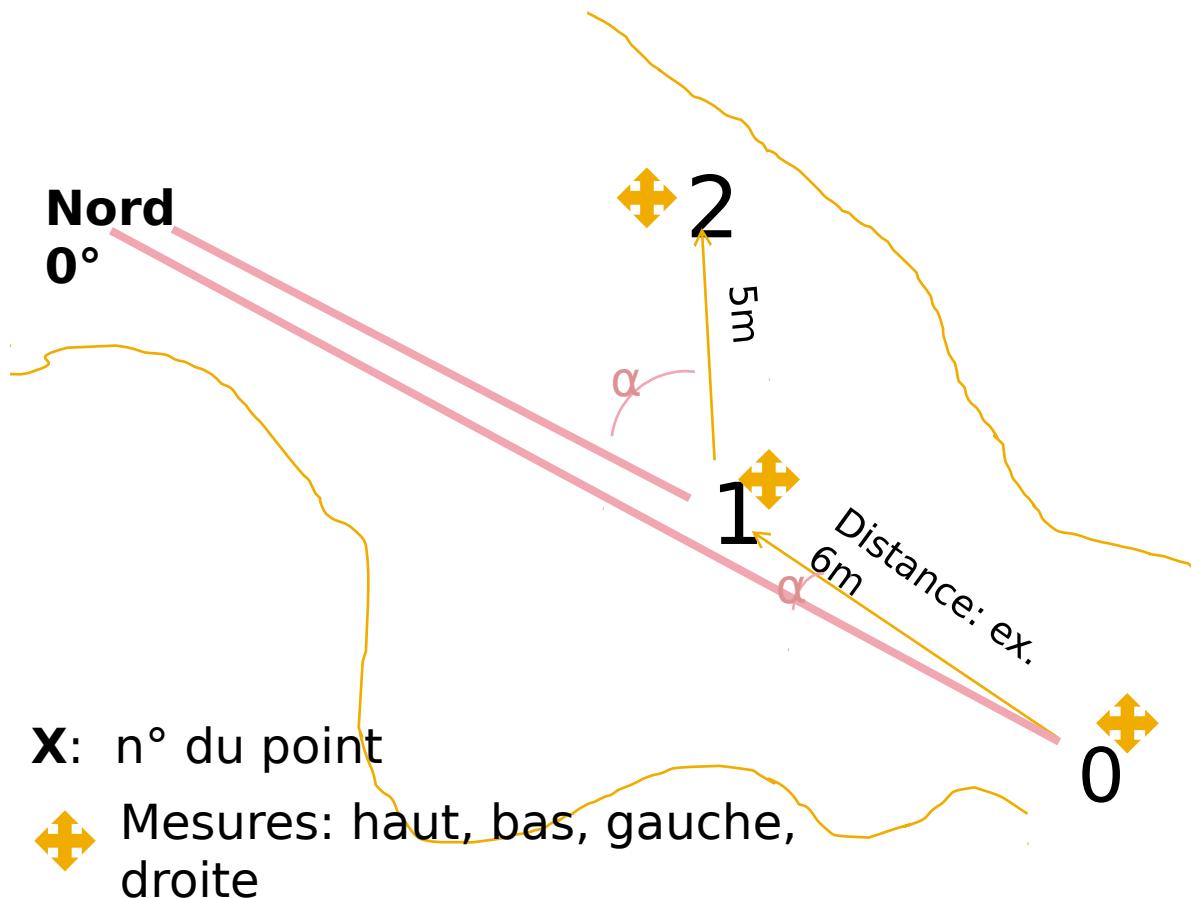


Figure 19: Ce schéma en plan comporte trois stations : 0, 1 et 2, ainsi que deux visées : 0-1 et 1-2. Chacune est caractérisée par sa longueur, son azimut et sa pente. La progression se fait de la droite vers la gauche. Dessin L. Durand.

L'éventuel troisième opérateur croque la galerie en plan et en coupe, en prenant soin d'être aussi exhaustif que de besoin, en fonction du but dans lequel la topo est levée.

6.1.2.2 Les calculs.

Les calculs et le report sont effectués de retour chez soi. Traditionnellement, ce sont des calculs basés sur la trigonométrie qui sont mis en œuvre, à la main, ou à l'aide d'une calculatrice scientifique, programmable ou non. Le but est de déterminer les coordonnées des différentes stations dans un repère que l'on a choisi, puis de reporter la position des stations dans ce repère. L'on peut également, à l'aide d'une

règle et d'un rapporteur, tracer directement le report des visées sur papier. Depuis quelques années, des logiciels existent, qui se chargent du calcul et du tracé du cheminement tous seuls, au prix de la saisie ou de l'import des données. Parmi eux, on peut citer VisualTopo, dont le rendu pour une partie de la topographie de la grotte du chat est présenté figure 21.

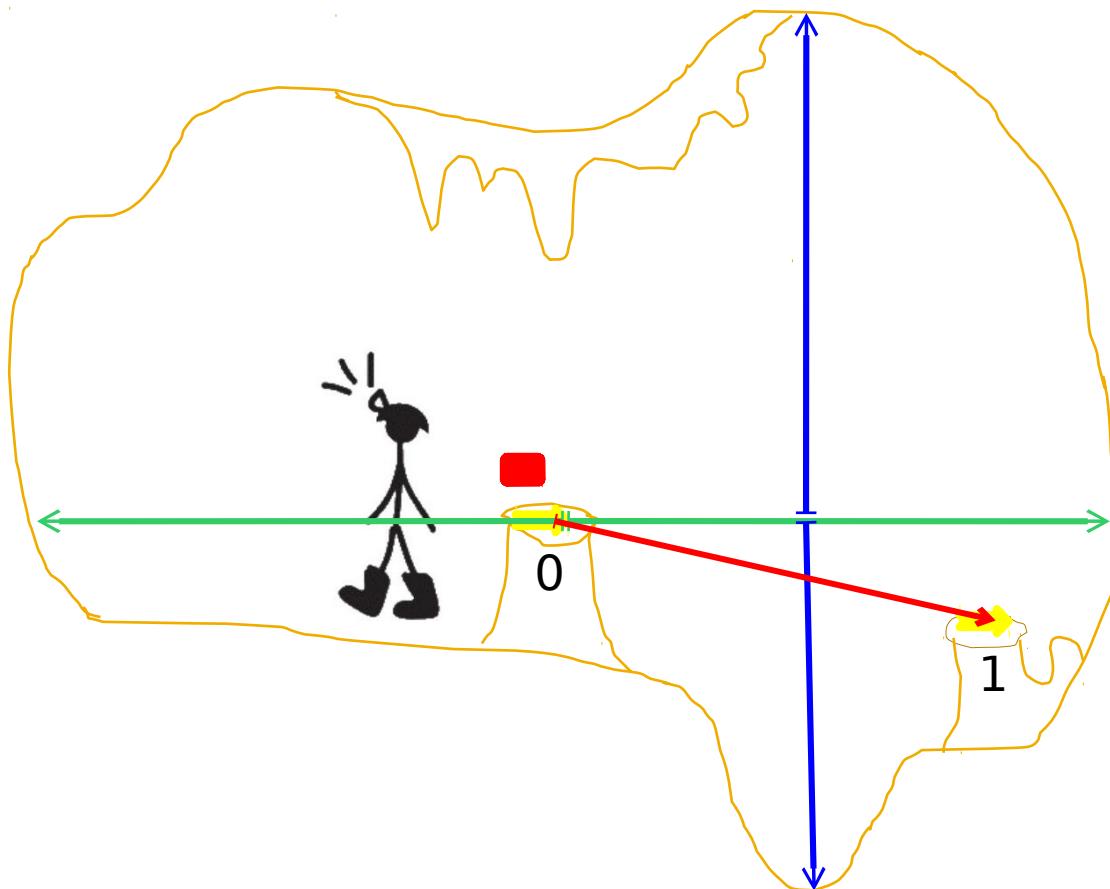


Figure 20: La cavité précédente, vue en coupe au niveau du point 1. Les dimensions horizontales sont prises au niveau et à partir du point topo. En revanche, le topographe a choisi de mesurer la hauteur et la profondeur ailleurs, mais conserve comme référence l'altitude du point. Il conviendra de le noter sur les croquis. Dessin L. Durand.

6.1.2.3 Le dessin du plan et de la coupe.

Il s'agit de la partie interprétative de la topographie. Elle consiste, en se basant sur les notes et les croquis pris lors du levé, à habiller le squelette constitué par les visées (voir figure 21) pour tenter de représenter la cavité.

Le plan est la projection du squelette habillé sur un plan horizontal. La direction du N.M. doit être indiquée. Pour des cavités comportant plusieurs niveaux, cette méthode peut aboutir à une superpositions de galeries qui s'entrecroisent, pour un résultat finalement peu lisible. Si les niveaux sont bien différenciés, il est possible de réaliser plusieurs plans à différentes altitudes en indiquant les raccordements entre eux.

Il existe deux façons de réaliser la coupe :

- Une coupe développée consiste à mettre les différentes visées bout- bout, en prenant en compte leur longueur réelle. On peut éventuellement rendre

compte de virages importants dans le cheminement en rabattant une visée par rapport à la précédente. Cette coupe est peu adaptée aux réseaux labyrinthiques qui comportent des branches parallèles de longueurs différentes car on ne pourra pas les raccorder.

- La coupe projetée consiste à projeter (comme son nom l'indique) le squelette établi en 3D sur un plan vertical bien choisi. Cette coupe ne permet pas de se rendre compte des distances parcourues dans la cavité, mais peut permettre de mieux appréhender l'agencement des galeries les unes par rapport aux autres. Tout comme pour le plan, il est possible de réaliser plusieurs coupes de différents réseaux parallèles en indiquant leurs points de raccordement.

Une fois le dessin des parois terminé, il faudra rajouter éventuellement des coupes en travers des galeries et indiquer l'emplacement de certains éléments remarquables au moyen de signes conventionnels (voir plus loin).

Quelque soit le rendu sur lequel travaille le topographe, il doit faire des choix qui relèvent de sa seule appréciation. Il ne faut pas perdre de vue que le rendu est une interprétation des données et des croquis levés sous terre par une équipe. Il est donc indispensable que les topographes se mettent d'accord sur les objectifs de leur travail avant la séance de topo, de manière à prendre toutes les infos nécessaires sur place pour ne pas être obligés de revenir plus tard s'il en manque.

6.1.2.4 **Signes topographiques conventionnels**

Afin de favoriser la compréhension des topographies et la communication entre spéléologues au niveau international, l'UIS a adopté en 1999 un certain nombre de signes topographiques conventionnels. La liste de ces symboles est donnée en annexe, p 72 et se trouve très facilement sur l'Internet. Pour les fans de dessin sur informatique, plutôt qu'à la main, il existe des librairies contenant ces signes pour le logiciel Adobe Illustrator.

6.1.2.5 **Pour aller plus loin**

Le lecteur intéressé ne manquera pas de se référer à [PROPHETE, 1998] ou à [GHOMMIDH].

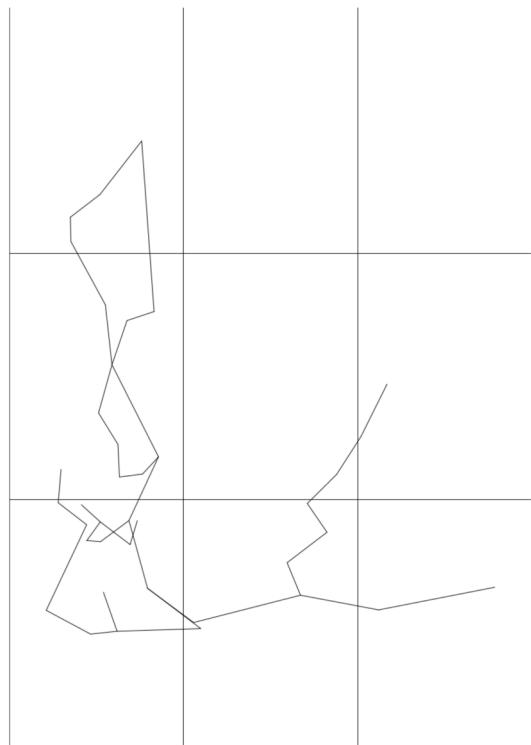


Figure 21 : Le squelette en plan de l'entrée de la grotte du chat et du cheminement extérieur, obtenu à l'aide de VisualTopo. Compte-tenu de l'échelle choisie, il occupe 9 feuilles A4

6.2 Les mesures d'autres paramètres physico-chimiques.

Différents paramètres physico-chimiques peuvent également être mesurés ponctuellement ou sur une période plus longue pour comprendre le fonctionnement global de la cavité : régimes aérologique et hydrologique, composition de l'atmosphère. Pour cela, différents capteurs, couplés ou non à un enregistreur, existent.

6.2.1 Mesures ponctuelles.

Des mesures ponctuelles sont réalisées lors d'une visite de la cavité. Selon le matériel disponible, on peut analyser la température de l'eau ou de l'air, la conductivité de l'eau, la vitesse de déplacement de l'air, la composition atmosphérique.

L'utilité du conductimètre a été abordée dans [FRANCFORT, 2014]. Retenons simplement que la conductivité de l'eau est influencée par sa charge minérale, la nature des ions en solution et sa température, de ce fait, le conductimètre est souvent couplé avec un thermomètre. Des eaux de provenance différentes se différencieront par leur conductivité. De telles mesures ont été effectuées pendant le stage à la Grotte du Chat, ainsi qu'à la source sulfureuse du Riou. Les résultats sont présentés au chapitre 7.4.1, p 51.



Figure 22: deux modèles de conductimètre couplés à des thermomètres.

La température et la vitesse de déplacement de l'air sont des données intéressantes pour aborder le fonctionnement aérologique d'une cavité. Un anémomètre à hélice ou à fil chaud permet de mesurer la vitesse de déplacement de l'air. Le principe de l'anémomètre à fil repose sur la mesure de la variation de température d'un fil chauffé, ce fil refroidissant d'autant plus que l'air circule rapidement autour de lui. Des exemples de mise en œuvre et d'exploitation de ce type de mesures sont disponibles dans [LISMONDE, 1991] et [MAGNE, 2017]. Pour une étude plus approfondie du sujet, on pourra se tourner vers [LISMONDE, 2002-1].

Enfin, la composition de l'atmosphère de la cavité peut être suivie au cours de l'exploration si l'on s'attend à la présence de gaz nocifs (cavité connue pour la présence de CO₂ ou séance de désobstruction à l'explosif, par exemple). L'appareil utilisé peut ainsi mesurer la présence d'un ou plusieurs gaz et afficher la concentration

de chacun en ppm² et/ou marquer par un signal sonore un niveau-cible fixé à l'avance.



Figure 24:
Anémomètre à fil
chaud. Le fil chaud
est situé en haut du
cylindre.



Figure 23: Deux
analyseurs de gaz. Celui de gauche
est capable de mesurer les teneurs de
5 gaz différents, en fonctions des
cartouches qui y sont insérées. Celui
de droite ne détecte que le CO₂.

Les détecteurs de gaz sont majoritairement utilisés comme équipement de protection vis-à vis de gaz indétectables à l'odorat, beaucoup plus rarement comme moyen d'analyse en tant que tel de la composition de l'atmosphère d'une cavité.

6.2.2 Mesures sur une période temporelle.

Ce type de mesures nécessite des capteurs autonomes, capables de répéter la mesure à intervalle régulier et d'enregistrer les résultats, afin d'établir des chroniques temporelles pour faire des comparaisons entre différentes périodes de l'année ou des années successives. Les paramètres mesurés sont souvent la pression (atmosphérique ou hydrostatique) et la température. Cependant, on peut ranger dans cette catégorie les fluorimètres et, à la limite, les fluocapteurs.

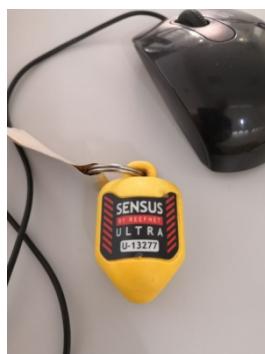


Figure 25: Sonde
Reefnet Sensus
Ultra.

- Les sondes Reefnet Sensus Ultra associent un capteur de pression et un capteur de température. Il s'agit à l'origine de capteurs destinés aux plongeurs, mais les spéléos les ont détournés afin de mesurer les hauteurs de mise en charge
- 2 Le ppm (partie par million) est une unité de mesure de fraction. Un ppm correspond à une fraction d'un milligramme du gaz recherché par kilogramme d'air, ou un ml de gaz par litre d'air. Dans ce dernier cas, on devrait plutôt parler de ppmv (partie par million volumique).

en un point particulier du réseau ou d'essayer d'analyser la propagation d'une crue le long du drain. Elles doivent être relevées et déchargées une à deux fois par an, ou plus, selon la fréquence d'échantillonnage choisie lors de la mise en place de la sonde. Le fabricant annonce une capacité de stockage de 1500 heures au pas d'une mesure toutes les 10 secondes, ce qui représente 540000 valeurs. Cela permet d'enregistrer pression et température pendant près de 15 ans en réalisant une mesure tous les quart d'heure (ce que l'autonomie de la pile ne permet pas, toutefois). D'un encombrement très réduit, ils sont robustes et facilement transportables. En fonction de l'usage qui en sera fait, il peut être intéressant de les placer dans un tube tranquillisateur qui les protégera des remous, car la sensibilité du capteur de pression permet d'enregistrer des variations de niveau d'eau de l'ordre du cm. Les données sont déchargées dans un ordinateur, via un terminal dédié, sous la forme d'un fichier au format .csv, lisible à l'aide du logiciel dédié fourni par le fabricant ou sous Speleograph, un logiciel conçu par la commission scientifique de la FFS et le Comité spéléologique Régional de Côte d'Azur, avec le soutien du CDS 06. Ce dernier à l'avantage de permettre d'afficher ensemble les mesures de capteurs qui n'ont pas le même pas d'acquisition, et ceci, quel que soit le type de capteur.

- Les capteurs iButton utilisés sous terre sont des microcapteurs de température et d'hygrométrie de l'air. De la taille d'une pièce de 20 centimes, ils permettent le suivi de ces paramètres sur de longues périodes. Destinés au départ au suivi de la chaîne du froid ou à la mesure de températures dans les autoclaves, ils sont détournés par les spéléos pour l'étude du climat souterrain. De tels capteurs ont été mis en œuvre dans la grotte du Chat dans les années passées.



Figure 26: Capteur iButton pour la mesure de la température et de l'hygrométrie.

- Les fluorimètres sont des capteurs qui enregistrent la concentration en fluorescéine dans l'eau. Ils sont utilisés pour suivre la réapparition du colorant pendant un traçage. Si le capteur est placé à la seule exsurgence du système, on peut, moyennant quelques hypothèses (principalement que la totalité du traceur a été restituée à l'émergence), l'utiliser pour jauger le débit de l'exsurgence.
- Les fluocapteurs sont complémentaires des fluorimètres, mais enregistrent seulement le passage du colorant et non l'évolution de sa concentration dans le temps. De ce fait, ils servent uniquement à contrôler si une émergence donnée est reliée ou non au réseau dans lequel a été injecté le traceur.

6.3 Les mesures concernant le biotope.

La mesure du biotope consiste principalement à compter les individus d'une espèce donnée. Cela permet le suivi des populations en retournant au même endroit chaque année. Diverses méthodes permettent ce comptage. Toutes nécessitent de revenir régulièrement si l'on souhaite établir une chronique.

La plus simple à mettre en œuvre est la chasse à vue. Selon l'objectif (capture ou simple recensement) on se munira de l'outil approprié (filet, petit pot, rempli ou non de solution de conservation, piège à aspiration, appareil photo, carnet de note...). Cette méthode permet d'échantillonner une population à un instant donné. Il est possible de poser des appâts pour attirer les animaux à un endroit précis.

On peut également poser des pièges. Les plus simples sont fabriqués à l'aide de canettes de bière emplies d'une solution odorante (pour attirer et conservatrice, si le piège doit rester en place longtemps) et placées (voir dissimulées, pour ne pas être dérangées par des trogloxènes indésirables (spéléos ou petits mammifères)) stratégiquement dans la cavité. Une variante consiste à remplacer la bouteille de bière en verre par une bouteille de soda en P.E.T. Il faut évidemment penser à venir relever ces pièges régulièrement.

On peut enfin mettre en place des moyens de comptage électronique (bat box , compteur de passage, voire sondes thermométriques, comme les IButton, qui sont suffisamment sensibles pour enregistrer l'augmentation de température due à la présence d'animaux homéothermes à leur voisinage). L'inconvénient de ces systèmes étant qu'ils ne différencient pas les espèces et ne peuvent pas distinguer des animaux trop petits ou dont la température corporelle est identique à celle du milieu.

7 La grotte du Chat et la source dans le torrent du Riou.

La Grotte du chat est située sur la commune de Daluis (Alpes Maritimes), dans les gorges du Var. Elle s'ouvre sur la rive droite du Riou, un petit affluent du Var, à une altitude d'environ 940m et une centaine de mètres au dessus du lit du ruisseau (voir figure 27 pour la situation globale et 28 pour la position de la source et de la grotte).

Dans un premier temps, nous décrirons la cavité et son environnement et en dresserons un état des lieux, puis nous présenterons les travaux effectués et les résultats obtenus par les deux groupes de stagiaires.

7.1 Contexte géologique.

La carte géologique (figure 29) montre la nature des terrains environnants. Le lambeau de roche dans lequel se développe la grotte est limité au N-O par une faille.

Le Village de Daluis se trouve en bordure du dôme de Barrot, constitué de pélites rouges remontant à l'ère primaire. Lors de la transgression secondaire, ces pélites ont été recouvertes par des dépôts sédimentaires, qui enregistrent la totalité de la série stratigraphique jusqu'à la fin du crétacé. Lors de l'orogenèse alpine, le socle se soulevant, ces sédiments ont glissé et ont été et charriés et plissés, ce qui aboutit aujourd'hui à un mélange plutôt désordonné où se mêlent marnes, calcaires, gypses et argiles ([d'ANTONI-NOBECOURT 2007]).



Figure 27: Situation du village de Daluis et de la grotte du Chat. Le Var passe dans le coin inférieur droit de la carte. Les courbes de niveau sont équidistantes de 25 m.
Source : Géoportail.

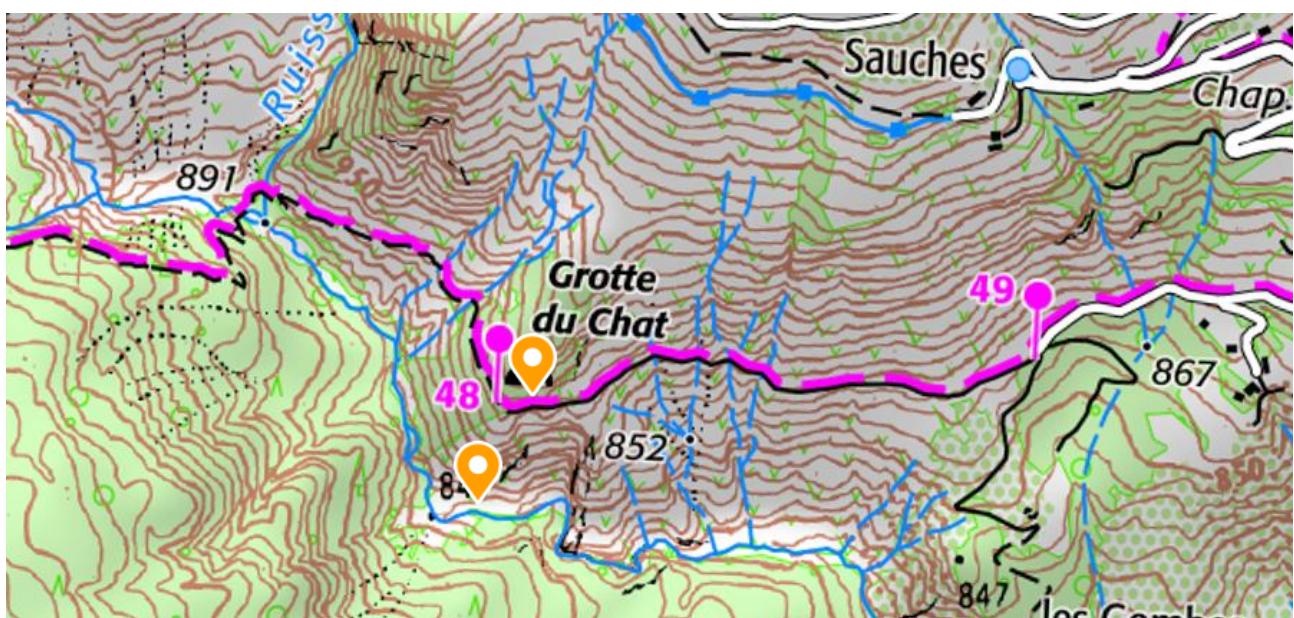


Figure 28: Localisations respectives de la grotte du Chat et de la source sulfureuse dans le vallon du Riou. La source se trouve à la sortie de la cluse formée par le ruisseau quand il rencontre la barre de calcaire dans laquelle se développe la grotte. La différence d'altitude entre les deux est de l'ordre de 100m.

Source : Géoportail

La barre de calcaire Crétacé dans lequel se développe la grotte est donc localement entourée de calcaire Barrémien. Plus au nord, on peut suivre l'affleurement de ce même calcaire Crétacé jusqu'à près de 14 km. Il y est toujours au

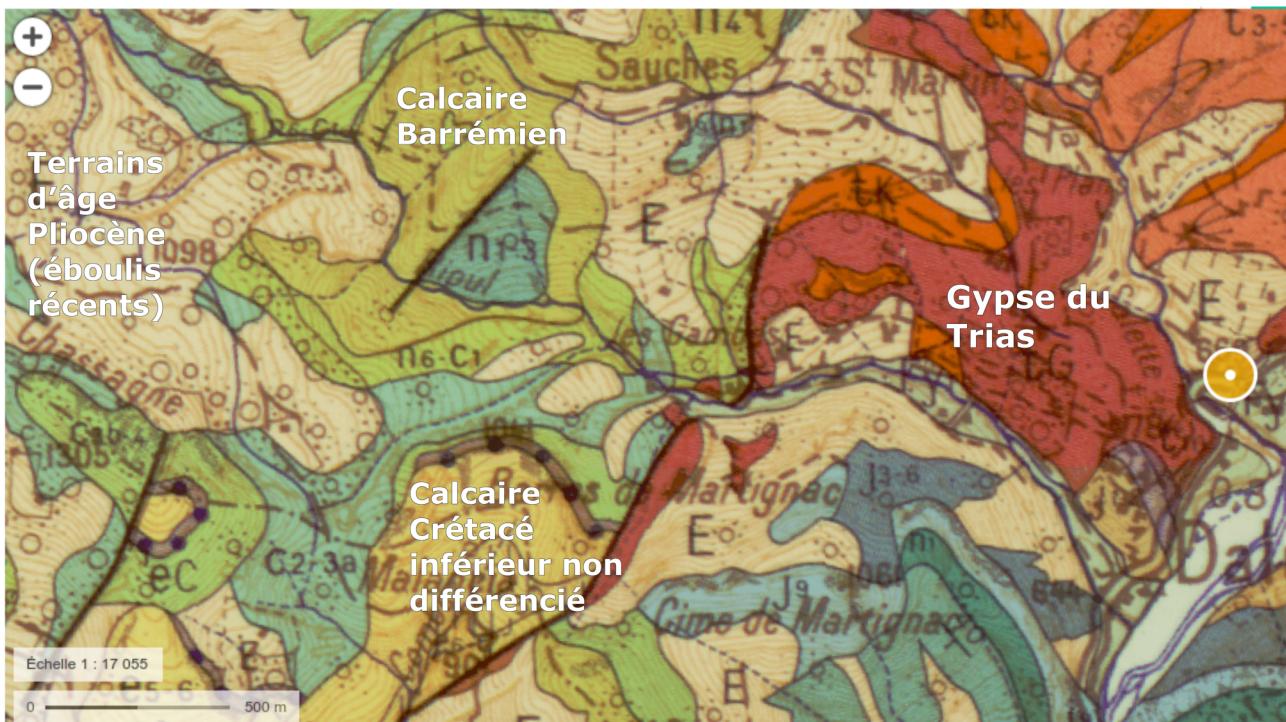


Figure 29: Carte géologique de la vallée du Riou. L'échelle est la même que celle de la carte IGN. La grotte s'ouvre le long de la faille qui sépare la couche de calcaire barrémien (n4) du lambeau de calcaire crétacé (n). Le miroir résultant est visible en quelques endroits dans la grotte elle-même.

Source : Géoportail.

contact avec un étage Barrémien et un étage Valanginien. La situation de ce lambeau de calcaire est donc assez particulière car il apparaît déconnecté de sa série, comme posé sur l'étage Barrémien, alors que dans le contexte géologique voisin, il apparaît posé sur du Valanginien et surmonté par du Barrémien. Cette situation particulière pourrait être liée localement au jeu vertical de la faille qui le limite au N-O. Cette faille pourrait avoir permis au lambeau de calcaire Crétacé de se déplacer vers le haut, puis l'érosion pourrait avoir décapé localement la couverture barrémienne et une partie du calcaire crétacé sous-jacent lors du creusement du lit du Riou, au fond duquel on remarque une petite cluse et un encaissement bien visibles dans le calcaire Crétacé. Il est probable qu'il s'étende bien plus profondément sous le lit du Riou.

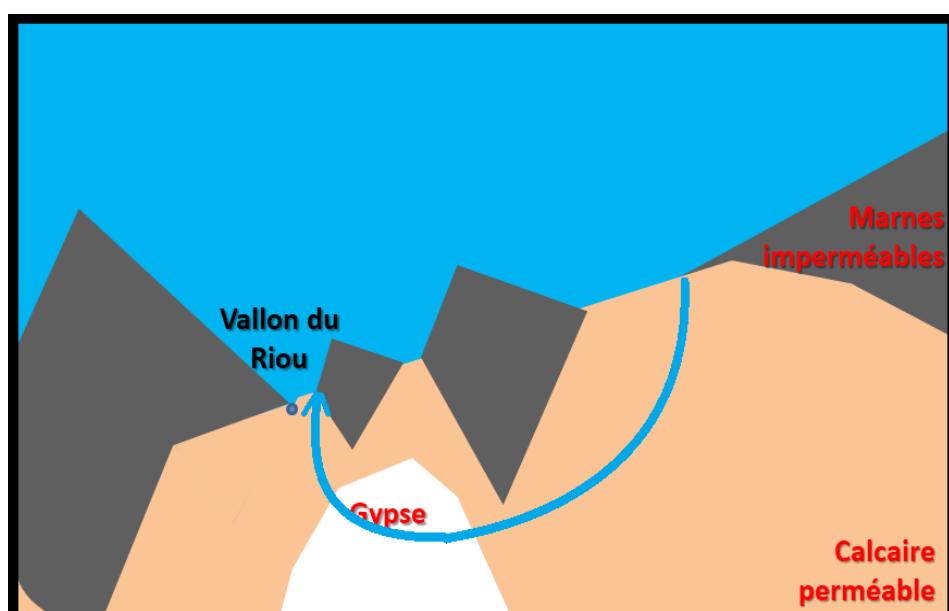


Figure 30: Coupe géologique simplifiée des alentours de la grotte du Chat. Courtoisie de J.C. Nobécourt

Plus à l'E, sous le village de Daluis, on trouve un diapir de gypse triasique.

J.C. Nobécourt a proposé ([NOBECOURT, 2019]) un modèle de fonctionnement hydrologique pour cet ensemble (figure 30). Les précipitations s'infiltrent dans le calcaire Crétacé, au N-O de la grotte. Elles descendent jusqu'à rencontrer les gypses triasiques qui se trouvent plus en profondeur, aux environs de l'altitude du lit du Var, ou peu peu plus bas (affleurement visible au niveau du premier virage en montant au village). En chemin, elles percolent vraisemblablement au travers de lignites, ce qui leur permet de se charger en matière carbonée (peut-être sous forme de méthane, CH_4). Elles dissolvent le gypse. On obtient donc des eaux chargées de gypse ($\text{Ca}^{2+} + \text{SO}_4^{2-}$) et de méthane (CH_4) et chaudes car circulant en profondeur. Ceci qui permet à des bactéries chimiolithotrophes de métaboliser le carbone en oxydant les sulfates, selon la réaction : $\text{CH}_4 + \text{SO}_4^{2-} \rightarrow \text{H}_2\text{S} + \text{CO}_3^{2-} + \text{H}_2\text{O}$ (les ions calcium Ca^{2+} sont strictement spectateurs de cette réaction.).

L'eau chargée de H_2S poursuit son chemin sous l'influence de la pression artésienne et trouve actuellement son exsurgence 200m plus haut, dans le vallon du Riou, à l'aplomb de la grotte du Chat.

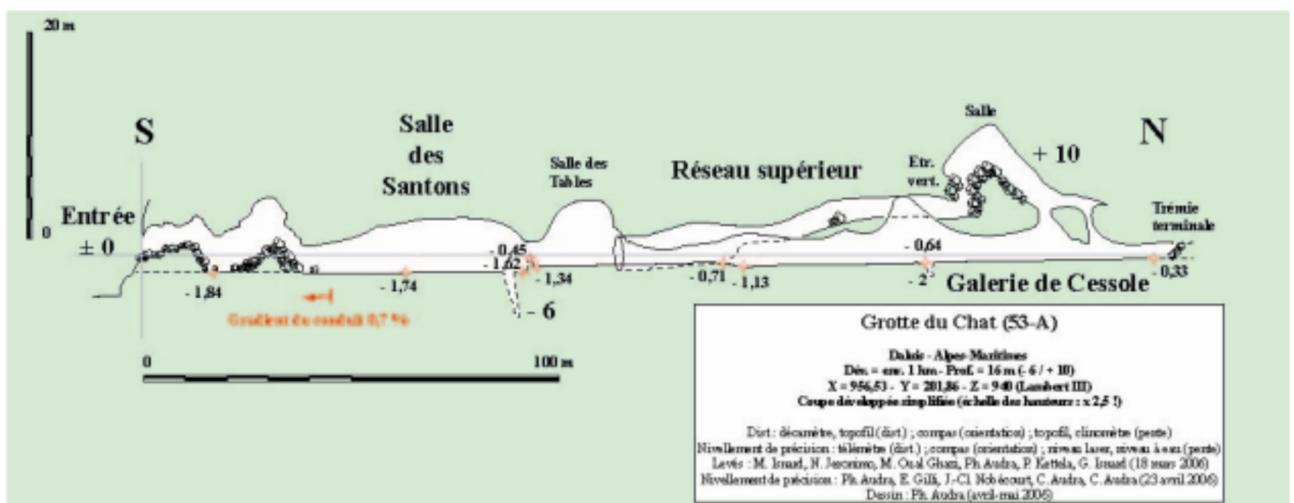


Figure 31: Coupe partielle de la grotte du chat, d'après les levés de 2006.

7.2 Description.

La grotte du chat est connue des temps immémoriaux. Elle se développe le long de diaclases et les galeries présentent globalement un sol remarquablement plan : en effet, la pente moyenne de la cavité est de l'ordre de 0,7 % ([MONITEUR, 2006]). Le mode de creusement de la cavité est clairement hypogène car on en retrouve toutes les caractéristiques à différents endroits. La topographie (figures 31 et 32) a été reprise en partie en 2006.

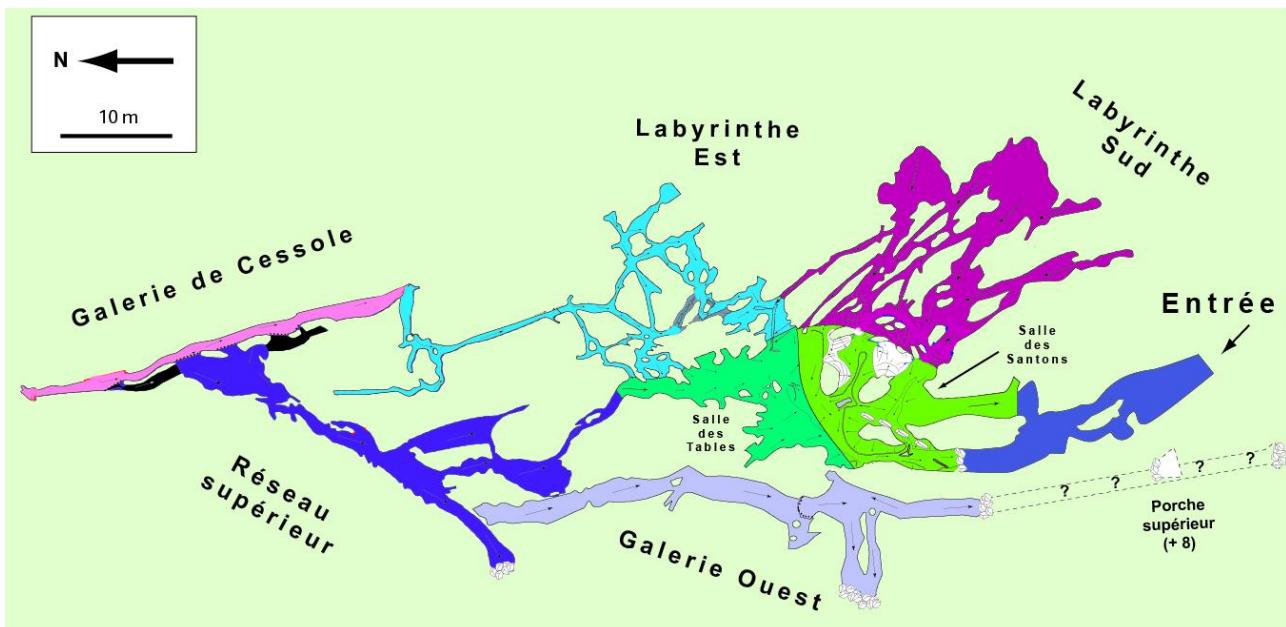
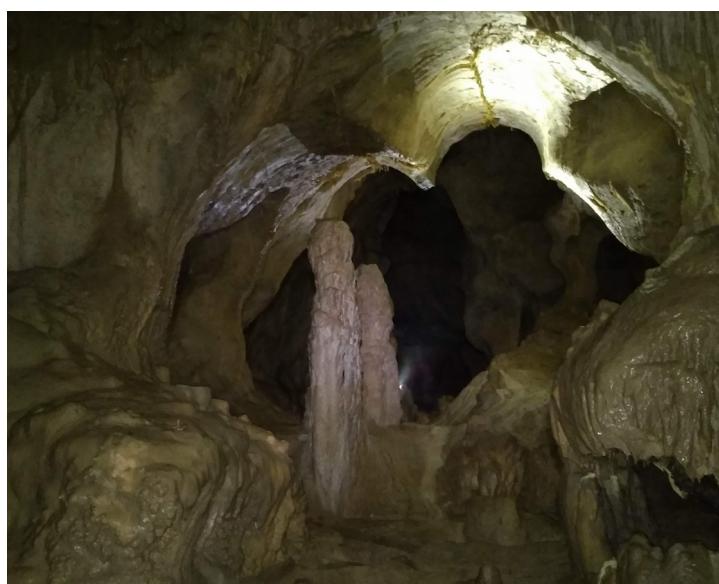


Figure 32: Plan de la grotte du chat, d'après les levés effectués en 2006.

Trois galeries partent de la salle d'entrée. La première est accessible par un soutirage remontant qui se trouve à 3m de l'entrée, le long de la paroi O. On débouche dans une petite salle qui se développe à la faveur d'une zone broyée, dont un diverticule revient au-dessus de la salle d'entrée. La seconde est dans le prolongement de l'entrée, se développe le long d'une diaclase et rejoint la galerie principale. La troisième est la suite évidente du cheminement. Il s'agit d'une galerie de dimensions confortables dans laquelle on prend pied par une petite descente. Au bout de quelques mètres, on aboutit dans une salle d'effondrement où débouche la seconde galerie. De là, un petit ressaut à droite, donne accès à la salle des Santons, où se trouvent alignées trois stalactites de belle taille (photo 3). La salle des santons est un ensemble complexe, au sol plan, parcouru par endroits d'une fissure. A main droite s'ouvre un ensemble de galeries interconnectées, baptisé « labyrinthe ouest ».



Photographie 3: Les santons. Photo L. Benoist



Photographie 4 : La Salle des Tables. On voit nettement qu'au moins deux niveaux de corrosion successifs se sont établis dans la grotte. Photo R. Guérin.

En face, on rejoint après avoir contourné les santons, une vaste salle (la salle des Tables, photo 4) où l'on peut admirer des tables de corrosion étagées, certaines ayant été excavées par en-dessous à la faveur d'une baisse du niveau de la nappe de l'ordre de quelques dizaines de cm. En partant vers la droite, plusieurs petites galeries constituent le labyrinthe sud. Certaines présentent des profils de creusement qui ressemblent à des banquettes d'érosion d'origine paragénétique, mais, étant au même niveau que les tables de corrosion de la salle des tables, ont plutôt été attribuées aux fluctuations du niveau de base de la nappe. Cet ensemble mène à la galerie de Cessole. De la salle des tables, si l'on continue tout droit, on accède à une galerie de dimensions modeste qui débouche dans un petite salle occupée par un dôme de calcite surmonté d'un gour (photo 5). Dans cette salle se fait également la jonction entre le réseau supérieur et la galerie Ouest.

La galerie supérieure est calée sur une zone très fracturée et son parcours nécessite de franchir quelques trémies. Elle débouche dans une salle située au-dessus et alignée parallèlement à la galerie de Cessole, qu'il est possible de rejoindre en plusieurs endroits par des étroitures verticales.



Photographie 5 : Salle de jonction, vue depuis le départ de la galerie supérieure. La galerie Ouest est accessible par un soupirail à gauche et derrière les personnages. La galerie qui vient de la salle des Tables se trouve en contrebas, à droite, derrière les personnages. Photo V. Malien.

La galerie de Cessole (photo 6) est alignée sur une fracture. Elle se termine sur un pincement. Elle a le profil caractéristique d'un creusement par corrosion sulfurique : sol plat et parcouru par une fissure, galerie plus large à la base qu'au sommet. Elle présente de nombreux dépôts de gypse saccharoïde et on y trouve également un exemple de lapiès de paroi.

La galerie Ouest est de dimensions plus modestes que le reste du réseau. On s'y déplace majoritairement en rampant plutôt qu'en marchant.

L'ensemble de la grotte développe près d'un kilomètre de galeries, alors que l'on ne s'éloigne jamais à plus de 200m à vol d'oiseau de l'entrée.

7.3 Etat des lieux.

Pour tenter de la protéger des dégradations dues aux nombreuses visites, la grotte du chat a fait l'objet d'une fermeture totale il y a 30 ans, décidée par la mairie de Daluis. Un mur muni d'une grille a été construit à ce moment là. En 2006, suite à une démarche entreprise par la Réserve Naturelle Régionale des gorges de Daluis auprès de la municipalité, un contrat Natura 2000 a été mis en place, avec pour objectifs :



Photographie 6 : La galerie de Cessole, avec son profil caractéristique dû au processus de corrosion sulfurique. On voit nettement la fissure émissive, le plancher plan de la galerie, qui s'est développé au niveau de la nappe, ainsi que la forme en coupole de la paroi supérieure. Le personnage se éclaire un dépôt de gypse saccharoïde qui n'a pas encore été lessivé par la condensation ni le ruissellement. Photo R. Guérin.

- La restauration de la naturalité du site et sa conservation pour les chauves souris et le *Spélerpès Speleomantes Strinati*, ce qui a motivé la fermeture du site pour une durée de 5 ans.
- Mener une réflexion autour du projet de réouverture, ce qui a nécessité la collecte d'un certain nombre de données sur le site pendant sa fermeture.

Dans le cadre de la mise en œuvre de ce contrat, et afin de continuer à assurer la protection du site, la mairie de Daluis a posé une clôture munie d'un portillon fermé en contrebas de l'entrée en 2012. La grille a été démontée en 2013, ainsi que qu'une partie du haut du mur, pour permettre aux chauves souris de revenir. Des panneaux explicatifs reprenant les résultats obtenus lors de l'étude menée sur le site pendant le stage d'équipier scientifique de 2006 ont été apposés sur la grille. Parallèlement, une étude sur le comportement de la grotte après sa réouverture a également été mise en place. Elle a consisté à installer des capteurs thermiques et hygrométriques qui devaient fonctionner pendant 2 ans. Un capteur était situé dans l'entrée, le second dans la salle des Tables. Au même moment, pour suivre l'évolution de la population de chauves-souris, un capteur à ultrasons et un compteur de passage ont été installés dans la salle d'entrée. La grotte devait officiellement rester non fréquentée par l'homme jusqu'en 2017.

En 2017, les données collectées ont permis la réalisation d'une étude de synthèse, qui comprenait donc trois axes :



- En ce qui concerne l'occupation du site par les chauves-souris, l'exploitation des données collectées a montré une fréquentation occasionnelle. La grotte sert principalement de gîte de transit au printemps et en automne, mais pas pour la reproduction. Plusieurs espèces sont toutefois recensées. Au niveau régional, l'importance de la grotte du Chat reste très modérée.
- En ce qui concerne les données climatiques, les capteurs ont eu quelques problèmes, toutefois, il semblerait que la réouverture de la grotte n'ait pas changé son fonctionnement thermique. La grotte apparaît trop froide pour la reproduction et trop chaude pour l'hibernation (à part l'entrée), ce qui expliquerait sa faible utilisation par les chiroptères.
- Enfin, l'étude a conclu que la fréquentation humaine avait baissé en intensité, mais que le nombre de jours de dérangement avait augmenté par rapport à la période où la grotte était protégée par le mur et la grille.

Cette étude a débouché sur un ensemble de préconisations, parmi lesquelles :

- La mise en place d'un accès raisonné :
 - Maintien de la fermeture et organisation de visites encadrées à caractère scientifique et patrimoniale par un BE spéléologie (cavité de classe 1)
 - L'inscription du site dans un projet de valorisation du patrimoine du village (exploration spéléo, randonnée géologique, visite patrimoniale du village...)
- Limiter les aménagements au sein de la cavité,
- Réactualiser la signalétique.

Le Projet 2019-2020 concernant la grotte du Chat envisagé par les partenaires comprend :

- Le lancement d'une étude de valorisation et de pré-aménagement
- Envisager les légers aménagements externes et internes nécessaires à la sécurisation et à l'accueil du public (cheminement, accès, confortation du périmètre...)
- Communication, valorisation et sensibilisation : création de panneaux, supports pédagogiques de présentation de la cavité, exposition...
- Formation des accompagnateurs et définition d'une charte d'engagement
- Organisation pratique et logistique des visites (calendrier, convention d'utilisation...)

7.4 Travaux entrepris pendant le stage et résultats obtenus.

Il est donc temps d'envisager la suite et de proposer des pistes pour permettre la réouverture de la grotte. C'est dans ce cadre qu'a lieu ce stage d'équiper environnemental à la grotte du Chat car la FFS doit participer à ce type de projets. Pour cela, les stagiaires se sont répartis dans deux groupes, en fonction des besoins identifiés dans le cadre du projet 2019-2020 pour la grotte du Chat. Un groupe a continué la documentation physique et topographique de la cavité et de son environnement et a proposé des pistes d'exploitation pédagogiques à destination des guides (enseignants de collèges ou professionnels de la spéléologie), l'autre a travaillé sur la documentation patrimoniale et biospéléologique de la cavité, pour en identifier les enjeux, afin de préconiser des balisages et des parcours et de visite.

7.4.1 Groupe Topographie-Instrumentation.

Ce groupe, encadré par Eric, Judi, et Stéphane comprenait Christian, Daniel, François, Laura, Laurent et Vincent. Les objectifs fixés à ce groupe étaient :

- de compléter la topographie existante en levant l'extérieur de la grotte (la falaise et deux entrées supérieures), la zone s'étendant de l'entrée à la salle des santons et la galerie Ouest.
- de poser des sondes de température et de pression en 4 endroits pour enregistrer les variations de température pendant quelques jours et éventuellement, les analyser pendant le stage,
- de faire un tour à la source sulfureuse du Riou pour effectuer des mesures de teneur en H_2S dans l'air et de conductimétrie, température et débit à la fois dans le Riou et la source.
- de proposer une fiche pédagogique à destination des enseignants de collège ou de lycée et des professionnels de la spéléo qui seraient amenés à encadrer des visites à thème scientifique sur le site. Cette fiche est proposée en annexe 10.7.
- D'autre part, la concentration en différents gaz a été également mesurée dans la salle des Tables, ainsi que la conductivité et la température de de l'eau dans divers gours, lors de la première séance de topographie.

7.4.1.1 Topographie

Il s'agissait de lever l'extérieur de la grotte pour placer précisément la falaise, et deux entrées voisines par rapport au reste de la cavité, ainsi que de compléter la topographie existante en relevant la zone d'entrée et la galerie Ouest, qui n'avaient pas été reprises en 2006. Deux groupes ont été constitués : l'un a levé la falaise et la galerie Ouest, l'autre les entrées supérieures et la zone d'entrée. Ce travail a nécessité deux sorties de terrain des quelques heures chacune pour effectuer des repérages et les levés et une journée de travail au bureau pour le report et le dessin à l'échelle 1/50.

7.4.1.2 Mesures de température dans la grotte.

Les capteurs (des sondes reefnet) ont été posés en 4 emplacements dans la cavité pendant 24 h :

- un à l'extérieur,
- un dans la salle d'entrée,
- un dans la salle des Tables,
- un à l'extrémité de la Galerie Ouest.

Finalement, deux seulement se sont révélés exploitables : celui de la salle d'entrée et celui de la salle des Tables.

On constate que la température dans la salle des tables est stable, aux alentours de 12,3°C (moyenne 12,26°C ; écart-type : 0,03°C). En revanche, dans la salle d'entrée, on voit l'influence de la température extérieure : la température de la salle d'entrée a diminué entre 16h et 08h du matin le jour suivant (elle n'a pas encore atteint la valeur de la température de la salle des tables à 8h), puis s'est mise à remonter. Le pic (16°C) est atteint entre 13h et 13h15, après quoi, la température se remet à descendre et commence à se stabiliser vers 21h30. Elle continue ensuite à diminuer légèrement pendant toute la période suivante, jusqu'à ce que le capteur soit récupéré. Il est dommage que nous ne puissions pas voir en parallèle la température à

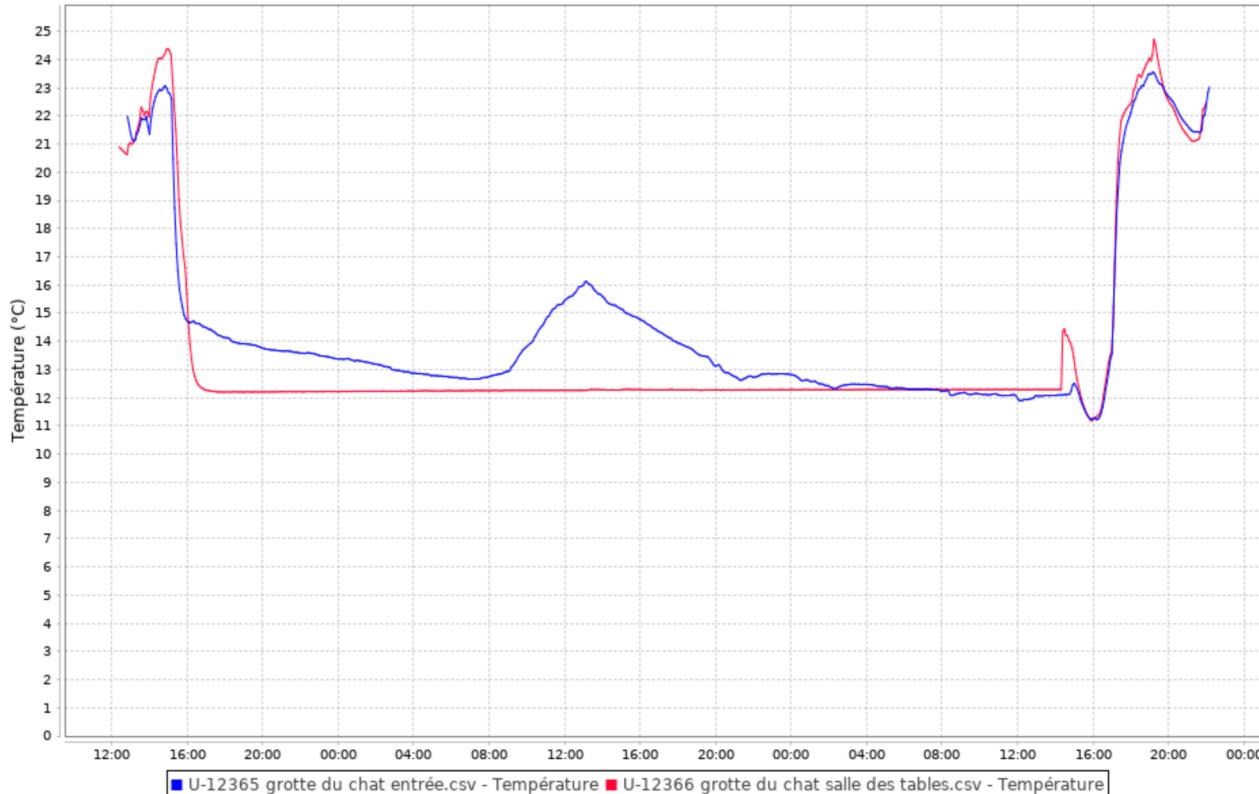


Figure 33: Températures enregistrées pendant 24 h dans la salle d'entrée (en bleu) et dans la salle des Tables (en magenta).

l'extérieur de la grotte. Cela permettrait d'évaluer le déphasage entre les variations de ces températures et le rôle de la masse rocheuse dans la régulation de l'atmosphère de la grotte. Toutefois, il paraît déjà évident que la température moyenne de la grotte « profonde » est stable et peu ou pas influencée par les variations journalières de la température extérieure. Une chronique sur une année ou plus permettrait d'étudier les variations saisonnières de cette température.

D'autre part, il serait également intéressant de tenter de mesurer les vitesses de déplacement de l'air induites par ces variations de température, dans les zones où l'influence extérieure se fait sentir, pour mieux appréhender les échanges entre l'air extérieur et l'air intérieur.

7.4.1.3 **Source sulfureuse.**

La source sulfureuse se trouve en rive gauche du lit du Riou (voir figure 28), dans la cluse formée par le ruisseau quand il rencontre et franchit la barre de calcaire dans laquelle se développe la grotte du Chat. Facilement repérable à l'odeur, elle se compose de trois au quatre griffons. Le jour où nous sommes allés sur place, les vasques de sortie de l'eau, ainsi que les chenaux dans lesquels elle circulait jusqu'à se mélanger avec l'eau du Riou étaient colonisés sur toute leur longueur par des filaments bactériens blancs, d'un demi centimètre de diamètre et d'environ 7-8 cm de long (photographies 7 et 8). Sur place, nous avons procédé à diverses mesures.

7.4.1.3.1 **Mesures de température et de conductivité.**

La conductivité et la température de l'eau ont été mesurées dans la vasque de sortie principale et dans le lit du Riou.



Photographie 7 : Détail des filaments bactériens qui colonisent les vasques de sortie de la source jusqu'à ce que l'eau souterraine se mélange avec l'eau du Riou proprement-dit.
Photo V. Malien.

	Conductivité ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Température ($^{\circ}\text{C}$)
Source	540	17,5
Riou	295	10

A titre de comparaison, de l'eau de pluie qui n'a pas séjourné plus de quelques heures dans un récipient présente une conductivité de quelques dizaines de $\mu\text{S}/\text{cm}$.

On remarque aisément la différence de température et de conductivité de ces deux eaux. Ce jour-là, il pleuvait depuis plusieurs heures et la température de l'air était voisine de 10-12 $^{\circ}\text{C}$ (non mesurée, les données de Météo France à la station de Nice font état des températures suivantes le 23 avril 2019 : minimale 12,7 ; maximale : 17,7 ; moyenne : 13,8, avec une heure d'ensoleillement dans l'après-midi, c'est à dire, après que nous ayons effectué ces mesures). La température de l'eau du Riou est donc assez proche de celle de l'air ainsi que de celle du sol sur lequel elle a ruisselé (moyenne du 01 au 22/04 à Nice : 11,04 $^{\circ}\text{C}$, température dans la grotte : 12,26 $^{\circ}\text{C}$).

La température de la source indique clairement son origine profonde : en effet, on considère que la température du sol augmente régulièrement avec la profondeur d'environ 1 $^{\circ}\text{C}$ tous les 33m. En prenant comme référence la température dans la grotte, on en déduit que l'eau a circulé environ 170m sous le lit du ruisseau, peut-être



Photographie 8: Les deux principaux griffons de la source. Deux autres existent quelques mètres en amont. Noter la différence entre l'eau qui provient de la source et celle qui provient du Riou (petit chenal dans le coin inférieur droit de la photo). Photo V. Malien,

un peu plus si on considère qu'elle a pu échanger de la chaleur avec la roche encaissante au cours de sa remontée vers l'exutoire et, par conséquent, refroidir un peu.

Par ailleurs, les données de conductivité indiquent également que les compositions de ces deux eaux sont différentes. En première approche, la conductivité d'une solution est proportionnelle à la charge électrique des espèces en solution et à leurs concentrations. Elle dépend également de la température de la solution. Ce dernier paramètre est toutefois compensé automatiquement par l'appareil, qui mesure de simultanément la conductivité et la température de la solution. Il en ressort que l'eau de la source était presque deux fois plus conductrice que celle du Riou ce 23 avril 2019. Pour aller plus loin dans l'analyse de ces résultats, on pourrait mener dans un premier temps une analyse qualitative de l'eau de la source, ce qui peut être fait sur le terrain, à l'aide de réactifs bien connus des enseignants de sciences physiques. Cela permettrait de déterminer la nature des ions présents en solution. On pourrait également prélever des échantillons à ramener au laboratoire pour mener des analyses plus qualitatives et tenter de déterminer les concentrations des différentes espèces présentes en solution.

7.4.1.3.2 Mesure de concentration en H_2S atmosphérique

Le détecteur de gaz, posé à 50cm de la vasque de sortie de l'eau indiquait une concentration en gaz H_2S dans l'air variant de 5 à 10 ppm. L'odeur était nettement perceptible.

7.4.1.3.3 Mesure de débit de la source.

Nous avons tenté de mesurer le débit de la source en mettant en œuvre une méthode un peu artisanale puis Jean-Claude Nobécourt nous a expliqué le principe du jaugeage.

Le principe de la première méthode d'estimation consistait, après avoir canalisé l'eau de la source dans une chenal de dimensions régulières, à jeter des brindilles dans le courant puis à chronométrer le temps qu'elles mettaient à parcourir une certaine distance. En multipliant la vitesse obtenue par la section du chenal, on obtient le débit de la source.

Le chenal réalisé mesurait un peu plus d'un mètre de long, avait une largeur de 40cm et l'eau y était profonde d'environ 5cm. Deux repères étaient placés au bord du chenal, distant d'1m l'un de l'autre. Les brindilles étaient lâchées quelques dizaines de cm en amont du premier repère. Le chronomètre était déclenché lors du passage au niveau du premier repère et arrêté quand la brindille arrivait au niveau du second.

4 relevés ont été effectués, dont nous avons tiré un temps de parcours moyen de 2,13s. Il vient donc une vitesse de 46,9cm/s. La section du chenal était de 200cm², ce qui nous donne un débit de 938000cm³/s, soit 9,38l/s. A noter que, de son œil acéré, Judi avait estimé le débit à 10l/s !

La seconde méthode demande un peu plus de temps, mais est également plus précise. Il s'agit d'un jaugeage de débit au sel et au conductimètre (voir annexe 10.6 pour une description plus précise du procédé).

A cet effet, Jean-Claude a préparé une solution 1,2Kg de sel dans 3l d'eau et l'a versée 5m en amont d'un bras du Riou. Nous avons filmé l'écran du conductimètre pour enregistrer l'évolution de la conductivité au passage du nuage de sel. Les valeurs de départ étaient aux environs de 295µS/cm. Elles ont rapidement atteint la saturation du capteur, à plus de 4000µS/cm, puis sont redescendues. Au bout de 16min, la conductivité était ramenée à 400µS/cm, puis à des valeurs inférieures.

L'exploitation de ces données nécessiterait dans un premier temps de visionner la vidéo pour retracer l'évolution de la conductivité dans le temps, puis de reconstituer, en la modélisant, l'évolution des valeurs de conductivité inaccessibles du fait de la saturation du capteur. La suite du protocole serait inchangée : il faudrait calculer l'intégrale de la courbe de conductivité par rapport au temps, la convertir en concentration et en déduire le débit. Nous n'avons pas effectué ce travail pendant le stage, d'autant que nous avons jaugé un bras du Riou (et pas toute la rivière) et que le sel n'était pas totalement dilué, ce qui nous a obligé à aller touiller l'endroit où la



Photographie 9: Mise en place et calibrage du chenal pour l'estimation du débit de la source.



solution a été versée et contrevient donc à l'hypothèse d'homogénéité de la concentration...

7.4.1.4 *Les autres mesures effectuées dans la grotte.*

Les teneurs en différents gaz ont été mesurées dans l'entrée et on montré les teneurs suivantes :

- O₂ : 20,8 %,
- CO₂: 0 %,
- H₂S : 0%,
- NO₂ : 0%.

Par ailleurs, nous avons également relevé la conductivité et la température de l'eau stagnant dans deux gours, avec les résultats suivants :

- salle des santons : 230 µS; 12°5C ;
- Intersection galerie ouest-réseau supérieur : 246 µS; 12°5C

On observe que les températures sont identiques et proches de celles mesurées dans la salle des tables avec la sonde reefnet (12,3°C). La différence provient de la sensibilité du thermomètre, qui est de $\pm 0,5^\circ\text{C}$, alors que la sonde affiche une précision de $0,01^\circ\text{C}$. Compte tenu de ces paramètres, on ne peut pas dire que les deux mesures soient différentes.

Les conductivités, elles, sont un peu inférieures à celle enregistrées quelques jours plus tard dans le torrent du Riou, au cours de fortes pluies (295µS/cm). Cela pourrait indiquer que l'eau a transité au travers d'un sol assez pauvre et peu épais. Ce qui est cohérent avec la couverture végétale dans les environs de la grotte, qui se résume à des éboulis, quelques buis, des genets et des pins à crochets, laissant le plus souvent la roche-mère à nu. Dans ces conditions, les eaux d'infiltration ont peu l'occasion de se charger en CO₂, s'infiltrent dans l'épikarst en ayant un caractère peu corrosif et en ressortent peu chargées en minéraux. De manière alternative, on peut aussi proposer que l'eau présente dans les gours y est depuis longtemps et qu'elle a déjà déposé tous ses minéraux en dégazant son CO₂ dans l'atmosphère de la grotte.

7.4.2 Groupe Biospéléologie-Balisage.

Le groupe, encadré par Marie-Clélia et Jean-Claude, se composait de Béatrice, Célina, Jean-Pierre, Renaud, Virginie et Xavier. Ses objectifs étaient :

- recenser les spéléothèmes, les morphologies, les dégradations : établir un état des lieux « géographique » de la cavité,
- recenser la faune, afin de faire un état des lieux biospéléologique
- en dégager des enjeux de protection et les reporter sur des cartes.
- proposer sur cette base :
 - un balisage
 - des recommandations à l'usage des visiteurs.

A et effet, la cavité a été découpée en 8 zones sur des critères topographiques et morphologiques : l'extérieur de la cavité (zone 0), la zone d'entrée (zone 1), la Salle des Santons (zone 2), le labyrinthe Sud (zone 3), la Salle des Tables (zone 4), le labyrinthe Est (zone 5), la Galerie de Cessole (zone 6), le Réseau supérieur (zone 7) et la Galerie Ouest (zone 8). Chacune de ces zones a été passée au crible afin de recenser ce qu'elle contenait. Les observations ont été consignées sur des fiches standardisées. Les résultats obtenus sont présentés dans la partie pour la description physique de la cavité et dans la partie pour l'aspect biospéléologique.

7.4.2.1 Description physique

7.4.2.1.1 Extérieur de la cavité – Zone 0

- Porche d'entrée et fermeture/réouverture de la cavité

Dans les années 90', l'accès à la grotte a été interdit par la construction d'un mur et la pose d'une porte pour fermer le porche avec un arrêté municipal d'interdiction, à priori suite à une surfréquentation incontrôlée.

En juillet 2013, le porche a été réouvert (destruction du mur et de la porte) mais la grotte est restée fermée par une enceinte grillagée en contre bas de l'entrée afin de laisser l'accès aux chiroptères. Une étude post-restauration des conditions naturelles de la grotte a été menée de 2012 à 2017 (2012-2013 étude avant ouverture / 2013-2017 : étude après ouverture). Divers capteurs ont été mis en place : capteurs T°C, hygrométrie, enregistreurs ultrasons pour comptage de chauves-souris, capteurs infra rouges pour comptage des visites.

Même si ces mesures n'ont pas mis en évidence une augmentation de la fréquentation des chiroptères, il est évident que cela a permis d'en maîtriser la visite.





Depuis cette étude, sous l'impulsion du CDS06, la municipalité de Daluis a souhaité pérenniser, tout en la maîtrisant, la visite de cette cavité en l'inscrivant au PDESI (Plan Départemental des espaces et Sites Itinéraires.)

7.4.2.1.2 Zone d'entrée – Zone 1

- **Z1.1** Gravure/graffiti

Une gravure est présente sur un bloc peu après l'entrée, il s'agit probablement d'un marquage de la cavité. Dans le reste de la zone 1 et de la cavité, on note la présence de nombreux marquages, écritures, gravures, graffitis... dont certains peuvent présenter un intérêt historique : signatures datées avec nom. Par exemple, au niveau du ressaut, au crayon gris : « 1928-1930 Abbé Franchia (colon) », trace probable d'un Abbé qui a accompagné une colonie de vacances dans la cavité.

- **Z1.2** Galerie d'effondrement.

Le début de la progression se fait dans une galerie d'effondrement.

- **Z1.3** Spéléothèmes cassés

De nombreuses stalagmites ont été sciées et/ou cassées puis enlevées pour de la décoration de jardins par exemple... (très à la mode au début du XXème siècle).

7.4.2.1.3 Salle des Santons – Zone 2

- **Z2.1** Stylolithes

Forme plus ou moins sinusoïdale de contact entre strates dû à un phénomène de compaction des sédiments (avant diagénèse) qui s'est produit lors de l'empilement des couches. Visible sur les parois plutôt près des plafonds.

- **Z2.2** Silex

Un banc de silex de couleur blanc/brun est visible sur une paroi. Les silex se forment par migration de la silice pour former des veines ou des nodules,, le matériau en question provenant de la décomposition de l'exosquelette siliceux d'éponges ou d'autres animaux marins.

- **Z2.3** Gypse

Le gypse (Sulfate de calcium hydraté) s'est formé suite à la corrosion du calcaire par l'acide sulfurique :

carbonate de calcium + acide sulfurique => eau + gaz carbonique + sulfate de calcium (gypse)

Présence importante de dépôts de gypse sous forme saccharoïde et de croûtes.

- **Z2.4** Spéléothèmes : les santons

De nombreuses concrétions de calcite ornent la salle des santons : stalactites, stalagmites (santons), gours, draperies, plancher stalagmitique... (formations postérieures au creusement hypogène de la cavité).

- **Z2.5 Graffitis « d'époque »**

Sur une paroi juste avant le passage des santons : présence de graffitis datés 1924 (crayon gris) et 1914 (au charbon)



7.4.2.1.4 Labyrinthe Sud – Zone 3

Cette zone ne recèle pas de point d'intérêt particulier.

7.4.2.1.5 Salle des tables – Zone 4

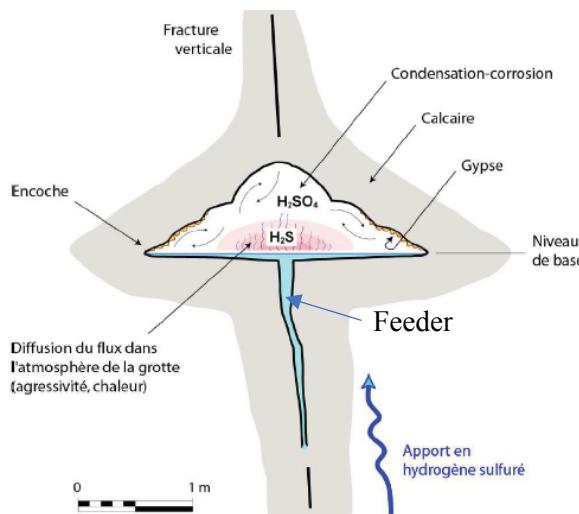


Fig. 4 : Spéléogénèse des conduits affectés par le dégazage de l'hydrogène sulfuré (H_2S) dans l'atmosphère de la grotte d'Acqua Fitusa (Sicile, Italie).

- **Z4.2 Tables de corrosion**

Ce sont des formes de corrosion caractéristiques importantes, directement liées aux variations du niveau de la nappe d'eau dans la galerie. La corrosion se produit principalement à l'interface air/eau, là où l'hydrogène sulfuré H_2S trouve de l'oxygène atmosphérique disponible pour l'oxyder en acide sulfurique H_2SO_4 . La corrosion est donc concentrée au niveau de la surface de la nappe donnant un profil de galeries horizontales très larges dans les parties basses, marquant le niveau de la nappe hydrothermale. C'est ce

- **Z4.1 Fissure émissive (feeder).**

Définition de la fissure émissive :

Fissure présente au niveau du plancher de la galerie. Il s'agit d'un ancien conduit émissif d' H_2S remontant des profondeurs.



phénomène qui a taillé dans l'encaissant, autour d'un conduit émissif (feeder), une galerie au plancher strictement horizontal et plan. Ces planchers ont été repris secondairement par des écoulements corrosifs (descente du niveau de la nappe hydrothermale) qui les ont, par endroit entaillés de rigoles et de chenaux et à d'autre, ont même corrodé le niveau précédent par en dessous, formant dans ce cas de très caractéristiques « tables de corrosion » étagées, en roche massive.



- **Z4.3 Pyrite**

Bisulfure de fer FeS₂, présent sur de nombreuses parois sous forme de taches oxydées couleur ocre/rouille.

- **Z4.4 Déchets**

Le fond du Feeder présente un amas de boîtes de conserves, bouteilles en verre et autres déchets. L'origine de ces déchets remonte à la période de surfréquentation de la cavité avant sa fermeture.

7.4.2.1.6 Labyrinthe Est – Zone 5

- **Z5.1 Choux-fleurs.**

Sur les parois en partie basse (< 1 m en moyenne) nous pouvons observer des concrétions en choux-fleurs (ou pop-corn). Il est admis que ces spéléothèmes 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. Ces aérosols sont créés par des circulations turbulentes d'eau ou d'air dues aux différences de température entre les différentes zones de la grotte.

- **Z5.2 Chenal de surcreusement.**

On note en partie basse d'une portion de la galerie une forme de surcreusement vigoureux mimant un banal profil para-génétique à banquettes. Toutefois cette forme ne peut pas être due à un creusement habituel par écoulement gravitaire car le gradient de l'ensemble de la cavité est quasiment nul (0,7%,

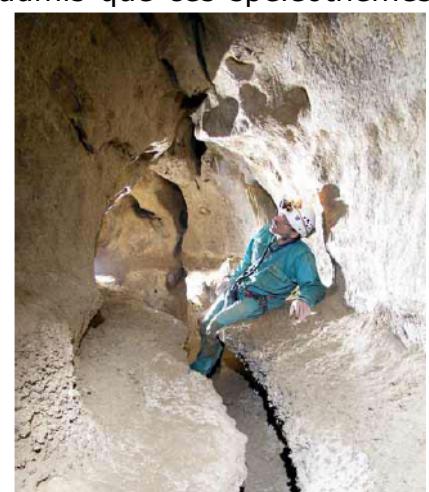


Fig. 5 : profil caractéristique de galerie dans le Labyrinthe
(Photo J-Y Bigot 2005)

[MONITEUR, 2006]). On peut donc l'imputer à des écoulements particulièrement corrosifs (acide sulfurique).

7.4.2.1.7 Galerie de Cessole – Zone 6

- **Z6.1** Fissure émissive (voir **Z4.1**)

- **Z6.2** Micro-Lapiaz de paroi.

Forme discrète en bas d'une paroi avec des 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. Il s'agit peut-être du seul exemple de lapiaz sulfurique connu en France à ce jour. ([MONITEUR, 2006])



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



- **Z6.3** Poches de substitution

Formes de poches hémisphériques d'empiècement de la paroi (diamètre jusqu'à 200 mm environ). Ces poches se forment suite à la corrosion sulfurique des parois par condensation corrosion, un cristal de gypse s'est formé. (voir Z2.3 formation du gypse). Ce gypse qui est hydrophile吸水性) absorbe de l'acide sulfurique et joue le rôle de point de corrosion concentrée et localisée créant des poches qui se remplissent à leur tour de gypse (substitution du calcaire par du gypse). Enfin le gypse est évacué postérieurement par dissolution dans de l'eau.





- **Z6.4 Excentriques**

(aragonite ou calcite). Spéléothème se formant par cristallisation d'une goutte d'eau soumise à en ensemble de forces combinées : gravité, tension superficielle, force de cristallisation, pression hydrostatique... toutes les forces possibles. Ceci entraîne une formation dans toutes les directions.

- **Z6.5 Indice de tectonique.**

Un indice géologique intéressant est à voir au plafond de la galerie. C'est un évènement néotectonique : la galerie est axée sur une diaclase dont les deux compartiments portent des formes d'érosion décalées sub-horizontalement de quelques centimètres. Ceci indique un rejet néotectonique postérieur au creusement : en effet, un banc de silex 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 diaclase évidente), implique une phase tectonique primitive antérieure au creusement de la cavité.



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

7.4.2.1.8 Réseau supérieur – Zone 7

- **Z7.1 Baguettes de gours (Poolfingers).**

Filaments bactériens recouverts de calcite. Leur hauteur des est comprise entre 40 et 50 mm.



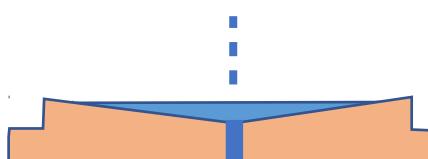
- **Z7.2 Gours calcités.**

Concrétion carbonatée en forme de barrage en travers d'un écoulement souterrain. L'intérieur de certains gours est tapissé de formations de cristaux de calcite.



7.4.2.1.9 Galerie Ouest – Zone 8

- **Z8.1 Ilot-Coupelle.** Concrétion non connue découverte en début de zone 8, présentant les caractéristiques suivantes :
 - forme circulaire presque parfaite,
 - surface concave,
 - un ou plusieurs trous près du centre (profondeur 10 à 20 mm),
 - chanfrein périphérique bien visible sur le plus gros spécimen,
 - environ 15 spécimens sur la zone (de 100 à 300 mm de diamètre et 10 à 100 mm de haut),
 - surface granuleuse,
 - hauteur sous plafond 0.5 et 1m maximum,
 - sous une stillation (goutte à goutte) avec débit très faible (< 1 goutte par 15 min).
 - Hypothèses de formation : Mélange entre îlot/coupelle de gour





7.4.2.2 Biospélologie

ZONE	Chiro SP	Petit Murin SP	Petit Rhino- lophe	Diptère	Tique	Lépido- ptère	Collembole	Isopo de	Scuti- gère véloce
1	1			2					
2	1						1		
3	3			1	1	1	1	1	
4	1								
5	1	1							
6	1								
7	1		1	1			1	1	1
8									



ZONE	Spélerp è s europa eus	Araig née SP	Arai- gnée type méta	Petite araigné e dépig- mentée < 1 mm	Dolich opode	Bacté rie	petit mam- mifère	Collem bole	Iule
1	1		1		1	1		1	1
2		1					2		
3									
4				1			1		1
5				1			1		
6									
7						1	1		
8			1						

7.4.2.3 Enjeux de protection

Les enjeux de protection ont été estimés en remplissant les fiches de report. Chaque item dans une zone donnée était assorti d'un des indicateurs de densité suivants :

- Rare de 1 à 10 occurrences ou individus,
- Commun : de 10 à 50 occurrences ou individus,
- Abondant : de 50 à 100 occurrences ou individus,
- Très abondant : + de 100 occurrences ou individus

Ces données ont ensuite été saisies sous informatique puis traitées sous Qgis (un Système d'Information Géographique libre et open-source) et ont permis d'établir des cartes indiquant pour chaque type de risque les niveaux d'enjeu liés à chaque zone.

Les enjeux de protection identifiés sont au nombre de 6 :

- Anthropisation,
- Archéologie,
- Biospéléologie,
- Hydrologie,
- Spléléogènes,
- Spéléothèmes.

Le cartes sont insérées dans la partie 10.3 des annexes, pp 80 à 85. Elles ont permis d'élaborer les recommandations de visite et les propositions de balisage présentées dans la section suivante.

8 Conclusions, préconisations.

Les travaux réalisés pendant ce stage d'équipier environnemental ont permis d'élaborer quelques préconisations pour la gestion future de la grotte.

Les mesures de démolition du muret et de dépose de la porte devaient initialement permettre la re-colonisation du site par les chiroptères. Au terme de 5 années d'observation, il apparaît que le site de la grotte du Chat ne présente pas un



enjeu majeur au regard de la protection de ces espèces car il n'est que très peu utilisé, que ce soit comme gîte de transit, de reproduction ou d'hibernation. Il paraît donc possible de mettre en place un accès raisonnable à la grotte, tant pour les spéléologues que pour le public, moyennant quelques précautions à respecter pour limiter le dérangement des éventuels chiroptères présents.

Les enjeux majeurs du site résident plus dans le domaine patrimonial. Le site pourrait donc faire l'objet d'une mise en valeur. A cet effet, nous proposons la mise en place d'un balisage et quelques itinéraires de visites possibles, qui pourraient être accompagnés d'une description de quelques stations intéressantes.

Le site est globalement en assez bon état de conservation. Quelques espèces protégées l'utilisent actuellement, notamment la zone d'entrée. Leur protection est à prendre en compte. Pour cela, on pourrait envisager un conventionnement entre le CDS06 et la mairie de Daluis pour pérenniser l'accès au site, moyennant quelques précautions :

8.1 Un accès raisonnable et conventionné.

- Pratique de la spéléologie prenant en compte l'hibernation des chiroptères

La fréquentation du site pour la pratique de la spéléologie n'est pas incompatible avec les populations de chiroptères, cependant l'évitement apparaît comme une mesure essentielle à mettre en place pour pérenniser ce site d'hivernage.

Concernant la grotte du Chat, quelques individus sont régulièrement observés en hibernation dans la salle d'entrée. Il pourrait être recommandé en cas de réouverture du site :

- d'éviter la période hivernale sensible pour la pratique de la spéléologie par les spéléologues fédérés avec mise en place d'une communication au sein du réseau spéléologique.
- de mettre en place une information auprès des spéléologues pratiquants quant à la conduite à tenir en présence des chauves-souris : éviter de les éclairer, éviter de stationner dans la salle d'entrée et de faire du bruit et de parler sur cette portion de cavité.

- Limiter les aménagements en cas de valorisation touristique de la cavité.

- Proscrire toute installation d'un système d'éclairage fixe à l'intérieur de la grotte : la lumière est un facteur de dérangement pour la faune souterraine lucifuge. Aucun éclairage fixe ne devra être installé dans la cavité.
- Proscrire tout aménagement en dur
- Prescrire le nettoyage au karcher des concrétions : Les parois et les coulées de calcite, notamment dans la salle des Santons et la salle des tables sont fréquemment souillées par de l'argile. Attention, toutefois : en cas d'opération de nettoyage des parois (traces acétylène, graffiti récent jugés sans importance...) une attention particulière sera apportée à la protection des gravures et graffiti du début du XXème siècle.
- Afin de préserver le caractère naturel des espaces, seuls les aménagements essentiels seront étudiés.

- Maintien d'un accès raisonné à la grotte du Chat

- Le maintien de la fermeture du site ne se justifie pas du point de vue de l'enjeu biologique de la cavité. A l'heure actuelle, la mairie envisage de maintenir la fermeture du site. Il faudra mettre en place un ensemble de mesures pour permettre son accès, notamment la gestion de la clef.

8.2 Une valorisation scientifique du site de la grotte du chat.

D'après les normes définies par la FFS, la grotte du Chat est une cavité de classe 1 (ne nécessitant d'autre équipement qu'un casque muni d'un éclairage). Toutefois, la spéléologie faisant des activités se pratiquant en environnement spécifique, à l'heure actuelle, seuls des professionnels de la spéléologie (titulaires d'un DE, BE option spéléologie, ou BAPAAT) peuvent encadrer contre rémunération dans cette cavité. Nous nous proposons de mettre à la disposition des professionnels qui seraient amenés à intervenir dans cette grotte des outils d'aide à la description de la cavité.

- Proposition de circuits dans la grotte (figure 34).
 - Un circuit de découverte.
 - un circuit plus sportif.

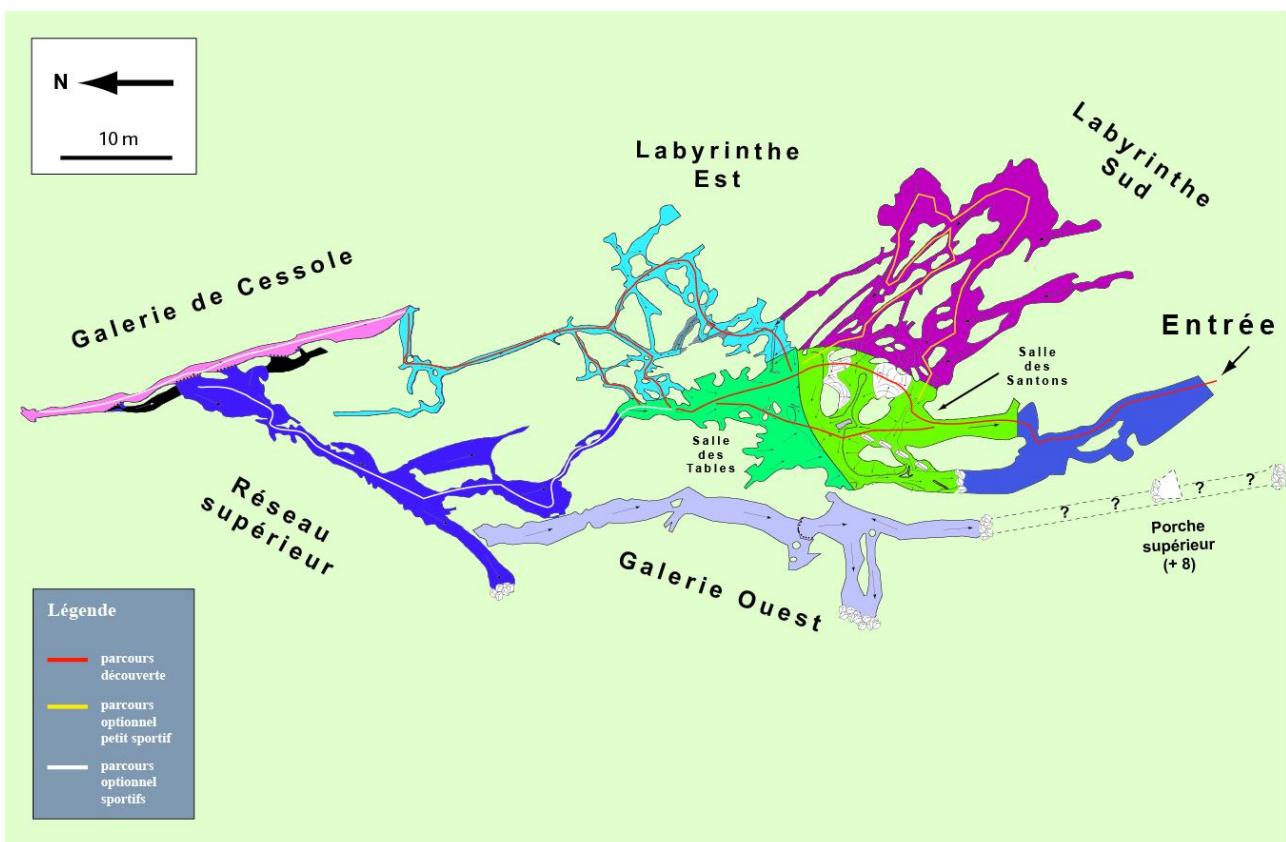


Figure 34: différents circuits imaginables dans la cavité, en fonction de l'objectif de la sortie.

- Mise en place d'un balisage d'orientation

La zone du labyrinthe est riche en graffitis visant à permettre à un visiteur de se repérer. L'accumulation ayant tendance à créer de la confusion, il pourrait

être envisagé de mettre en place des catadioptres en quelques endroits stratégiques, tout en veillant à ne pas surcharger encore plus les lieux.

- Mise en place d'un balisage de protection pour canaliser les flux (figure 35)

L'objectif de ce dispositif serait de matérialiser un itinéraire, de manière à concentrer le passage près des endroits sensibles. Les différents sites envisagés sont :

- la Salle des santons,
- Labyrinthe Est (Zone 5) : Chenal de surcreusement.
- Galerie de Cessole (Zone 6) : protection du plancher avec gours sur les 20 premiers mètres et protection du gypse paroi de droite au fond sur 5m environ.
- Réseau supérieur (Zone 7) : balisage de protection de gours et concrétions diverses (poolfingers...) à baliser.

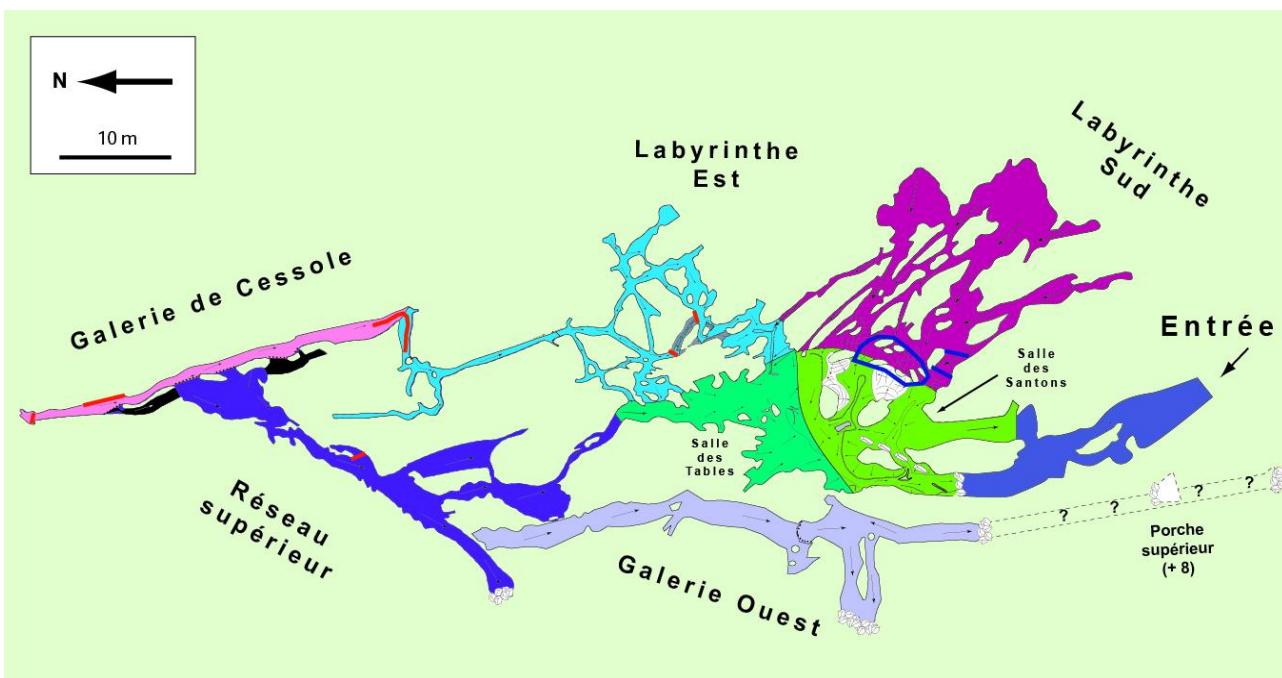


Figure 35: Les différentes zones de balisages envisagées. En bleu : le balisage de la salle des Santons, mis en place le 24/04. En rouge, ceux qu'il faudra mettre en place à terme, en cas de réouverture.

Le balisage de la salle des santons a été réalisé le 24/04/19 et a donné lieu à la réalisation d'un « tuto-balisage » présenté en annexe 10.4 .

- mise en place d'un descriptif de quelques stations remarquables dans la grotte.

Le travail de description de la cavité a mis en évidence l'existence d'un certain nombre de stations d'observation particulièrement intéressantes dans la grotte . La figure 36 indique l'emplacement de chacune des stations (voir 7.4.2.1 pour une description précise de chacune).

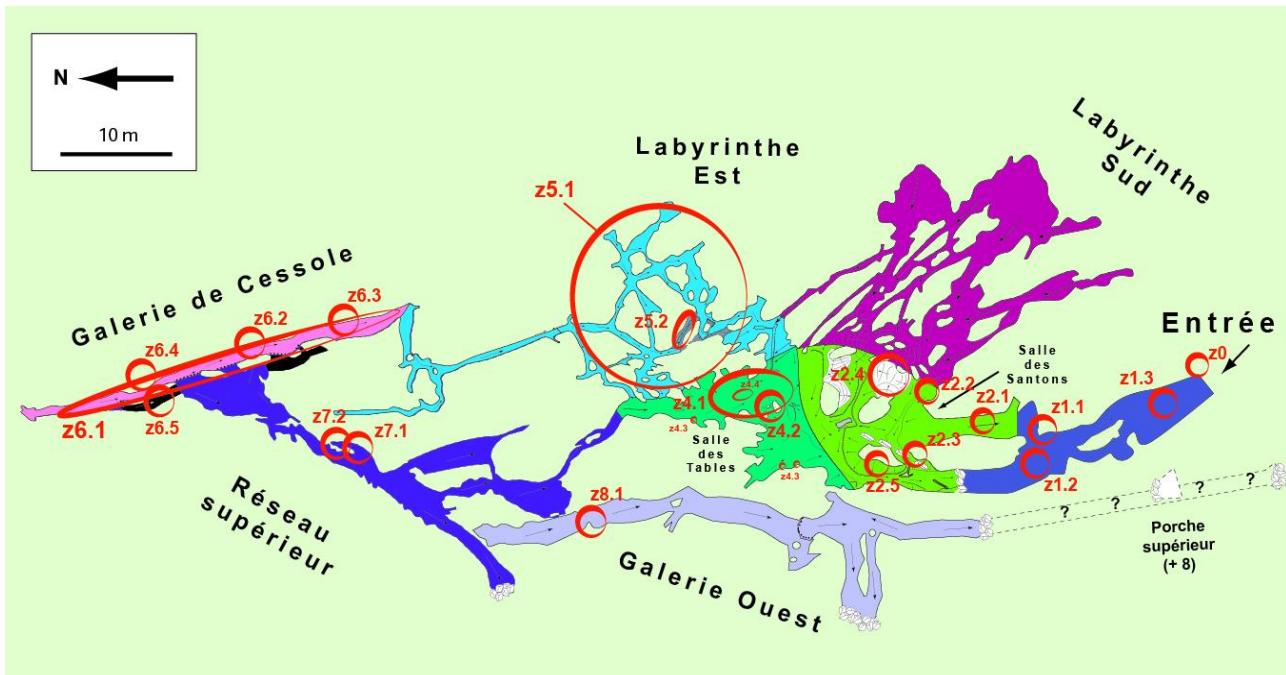


Figure 36: Les différentes stations d'observation dans la cavité. Les codes font référence à la description donnée au paragraphe 7.4.2.1.

- Proposition de fiche pédagogique

A destination des enseignants de cycle 4 (fin de collège), de lycée général, technique ou professionnel qui souhaiteraient visiter le site, une fiche concernant la source sulfureuse dans le lit du Riou a été élaborée, qui se trouve en annexe 10.7.

Cette fiche a été pensée afin de permettre un travail transversal et pourrait être exploitée dans le cadre d'un parcours d'Enseignement Pratique Interdisciplinaire mêlant le français, les sciences physiques et chimiques, les sciences de la vie et de la Terre, l'éducation physique et sportive, mais également de manière autonome.

8.3 Un suivi de l'évolution physique de la grotte.

A l'issue du stage, le groupe topographie-instrumentation recommande principalement deux mesures :

- Poursuivre la documentation topographique de la cavité : En effet, on ne dispose pas encore d'un outil complet. La topographie disponible au début du stage a été réalisée à partir des levés partiels réalisés en 2006 sur le squelette desquels le dessin de la topographie de Rousseau (date inconnue) a été morphé sous Therion [MONITEUR, 2006]. Le travail de topographie réalisé en 2019 lors de ce stage devra y être raccordé, de manière à obtenir un outil plus complet.
 - Poursuivre l'étude climatique. A ce titre, nous préconisons de réaliser :
 - des mesures aérologiques (débits d'air) à différentes saisons et sous différentes conditions climatiques pour mieux comprendre le fonctionnement de la cavité ;



- des mesures de température en vue de constituer des chroniques annuelles, ce qui permettra également de favoriser la compréhension du site et de son fonctionnement;
- des outils pédagogiques complémentaires de ceux évoqués plus haut, afin de proposer des activités pédagogiques dans la grotte elle-même.

9 Bibliographie

DOUCET, 2017: DOUCET, D. , FERSING, G., La grotte de la Fuie (Charente),Spelunca, 2017

K. M. B., 2011: Karst Marx Brother, Le karst, paradis du spéléo, fortune du plombier, cauchemar de la ménagère... : La karstologie expliquée par un nul.,Spelunca, 2011

K. M. B., 2014: Karst Marx Brother, Est-ce que les karstologues comprennent tout dans le karst ? : La karstologie expliquée par un nul.,Spelunca, 2014

K. M. B., 2017-1: Karst Marx Brother, Attention, un karst peut en cacher un autre... : La karstologie expliquée par un nul.,Spelunca, 2017

K. M. B., 2017-2: Karst Marx Brother, Le karst : y'a de l'eau dans le gaz ! : La karstologie expliquée par un nul.,Spelunca, 2017

K. M. B., 2018-1: Karst Marx Brother, Fantôkarst contre Wallon yard : Ou « L'inspecteur Karst contre la spéléogenèse aux mille visages »,Spelunca, 2018

K. M. B., 2018-2: Karst Marx Brother, Le karst, plus tu y cherches des réponses et plus tu y trouves des questions... : La karstologie expliquée par un nul.,Spelunca, 2018

PROPHETE, 1998: P. PROPHETE, Topographie Souterraine, Dossier Instruction, 1998

GHOMMIDH: C. GHOMMIDH, La taupographie pour les nuls,

FRANCFORT, 2014: S. FRANCFORT, De l'utilité d'un conductimètre en campagne d'exploration.,Spelunca, 2014

LISMONDE, 1991: B. LISMONDE, Le Trou qui souffle, 1991

MAGNE, 2017: L. MAGNE, N. LECOQ, J. RODET, S. CHEDEVILLE, C. FOURNIAL et J.-P. VIARD, Les inversions des circulations d'air dans une grotte de la craie à une entrée. Exemple de la grotte des Petites Dales (Normandie, France),Karstologia, 2017

LISMONDE, 2002-1: B. LISMONDE, Climatologie du monde souterrain, tome 1, Vents des ténèbres, 2002

d'ANTONI-NOBECOURT 2007: d'ANTONI-NOBECOURT, J.C.,AUDRA P., IGOT, J.-Y. , La spéléogenèse par corrosion sulfurique, l'exemple de la grotte du Chat (Daluis, Alpes-Maritimes),Riviera Scientifique, 2007

NOBECOURT, 2019: NOBECOURT, J.-C., B-A-Bases de karstologie, Stage de moniteur fédéral module 2 - Annot, avril 2019, 2019

MONITEUR, 2006: Collectif, Karstologie dans les grottes de Daluis et de St Benoît., 2006



10 Annexes.

10.1 Signes topographiques conventionnels

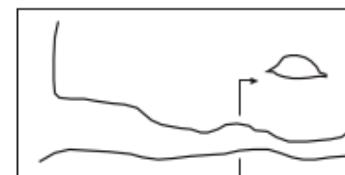
	Plan	Coupe
Point de relevé principal		
Dessin de galerie		
Croisement de galeries		
Continuations trop étroites		
Continuation possible		
Dimensions spatiales Présumées		
Forme du plafond		



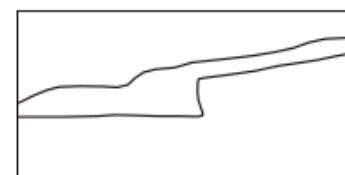
Plan

Coupe

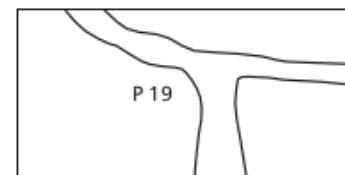
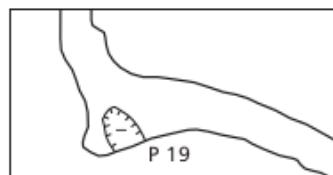
Entrée de cavité -
Sections transversales



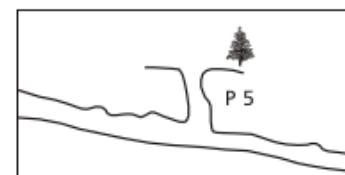
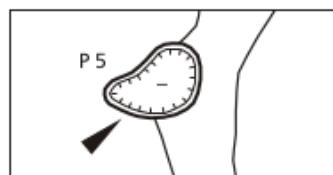
Marches/Ressauts



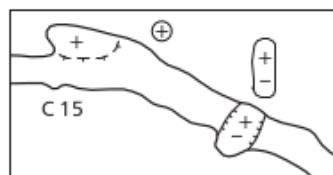
Puits
(profondeur en mètres)



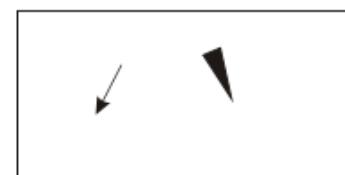
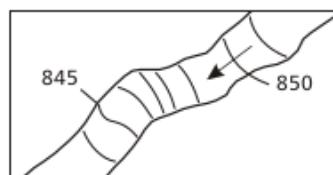
Puits débouchant en surface



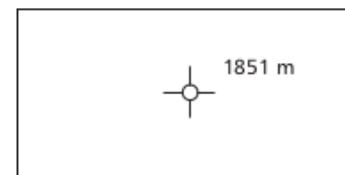
Cheminée -
Puits-Cheminée



Courbes de niveau -
Flèche de gradient -
Flèche indiquant l'entrée
de la cavité



Lignes de gradient -
Altitude au dessus du niveau
de la mer

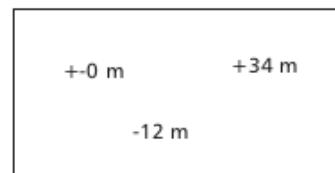




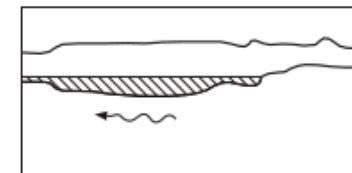
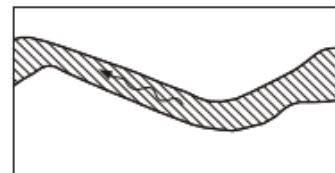
Plan

Coupe

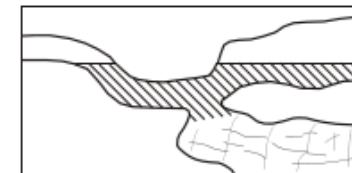
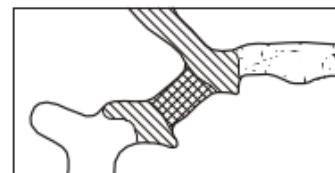
Altitude relative à l'entrée de la cavité -
Fracture-Faille-Joint de Strate-Fracture Inclinée



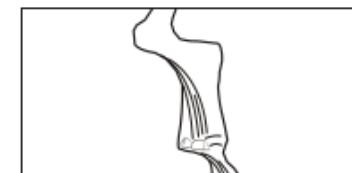
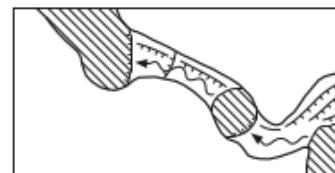
Lac -
Eau courante



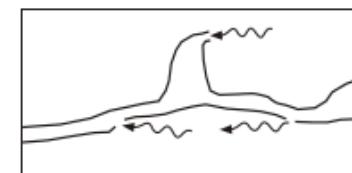
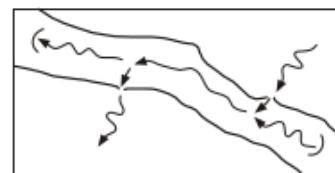
Siphon



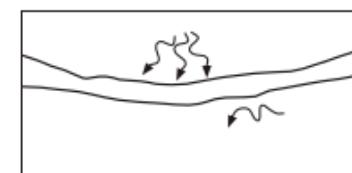
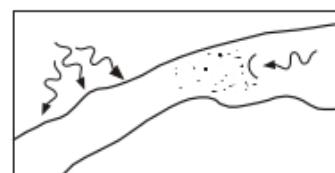
Cascade -
chute d'eau



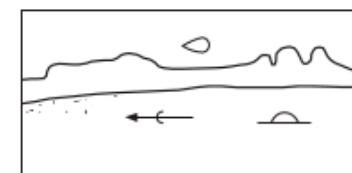
Source -
Perte



Arrivée d'eau diffuse -
Suintement d'eau dans un sédiment



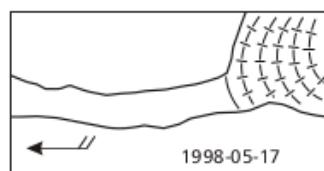
Coupoles d'érosion -
Marmites -
Courant d'écoulement fossile



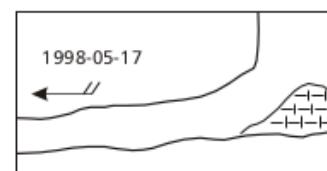


Plan

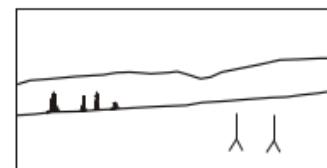
Courant d'air -
Glace/neige/givre



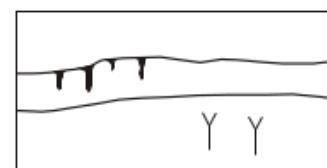
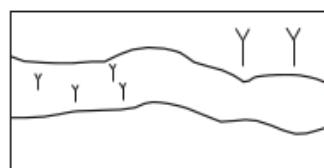
Coupe



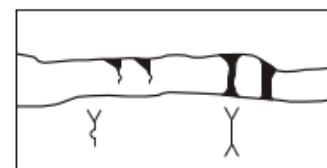
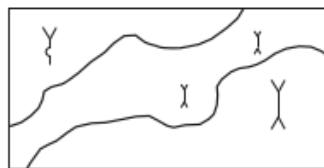
Stalagmites



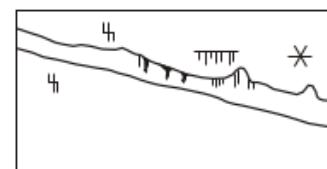
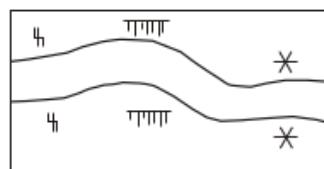
Stalactites



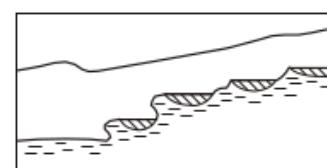
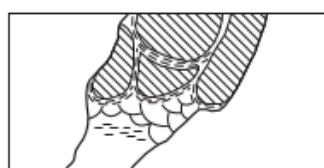
Draperies stalagmitiques -
Piliers stalagmitiques



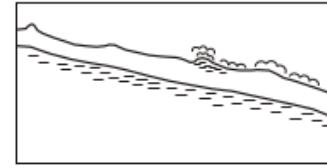
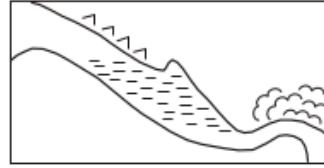
Excentriques/Helictites -
Spaghettis -
Cristaux



Gours



Concrétionnement au sol -
Concrétionnement sur les
Parois - Mondmilch

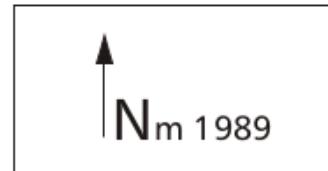
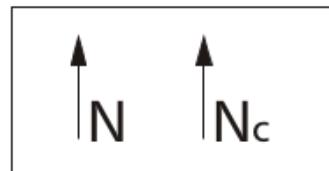




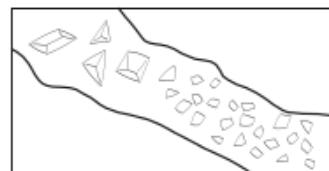
Plan

Coupe

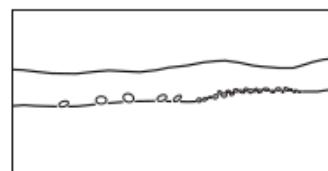
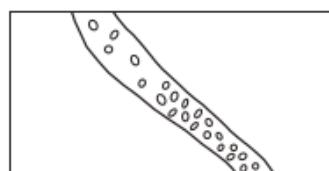
Nord - Géographique -
Cartographique - Magnétique



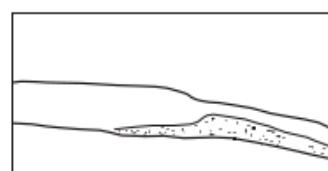
Blocs -
Débris



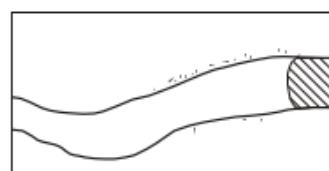
Cailloux



Sédiments clastiques:
Sable, limon, argile et humus



Parois couvertes d'argile



Guano



Camp



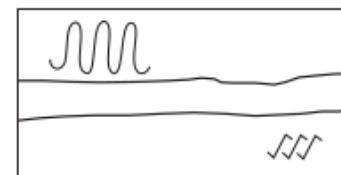


Plan

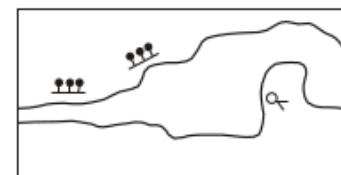
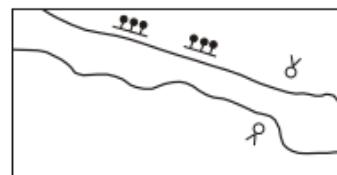
Anastomoses -
Lapiez



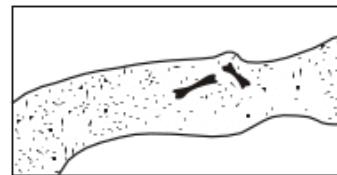
Coupe



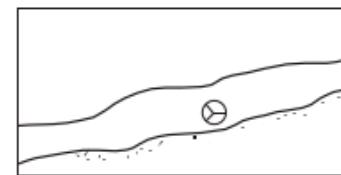
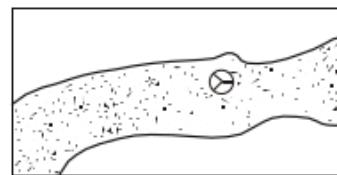
Concrétionnement en
choux-fleurs -
Disques



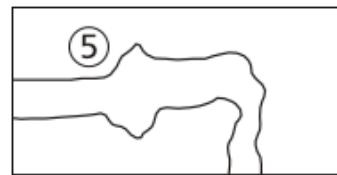
Ossements



Traces d'activité humaine

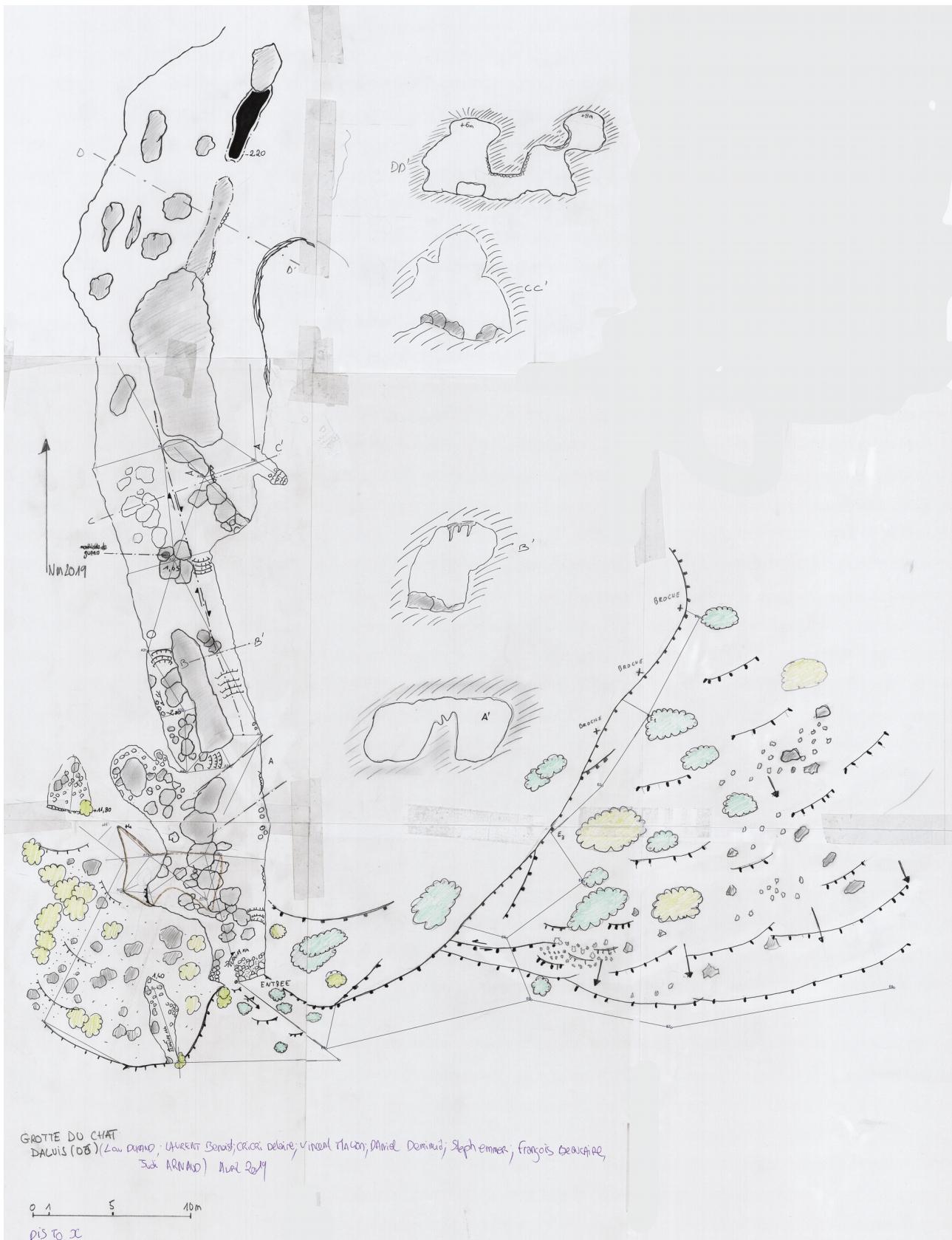


Hauteur d'une galerie/salle



10.2 Topographies

10.2.1 La galerie d'entrée et la falaise.

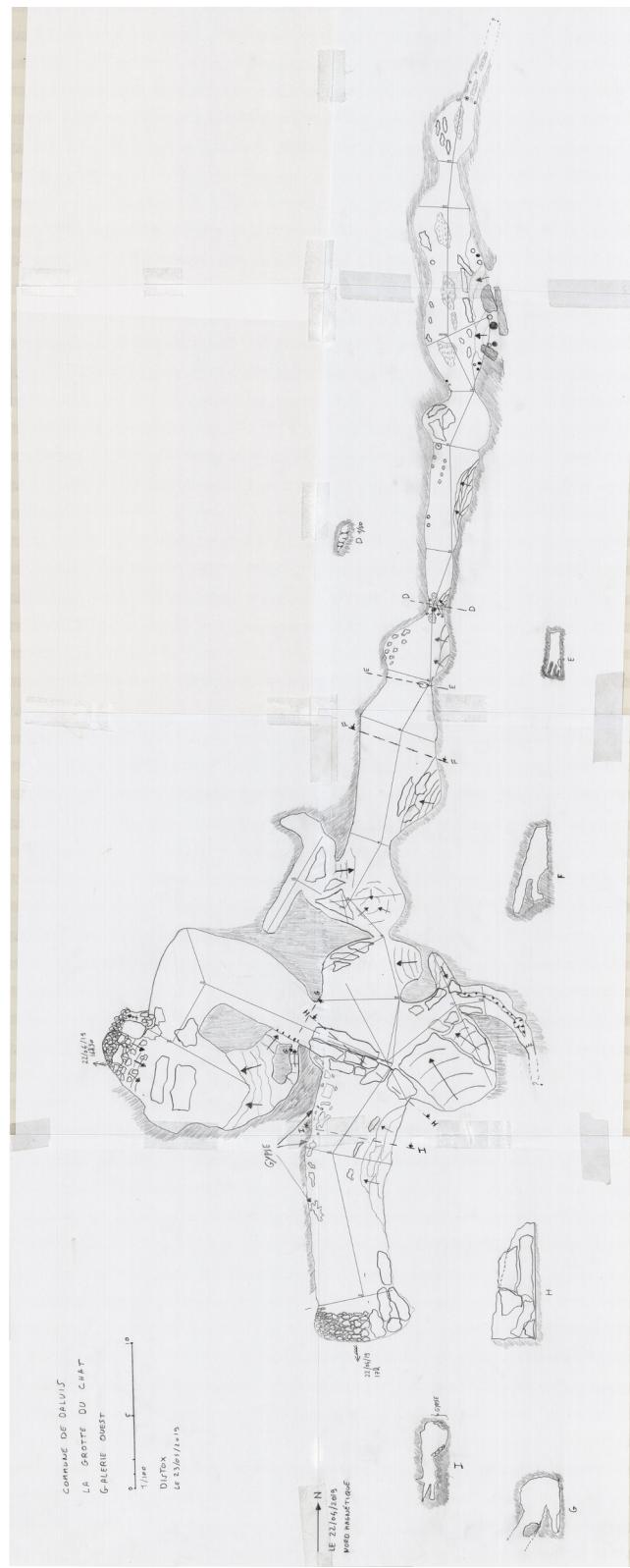




Fédération Française
de Spéléologie

10.2.2

La galerie Ouest.



10.3 Cartes des enjeux de protection.

10.3.1 Anthropisation



GROTTE DU CHAT ANTHROPISTATION

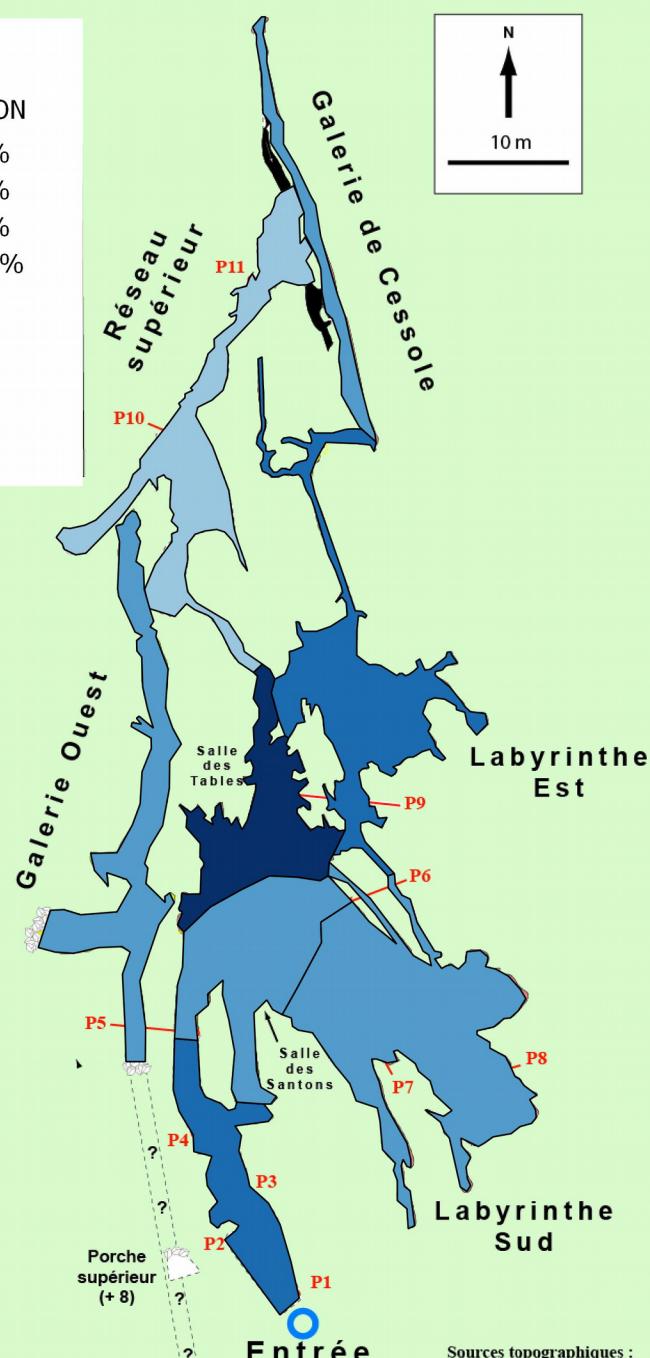
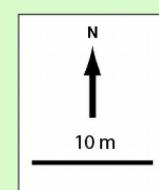
Légende

ANTHROPISTATION

- 20% - 40%
- 40% - 60%
- 60% - 80%
- 80% - 100%

Légende

- Pente
- Capteur de température





Fédération Française
de Spéléologie

10.3.2

Archéologie



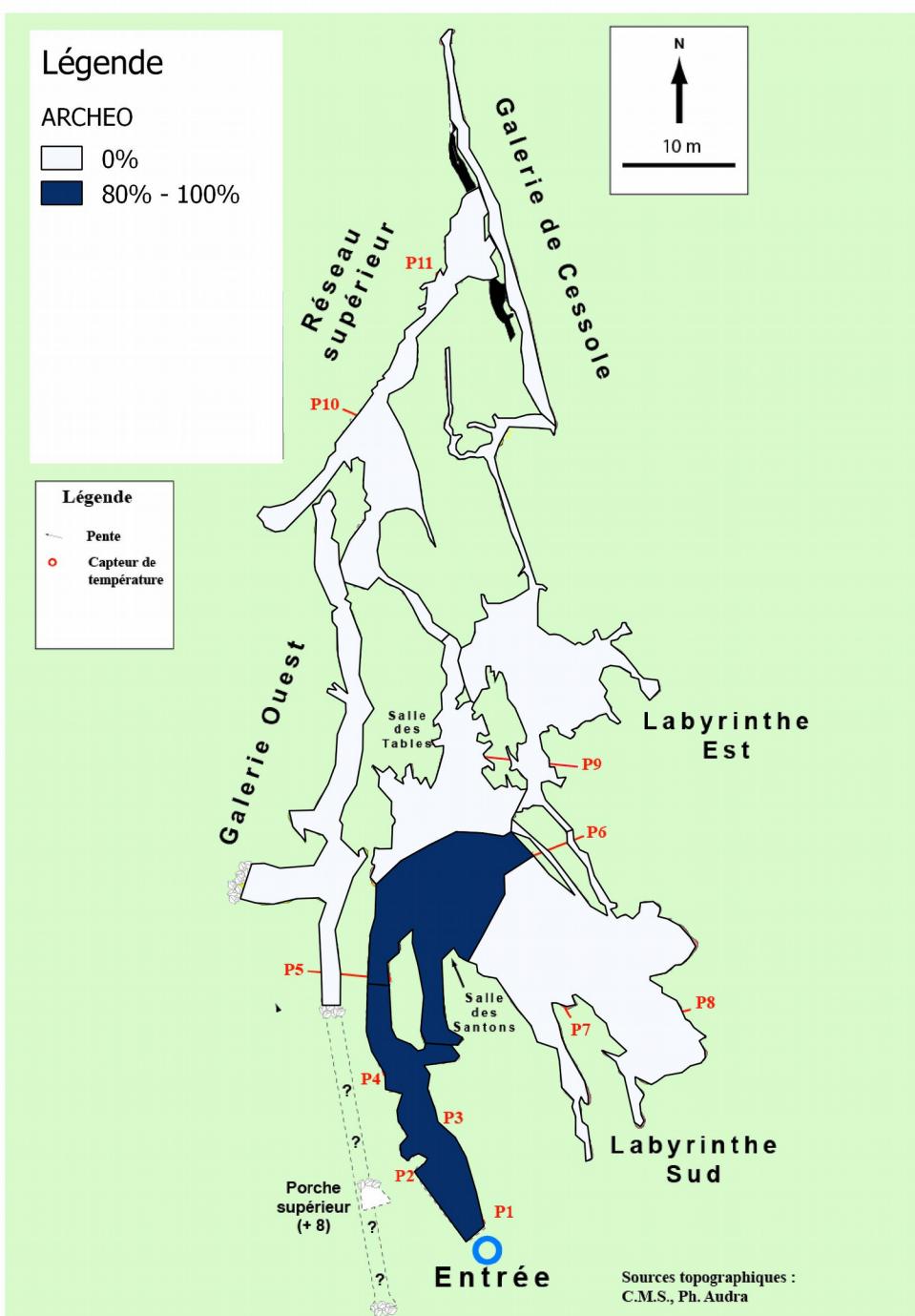
Fédération Française
de Spéléologie



École Française
de Spéléologie



GROTTE DU CHAT ARCHEOLOGIE



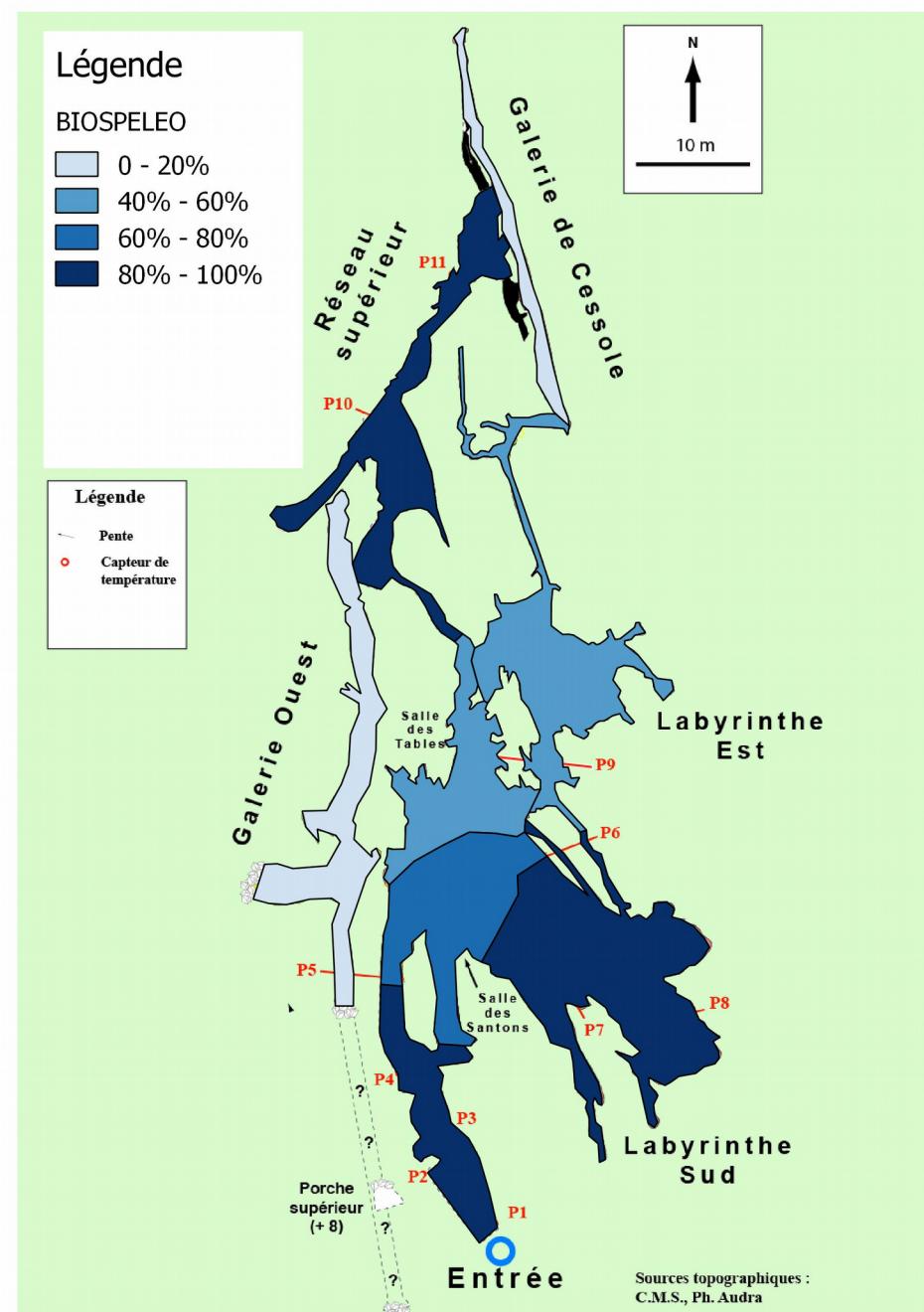


Fédération Française
de Spéléologie

10.3.3 Biospéléologie



GROTTE DU CHAT ENJEU BIOSPELEOLOGIE





Fédération Française
de Spéléologie

10.3.4

Hydrologie



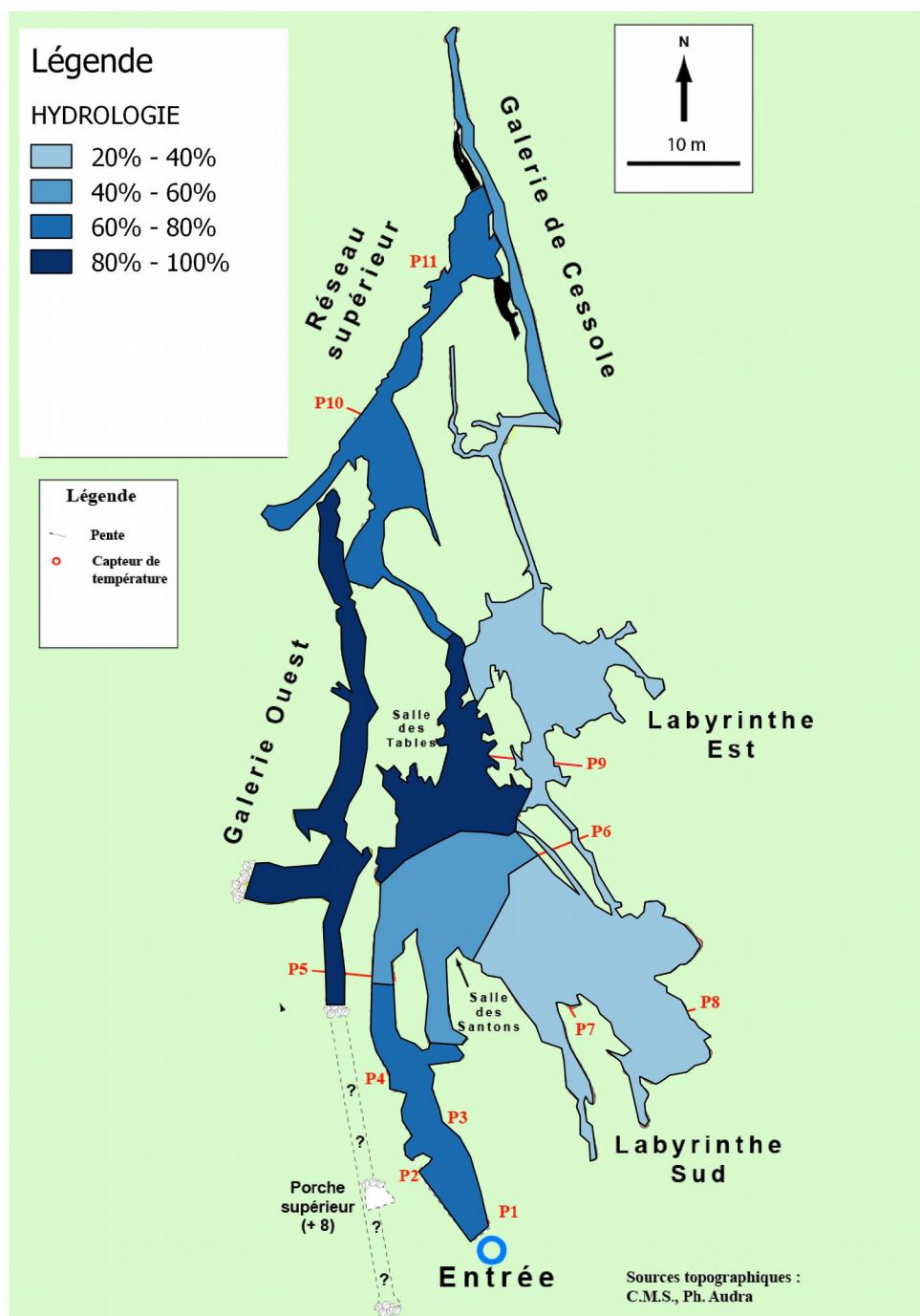
Fédération Française
de Spéléologie



École Française
de Spéléologie



GROTTE DU CHAT HYDROLOGIE





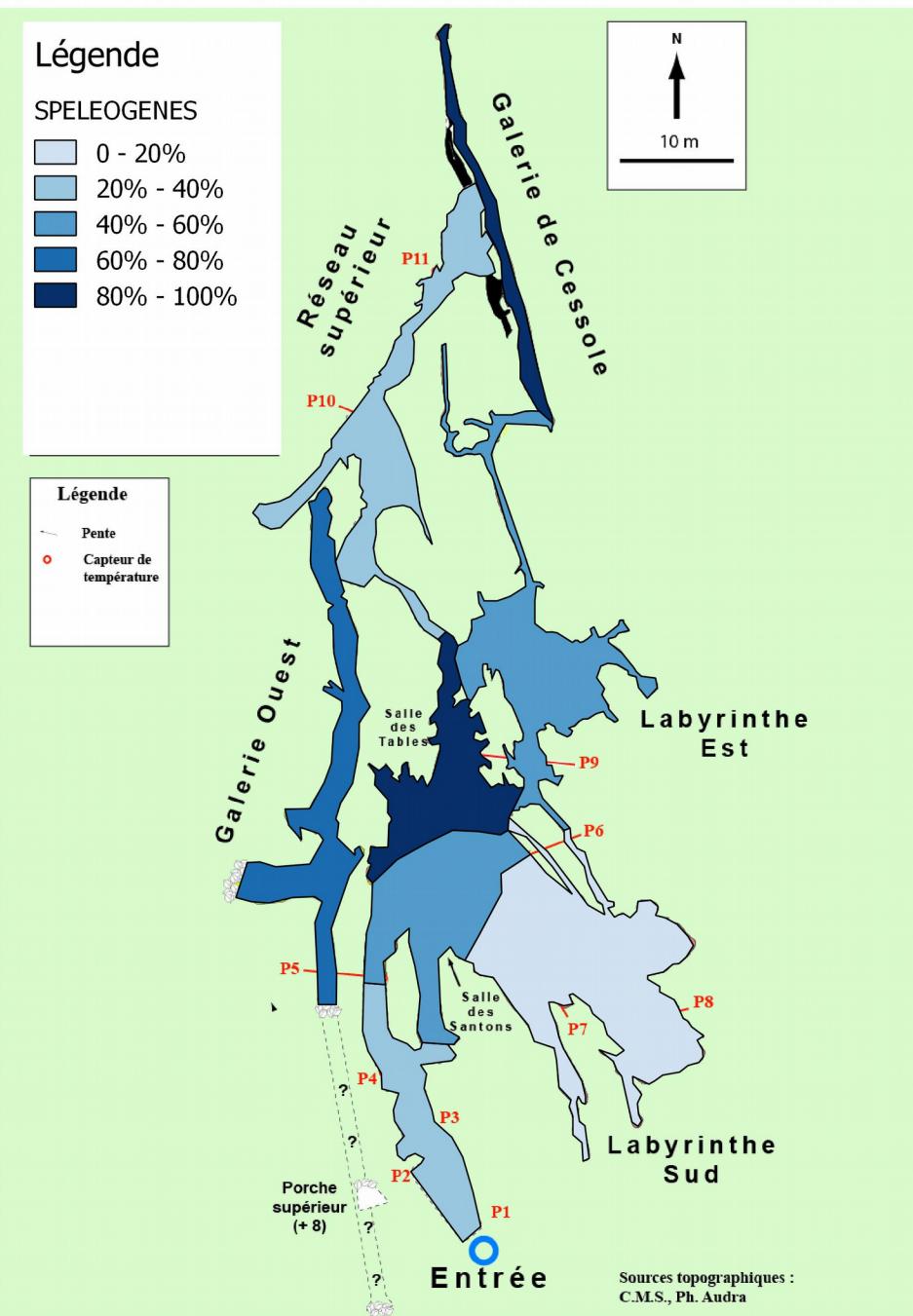
Fédération Française
de Spéléologie



École Française
de Spéléologie



GROTTE DU CHAT ENJEU SPELEOGENES





Fédération Française
de Spéléologie

10.3.6

Spéléothèmes



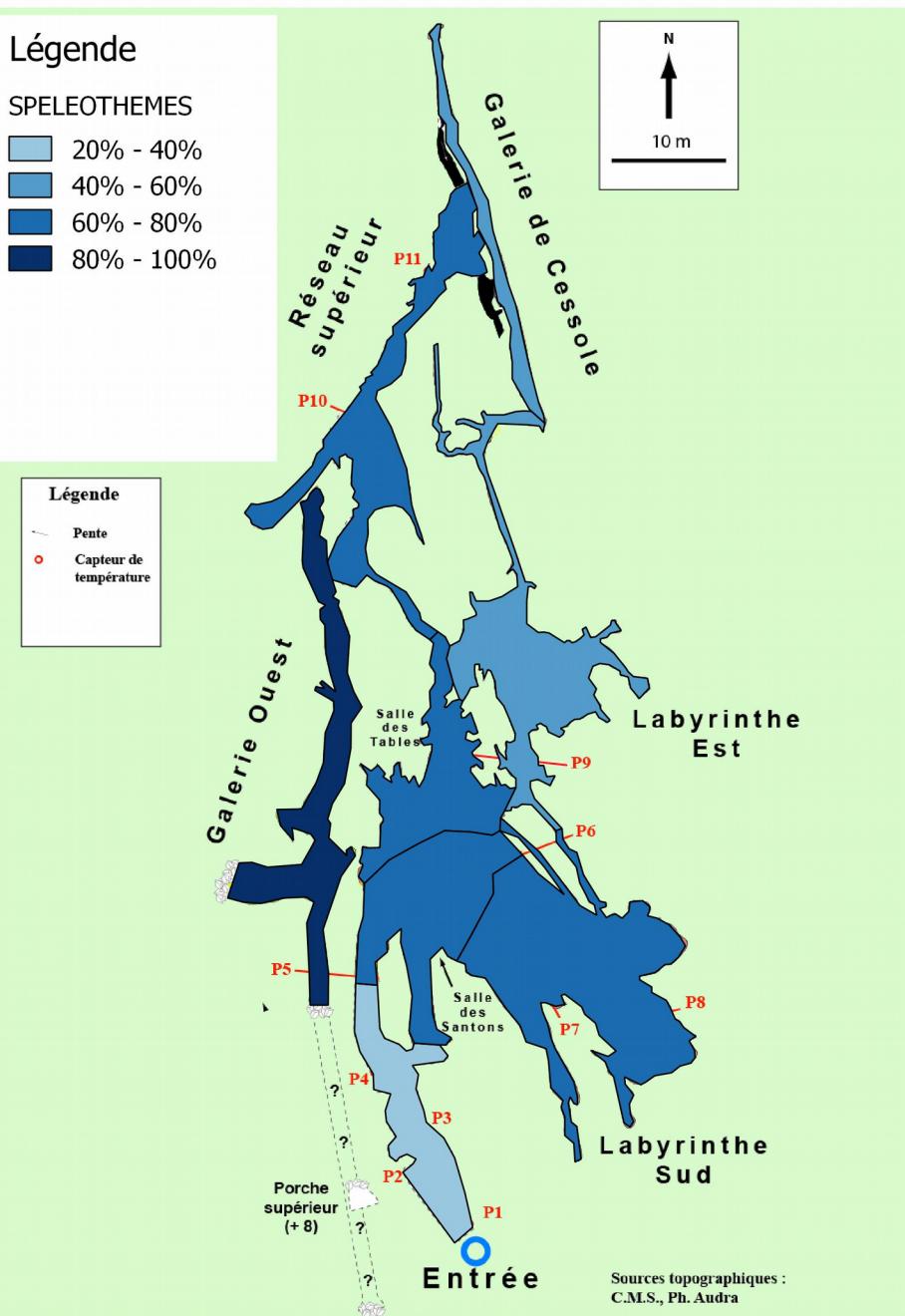
Fédération Française
de Spéléologie



École Française
de Spéléologie



GROTTE DU CHAT ENJEU SPELEOTHEMES



10.4 Tuto balisage.

Photos F. Beaucaire.









Là on passe aux choses sérieuses. Tu définis les emplacements, il faut protéger mais aussi penser à la facilité du cheminement du visiteur.



Les emplacements et le cheminement définis tu fores et tu mets en place tes piquets.
Pas oublier de tendre légèrement le fil.



10.5 Rappels de chimie élémentaire :

10.5.1 Atomes ions, molécules, késaco ?.

La chimie est la branche des sciences physique qui traite des transformations de la matière, dans des échelles de taille supérieures à celle du dixième de nanomètre.

On connaît 107 éléments, qui constituent les briques de bases de la chimie. Ces éléments sont rassemblés dans le tableau périodique de Mendeleïev, qui permet tout à la fois de rendre compte de leurs propriétés en tant qu'atomes et de leurs comportements vis à vis des autres atomes. La figure 37 ci-dessous montre les cinq premières lignes de ce tableau, qui contiennent tous les éléments impliqués dans la plupart des phénomènes courants, que ce soit les processus de base de la biologie ou de la karstologie.

Groupe		I A	II A															O	
Période		1	2															18	
1		Hydrogène 1 H 1,007975	Béryllium 4 Be 9,0121831	← nom de l'élément (gaz, liquide ou solide à 0°C et 101,3 kPa) ← numéro atomique ← symbole chimique ← masse atomique relative [ou celle de l'isotope le plus stable] [CIAAW "Atomic Weights 2013" + rev. 2015]														He 2 4,002602	
2		Lithium 3 Li 6,9395	Magnésium 12 Mg 24,3055	III A 3	IV A 4	V A 5	VI A 6	VII A 7	VIII		I B 11	II B 12	Bore 5 B 10,8135	Carbone 6 C 12,0106	Azote 7 N 14,006855	Oxygène 8 O 15,99940	Fluor 9 F 18,99840316	Néon 10 Ne 20,1797 (6)	
3		Sodium 11 Na 22,98976928	III A 3 Scandium 21 Sc 44,95908 (5)														Béryllium 4 Be 9,0121831		
4		Potassium 19 K 39,0963 (1)	Calcium 20 Ca 40,078 (4)	Titanium 22 Ti 47,867 (1)	Vanadium 23 Cr 50,9415 (1)	Manganèse 25 Mn 54,938044	Chrome 24 Cr 51,9961 (6)	Fer 26 Fe 55,845 (2)	Cobalt 27 Co 56,933194	Nickel 28 Ni 56,6934 (4)	Cuivre 29 Cu 63,546 (3)	Zinc 30 Zn 65,38 (2)	Gallium 31 Ga 69,723 (1)	Germanium 32 Ge 72,630 (8)	Phosphore 15 P 32,0675	Soufre 16 S 35,4515	Chlore 17 Cl 35,948 (1)	Argon 18 Ar 39,948 (1)	
5		Rubidium 37 Rb 65,4678 (3)	Strontium 38 Sr 87,62 (1)	Ytrrium 39 Y 88,90584	Zirconium 40 Zr 91,224 (2)	Niobium 41 Nb 92,90637	Molybdène 42 Mo 95,95 (1)	Technetium 43 Tc [98]	Ruthénium 44 Ru 101,07 (2)	Rhodium 45 Rh 102,90560	Palladium 46 Pd 106,42 (1)	Argent 47 Ag 107,6682 (2)	Cadmium 48 Cd 112,414 (4)	Indium 49 In 114,818 (1)	Etain 50 Sn 118,710 (7)	Antimoine 51 Sb 121,760 (1)	Tellure 52 Te 127,60 (3)	Iode 53 I 126,90447	Xénon 54 Xe 131,293 (6)

Figure 37: Extrait des 5 premières lignes (ou périodes) du tableau de Mendeleïev, qui contiennent les éléments les plus courants sur Terre. par Scaler, Michka B — Travail personnel, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=8985780>

Pour les besoins de ces rappels, nous nous bornerons à utiliser le modèle de Bohr (figure 38), dans lequel tous les éléments sont bâtis selon l'architecture suivante :

- Un noyau, au centre de l'atome contient un certain nombre de protons, chargés positivement. Le nombre de protons détermine la nature de l'élément : tous les atomes de l'univers qui contiennent 6 protons sont des atomes de carbone (C). Le noyau contient également des neutrons, qui ne portent pas de charge et sont en nombre variable : certains atomes de carbone (les plus nombreux) en contiennent 6, parfois 8. Cela forme une famille que l'on appelle des isotopes, car ils occupent la même place dans la classification périodique. Pour le carbone, ces isotopes sont respectivement ^{12}C et ^{14}C . Ils ont les mêmes propriétés chimiques, à part leur masse atomique et le fait que ^{14}C est moins stable que ^{12}C et se désintègre. Chaque élément possède un certain nombre d'isotopes d'autant moins stables que le noyau est gros.
- Un nuage électronique, contenant théoriquement autant d'électrons (e^-) qu'il y a de protons dans le noyau. Les électrons sont 2000 fois plus légers qu'un proton ou un neutron et portent une charge électrique opposée à celle du proton. Les électrons se déplacent sur des couches concentriques autour du noyau, chaque couche contenant plus d'électrons que la précédente. On compte jusqu'à 7 couches dans les éléments connus à ce jour. Le nombre

d'électrons influe principalement sur la taille de l'atome. Les électrons peuvent monter ou descendre d'une couche à l'autre, moyennant l'absorption ou l'émission d'une petite quantité d'énergie sous forme de lumière (théorie des quanta).

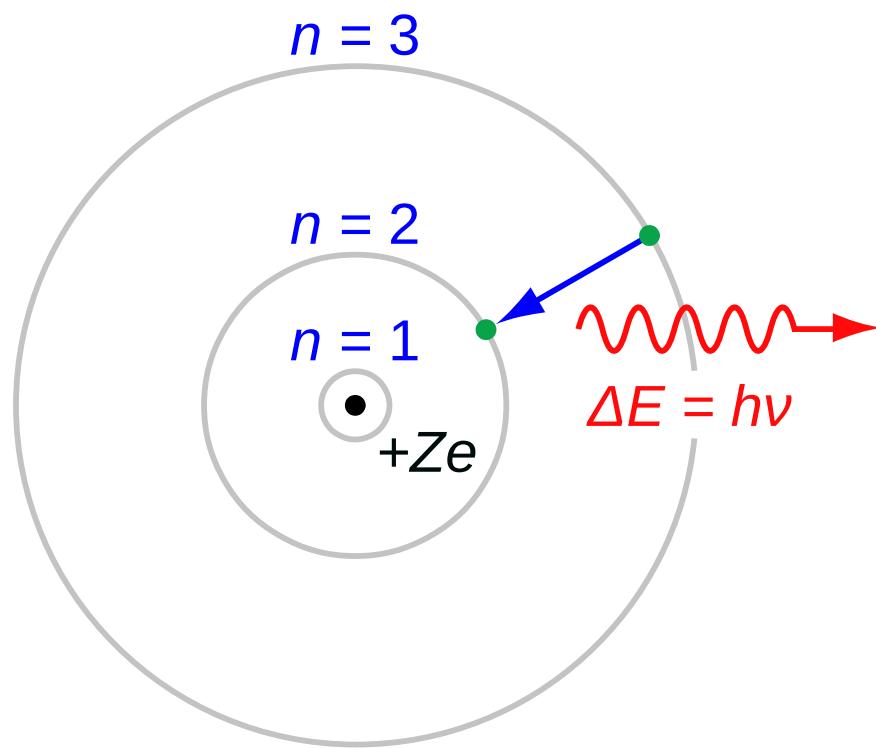


Figure 38: Le modèle de Bohr. Les e^- sont disposés sur des couches. Ils peuvent passer d'une couche à l'autre moyennant un saut énergétique se traduisant par l'absorption ou l'émission d'un photon. les couches les plus proches du noyau correspondent aux niveaux d'énergie les plus faibles. Ici, le photon est passé de la couche 3 à la couche 2 et a perdu une certaine quantité d'énergie sous la forme d'une émission lumineuse. Par JabberWok, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=2639910>

Une molécule est un assemblage d'atomes, dans des proportions qui ne doivent rien au hasard. Ainsi, la réaction entre le dihydrogène (H_2) et le dioxygène (O_2) donne-t-elle toujours des molécules d'eau (H_2O). Peut-être existe-t'il très brièvement au cours de la réaction d'autres formes de combinaison entre O et H, mais quand celle-ci prend fin car l'un des deux réactifs est épuisé, il ne reste que des molécules d'eau et du réactif excédentaire.

Un ion est un atome ou une molécule qui, pour exister a perdu ou gagné un ou plusieurs e^- (jusqu'à trois).

10.5.2 Les réactions chimiques

Le principe fondamental en chimie est celui de la conservation de la matière, énoncé par Lavoisier (« rien ne se crée, rien ne se perd : tout se transforme ») : on ne peut créer ni détruire d'atomes au moyen d'une réaction chimique. Ainsi, lors d'une réaction chimique, les atomes présents dans les molécules des réactifs sont simplement réarrangés pour former d'autres molécules.



Le tableau périodique se montre très utile pour comprendre comment les certains atomes (ceux des colonnes 1, 2 et 13 à 18, pour ceux des colonnes 3 à 12, c'est un peu plus compliqué) se lient les uns aux autres. Les atomes sont observés dans trois configurations :

- Sous forme monoatomique, pour les gaz « nobles », que l'on trouve dans la colonne 16. Ces atomes ne participent à aucune réaction. Par exemple : l'hélium (He)
- Dans des molécules, liés à d'autres atomes par des liaisons covalentes, ou ioniques, selon le cas. Par exemple le dioxygène (O_2) ou le dioxyde de carbone (CO_2).
- Sous forme d'ions, c-à-d ayant gagné ou perdu jusqu'à 3 e^- . On trouve des ions principalement dans les solutions aqueuses. Par exemple : l'ion chlorure (Cl^-), qui est un atome de chlore avec un électron supplémentaire, l'ion magnésium (Mg^{2+}), qui est un atome de magnésium ayant perdu deux e^- , ou encore l'ion sulfate (SO_4^{2-}), constitué d'un atome de soufre (S), de 4 atomes d'oxygène (O) et qui possède deux électrons surnuméraires.

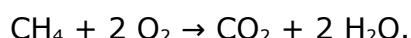
Les atomes forment des ions et des molécules en fonction de leur place dans le tableau périodique (celle-ci dépendant de la structure de leur nuage électronique), selon la règle suivante, valable pour les atomes des colonnes 1,2 et 13 à 18 : un atome est stable (il pourra être observé) si et seulement si sa couche électronique externe est saturée, c'est à dire identique à celle du gaz noble dont le nombre de protons est le plus proche du sien. Un atome a deux moyens d'arriver à ce résultat :

- Gagner ou perdre des électrons pour former un ion,
- Se lier avec un autre atome en mettant en commun un ou plusieurs e^- avec des atomes voisins, de manière à ce que chacun ait sa couche électronique saturée.

Ainsi :

- Les gaz nobles ne réagissent jamais car leur couche électronique est déjà saturée.
- Les éléments des colonnes 1 et 2 et 17 vont former des ions portant respectivement 1 ou 2 charges positives (ex : Na^+ , Mg^{2+}) ou 1 charge négative (Cl^- , I^-) ou encore, se lier avec d'autres atomes en leur proposant ou en acceptant un ou deux électrons pour former des liaisons ioniques. Par exemple : $NaCl$. Mis en solution dans l'eau, ce corps va donner des ions Na^+ et Cl^- .
- les atomes des colonnes 13 à 16 vont former des liaisons covalentes (respectivement 3, 4, 3 ou 2) avec d'autres atomes. Dans ce type de liaison, l' e^- mis en jeu devient commun aux deux atomes. C'est ce qui se passe dans la molécule de CO_2 . Le carbone peut faire 4 liaisons et l'oxygène 2.

On rend compte d'une réaction et des proportions dans lesquelles les éléments y prennent part en utilisant le concept d'équation chimique. Par exemple : la combustion du méthane (CH_4) dans le dioxygène (O_2) est décrite par l'équation :



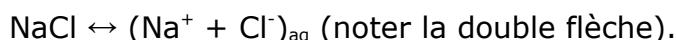
Cette formulation indique qu'une molécule de méthane réagit avec deux molécules de dioxygène pour donner une molécule de dioxyde de carbone et deux molécules d'eau. Les nombres écrits devant les symboles de chaque molécule (le 1 est sous entendu) sont appelés coefficients stœchiométriques. On vérifie sans peine que



dans les réactifs, comme dans les produits, le nombre total d'atomes de chaque élément est identique. De fait un volume de méthane se combinera toujours avec deux volumes de dioxygène (à pression et température identiques, deux volumes de gaz différents contiennent exactement le même nombre de molécules).

La plupart des réactions sont à sens unique et irréversibles. D'autres constituent des équilibres, à savoir : le résultat de deux réactions chimiques antagonistes simultanées dont les effets, s'annulant mutuellement conduisent à une situation stable dépendant des conditions extérieures.

Pour expliquer ces deux notions, on peut prendre l'exemple de la dissolution du chlorure de sodium dans l'eau : En présence d'eau, le cristal de chlorure de sodium est déstructuré et les atomes de chlore (Cl) et de sodium (Na) qui le composent et tenaient ensemble sous l'effet de liaison ioniques, se trouvent séparés et mis en solution dans l'eau, sous forme d'ions chlorure (Cl^-) et sodium (Na^+), selon la réaction : $\text{NaCl} \rightarrow (\text{Na}^+ + \text{Cl}^-)_{\text{aq}}$ (Noter le fait que la molécule d'eau (H_2O) n'apparaît pas dans l'équation car elle n'en sort pas modifiée (On dit qu'il s'agit d'une espèce spectatrice)). Si l'on continue à rajouter du sel dans l'eau, arrive un moment où celui-ci ne se dissout plus : la solution est saturée et le système contient du sel à la fois sous forme dissoute et sous forme cristalline. On atteint un état d'équilibre chimique : si à un instant t , un ion Cl^- et un ion Na^+ précipitent pour s'intégrer au cristal, à un autre endroit au même instant, un atome de chlore et un atome de sodium vont passer de la structure cristalline à la forme dissoute. Ainsi, l'équilibre est une notion macroscopique, mais s'accompagne microscopiquement d'échanges permanents entre les différentes parties du système (les phases). Un tel équilibre est décrit par le formalisme suivant :



La quantité de sel soluble dans l'eau dépend de la température et augmente avec elle : la température est donc un facteur extérieur au système susceptible de faire évoluer cet équilibre dans le sens de la dissolution ou de la précipitation. De même, si l'eau s'évapore ou que l'on en rajoute, l'équilibre va se déplacer dans le sens respectivement de la précipitation ou de la dissolution du sel : c'est ce qui se passe dans les marais-salants. Dans le domaine qui nous intéresse, la dissolution et la précipitation de la calcite dans l'eau chargée en CO_2 est également un équilibre.

Le fait que la matière se conserve au cours d'une réaction chimique implique que la quantité et la nature des atomes présents initialement dans un système restent identiques au cours du temps, si celui-ci n'évolue qu'au travers de réactions chimiques. Celles qui peuvent se produire spontanément sont celles qui tendent à diminuer la quantité d'énergie stockée dans les liaisons interatomiques d'une molécule ou d'un cristal. Ce sont les réactions mises en jeu dans la chimie minérale (comme les équilibres de dissolution/précipitation des sels minéraux, qui évoluent naturellement, sous l'effet des variations des conditions extérieures, toujours dans le sens d'une diminution de l'énergie stockée dans les molécules). D'autres, au contraire, tendent à augmenter la quantité d'énergie stockée dans ces liaisons au sein des molécules et ont lieu dans le règne vivant (par exemple : les réactions impliquées dans la photosynthèse, la chimiosynthèse ou le cycle de Krebs).

10.6 Méthode de jaugeage au sel.

Le principe est d'injecter une quantité de Chlorure de Sodium (NaCl) connue dans la rivière puis de surveiller le passage du nuage de sel en mesurant la

conductivité de l'eau de la rivière à l'aval du point d'injection, à un endroit suffisamment éloigné du point d'injections pour que l'on puisse considérer que la concentration en sel de l'eau soit homogène.

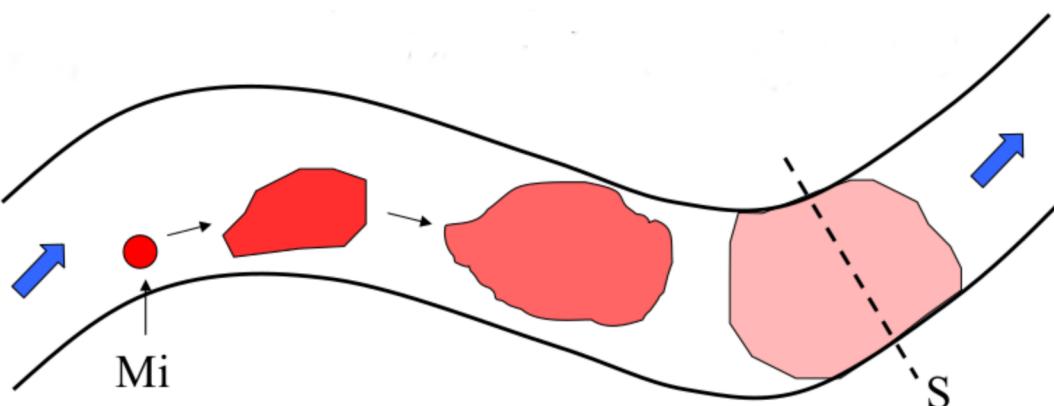


Figure 39: Le point de mesure doit être suffisamment éloigné du point d'injection pour que le traceur soit réparti de manière homogène dans le volume d'eau. Source : EDF

On mesure, à intervalles réguliers, la conductivité C_0 ($\mu\text{S}/\text{cm}$) de l'eau en un point donné, en fonction du temps. Il faut utiliser un appareil capable de ramener la conductivité à la température de 25°C (ce qui est le cas de la plupart des appareils sur le marché). De ces valeurs, on va déduire la concentration C (mg/l) de l'eau en sel, en utilisant la formule $C=0,48 \cdot C_0$ (Attention : Le paramètre 0,48 est spécifique du NaCl !). On peut ainsi tracer la courbe de la concentration de l'eau en fonction du temps.

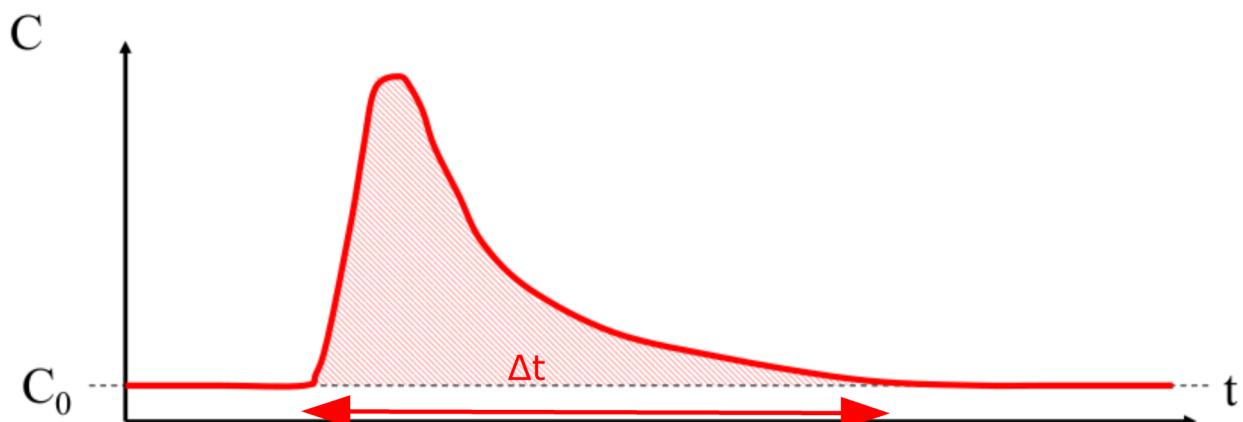


Figure 40: Exemple de courbe de concentration en fonction du temps. La partie hachurée en rouge correspond à l'intégrale $\int_0^{\Delta t} (C - C_0) dt$ qu'il faut calculer. Source : EDF

En calculant, l'intégrale de cette courbe déduction faite de la concentration initiale C_0 de l'eau de la rivière, c-à-d : en calculant $\int_0^{\Delta t} (C - C_0) dt$, puis en divisant la quantité obtenue par Δt , le temps de passage total, on obtient la concentration

moyenne $\bar{C} = \frac{\int_0^{\Delta t} (C - C_0) dt}{\Delta t}$ (mg/l) de l'eau pendant le temps de passage, dont on

déduit le débit Q (l/s) du cours d'eau, à l'aide de la formule : $Q = \frac{1000 M}{\Delta t \bar{C}}$.

10.7

Fiches pédagogiques

La source sulfurée des gorges du Riou. (**Daluis, 06**)

Situé en rive gauche du Riou, et à l'aplomb d'une barre calcaire, cette source est facilement repérable à l'odeur d'œuf pourri qui s'en dégage. Elle se compose d'une source principale et de deux petits redons situés quelques mètres en amont.



Figure 41: Le griffon principal de la source hydrothermale du vallon du Riou. photo de F. Beaucaire

1. CONTEXTE GEOLOGIQUE.

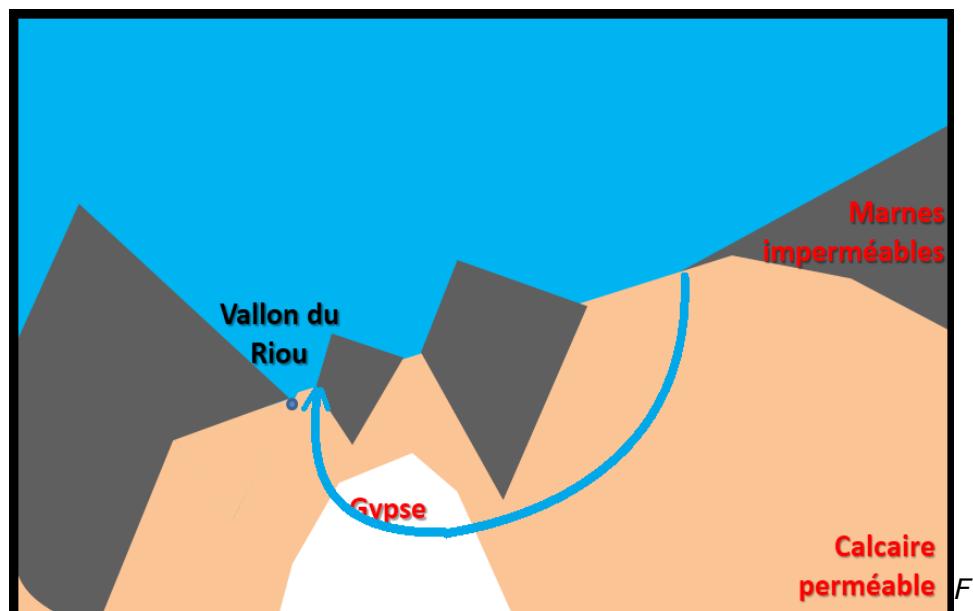


Figure 42: Courtoisie de J.C. Nobécourt

Les précipitations de surface s'infiltrent dans la couche de calcaires perméables du Trias (qui contient des lignites) et descendent jusqu'au niveau du lit du Var, où elles rencontrent des gypses. (affleurement visible au niveau du premier virage en montant au village). Elles dissolvent le gypse. On obtient donc des eaux chargées de gypse ($\text{Ca}^{2+} + \text{SO}_4^{2-} \Rightarrow \text{H}_2\text{S} + \text{CO}_3^{2-} + \text{H}_2\text{O}$), ce qui permet à des bactéries chimiolithotrophes de métaboliser le carbone en oxydant les sulfates, selon la réaction : $\text{CH}_4 + \text{SO}_4^{2-} \Rightarrow \text{H}_2\text{S} + \text{CO}_3^{2-} + \text{H}_2\text{O}$, dans laquelle les calcium Ca^{2+} n'apparaissent pas, étant strictement spectateurs.

L'eau chargée de H_2S poursuit son chemin et resurgit 200m plus haut, dans le vallon du Riou, à l'aplomb de la grotte du Chat.

2. ACCES



Géoportal

Depuis la grotte, continuer sur le chemin, jusqu'au lit du Riou (à proximité du point coté 891) puis descendre le lit de la rivière jusqu'à l'encaissement. La source se trouve en R.G, env 200m après la sortie de l'encaissement, à proximité du point coté 841. Coordonnées : lon : 6.7861° / lat : 44.0288°.



A aborder avec précaution en cas de précipitations : la progression dans le lit pouvant imposer de traverser la rivière à gué plusieurs fois de suite.

3. EXPLOITATION PEDAGOGIQUE.

3.1. Observations :

- Le lit du ruisseau est plutôt ouvert jusqu'au moment où il arrive au contact avec la barre de calcaire. Là, il s'encaisse fortement, sur une dizaine de mètre de longueur et de profondeur. Il s'évase rapidement dès la sortie de la cluse. A cet endroit, on peut prendre le temps d'expliquer le phénomène d'érosion mécanique et de dissolution carbonique de surface du calcaire.
- On peut également prendre le temps d'observer la succession des couches géologiques et l'étagement de la végétation, puisque la vue porte jusqu'aux sommet de Mélina qui surplombe le vallon, et culmine à 2207 m.



Figure 43: Un des griffons de la source. Les filaments bactériens colonisent la totalité de leur niche. c-à-d qu'ils disparaissent quand le mélange avec l'eau du ruisseau devient trop important. Photo F. Beaucaire.

- La source est colonisée par des filaments blancs longs de quelques centimètres et de quelques millimètres de diamètre (figure 43). Ces filaments disparaissent à mesure que l'eau de la source se mélange avec celle du Riou. Ils sont absents dans le lit du Riou lui-même. Elle semble pétiller.
- Elle dégage également une forte odeur d'œufs pourris, caractéristique du H_2S .

3.2. Pistes de mesures de terrain à réaliser.

a) en faisant des comparaisons systématiques entre le lit de la rivière et la source.

- Température : la température de la source sera plus haute que celle du lit de la rivière, ce qui témoigne de son origine hydrothermale.
- Conductivité : La source a une conductivité plus forte que celle de l'eau de la rivière, ce qui indique une teneur en minéraux plus importante que dans le torrent.



Figure 44: Mesure de conductimétrie et de température dans le lit du Riou. La sonde est immergée dans l'eau derrière le rocher aux pieds de l'opérateur. Photo L. Benoist

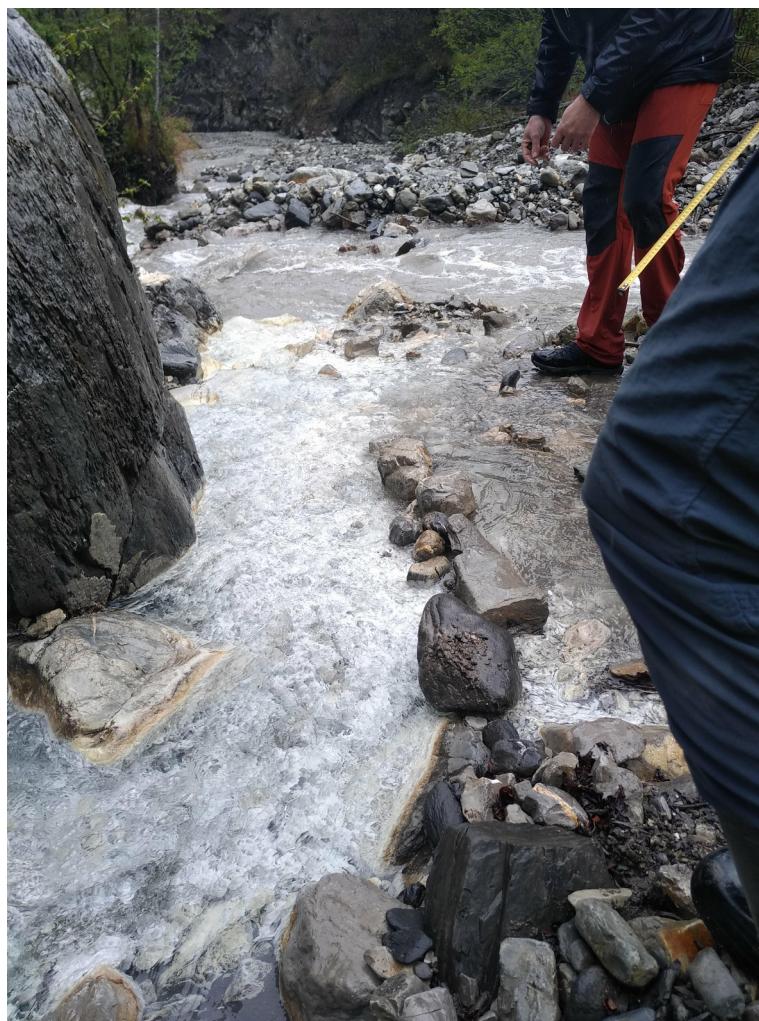
- pH : On peut s'attendre à ce que la source montre un pH (légèrement) plus acide que l'eau de la rivière, du fait de l'oxydation du sulfure d'hydrogène en acide sulfurique en présence de l'oxygène atmosphérique



- test de reconnaissance d'ions (Calcium Ca^{2+} et sulfate SO_4^{2-}).
 - Les ions Ca^{2+} forment un précipité blanc d'oxalate de calcium à l'ajout d'oxalate d'ammonium.
 - Les ions SO_4^{2-} réagissent avec le Chlorure de Baryum en formant un précipité blanc de Sulfate de Baryum.
 - A priori, les ions S^{2-} ne sont pas stables en solution dans l'eau et se combinent avec les ions H^+ pour former le H_2S qui se dissout dans l'eau. On ne devrait pas pouvoir en identifier la présence autrement qu'à l'odorat...

b) De manière indépendante.

- Débit : On peut tenter d'évaluer le débit de la source par la méthode de dérive de flotteurs. Pour cela, il faut tenter au préalable de canaliser la source dans un



*Figure 45: Préparation d'un canal de section rectangulaire pour l'estimation du débit du griffon principal de la source avec la méthode des flotteurs.
Photo L. Benoist*



canal dont on peut facilement évaluer la section S (m^2). La suite consiste à lâcher dans le courant des flotteurs (brindilles, confetti, etc.) et à chronométrer le temps t (s) qu'ils mettent pour parcourir une distance d (m), choisie au préalable. Le débit Q (m^3/s) est obtenu à l'aide de la formule :
$$Q = \frac{S \times d}{t}$$
.

- Mesure de la teneur en H_2S atmosphérique à l'aide d'un analyseur de gaz, placé à proximité de la source.

4. Pour les enseignants.

Dans le cadre des programmes du cycle 4, cette partie liste de manière non exhaustive les compétences et notions qui peuvent être abordées lors d'une sortie à la source du Riou, couplée ou non à la visite de la grotte du Chat.

Programme du cycle 4, juin 2016.

- Sciences Physiques :

Compétences

- Pratiquer des démarches scientifiques.
- Se situer dans le temps et dans l'espace.

Notions

L'ensemble du programme du cycle 4 est abordable au travers de cette série d'activités.

- Mathématiques :

Compétences

- Chercher
- Raisonner
- Modéliser
- Calculer
- Communiquer

Notions

- Pratiquer le calcul exact ou approché, mental, à la main ou instrumenté.
- Interpréter, traiter et représenter des données
- Résoudre des problèmes de proportionnalité.
- L'ensemble du thème grandeurs et mesures.
- Représenter l'espace.



- Sciences de la Vie et de la Terre :

Compétences

- Pratiquer des démarches scientifiques.
- Se situer dans le temps et dans l'espace.

Notions

- La Terre, l'environnement et l'action humaine
 - Expliquer quelques phénomènes géologiques à partir du contexte géodynamique local.
- Le vivant et son évolution

- Français :

Compétences

- Comprendre et s'exprimer à l'oral
- Ecrire

Notions

- Langage oral
 - S'exprimer de façon maîtrisée en s'adressant à un auditoire.
 - Participer de façon constructive à des échanges oraux.
- Ecriture
 - Utiliser l'écrit pour penser et apprendre.

- Education physique et Sportive :

Compétences

- S'approprier seul ou à plusieurs par la pratique, les méthodes et outils pour apprendre

Notions

- Adapter ses déplacements à des environnements variés