



Fédération Française
de Spéléologie



Compte-rendu du stage
« Initiation pratique à la karstologie et l'hydrologie souterraine »

19-20 septembre 2015
Combe aux Prêtres – réseau de Francheville (21)



Equipe d'encadrement : Vincent Schneider, Didier Cailhol, Fabien Fécherouille, Alexandre Zappelli

C'est la troisième édition de ce stage, qui a permis à de nouveaux candidats de découvrir la karstologie et l'hydrogéologie souterraine dans une cavité usuellement prisée par les « Parisiens », la Combe aux prêtres. Cette cavité, de surcroît jolie, est parsemée de richesses géologiques.

Elle constitue un terrain de jeux parfait pour ce stage organisé par le CDS93 en collaboration avec le CoSIF. Quant à elle, comme en 2013, l'Andra a soutenu cette action en nous fournissant des échelles géologiques, des crayons et stylos et un ouvrage dédié à l'argile pour chaque participant.

Cette grotte est aussi le décor d'une étude de plus grande ampleur sur les niveaux d'eau. Cette étude a été couronnée et encouragée par la Fédération Française de Spéléologie sous la forme d'un FAAL (fonds d'aide aux actions locales), avec la collaboration du SCR, du CDS93, du CoSIF et du CDS21 à cette étude. Le pilotage est effectué par le Spéléo Club Aubeois (CDS10) et le Spéléo Club Rosnéen (Vincent Schneider).

Les expériences de 2013 et 2014 avaient conclu qu'il ne fallait pas dépasser 10 participants, on a tout de même poussé à 12 compte tenu de la demande. Ainsi, compte tenu de deux désistements tardifs qui n'ont pu être remplacés, 10 stagiaires sont attendus, de région francilienne, mais aussi de l'Aube, et du Haut Rhin.

Cette année, nous avons le plaisir d'accueillir dans l'équipe d'encadrement Didier Cailhol et Alexandre Zappelli, ce qui étoffera les discussions et les observations scientifiques, déjà très denses, des années précédentes.

Le stage a lieu le week-end : observations et expériences in situ le samedi, et partie chiffrée, théorique, et suite des discussions le dimanche. Arrivés le 18 septembre 2015 au soir pour la plupart d'entre nous, Fabien part équiper la cavité pour que le stage puisse démarrer rapidement le samedi matin, et Vincent prépare l'ensemble du matériel et la logistique du stage. Le gîte est celui de la Clairière, à Francheville, où l'accueil est toujours chaleureux.

Contrairement à l'année précédente, l'étiage a été très marqué les semaines passées (étiage quinquennal), et les quelques grosses pluies ont été en grande partie absorbées par les sols asséchés, donnant lieu à quelques crues de faible ampleur, mais notables, n'inquiétant pas notre programme. La visite du vendredi permet de se rendre compte du niveau d'eau à la base des puits, grâce à l'échelle limnimétrique posée au cours de l'été 2014, et au cours de la journée du samedi on sera à moins de 20 cm : parfait ! Pour mémoire en 2014 nous avons constaté 16 cm le vendredi soir et le samedi matin, le niveau à l'échelle a atteint 63 cm.

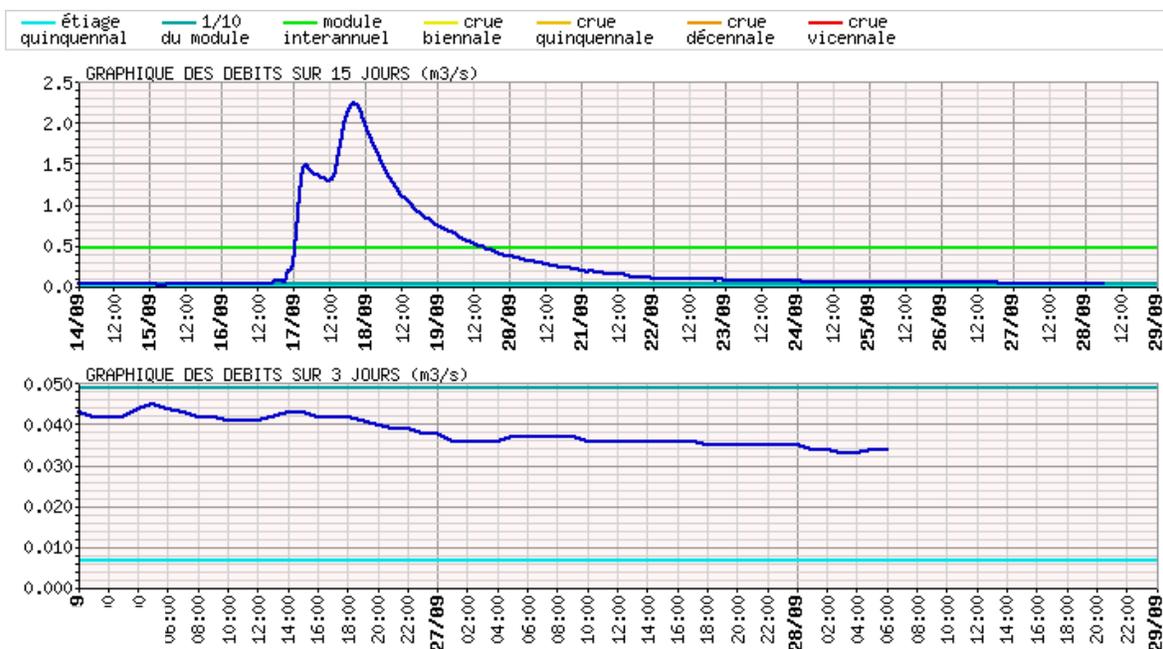


Figure 1 : Chronique des débits à Val Suzon (septembre 2015)

Petit déjeuner 7h30. Le rendez-vous est fixé à 8h30 au gîte pour se répartir le matériel et partir. Les premières explications commencent à 9h à l'entrée de la cavité. L'objectif de cette première journée est d'aller jusqu'au réseau Ben en faisant un maximum d'observations d'ordre géologique ou karstologique. Après déjeuner nous commencerons les mesures hydrologiques, avec cette année la présence de deux fluorimètres et un conductimètre pour effectuer des jaugeages (mesures de débit) aux traceurs.

1 ELEMENTS DE KARSTOLOGIE

1.1 Repérage des couches géologiques in situ

La présentation du samedi matin aborde la topographie générale de la cavité, et les principales strates géologiques, l'objectif étant de privilégier les observations de terrain. Les cassures inhérentes à l'orogénèse du massif central à proximité du bassin parisien et du massif de la Brenne sont l'une des causes de la formation du massif sur lequel la Combe s'est créée.

La coupe schématique au niveau de l'entrée présente trois principaux faciès : le Comblanchien, le calcaire à oolithes, puis les calcaires à chailles. A partir de 10h, nous descendons dans la cavité. Le premier exercice est de repérer sous terre les changements de strates :

- dans la partie supérieure, le comblanchien : les composantes sont fines, témoignant d'un milieu de dépôt calme ;
- à la base des puits : on observe la transition avec le calcaire oolithique, avec des enchevêtrements de couches (stratification entrecroisée), puis présence d'oolithes, plus granuleuses, typiques d'un milieu de dépôt plus agité, côtier ;
- juste au-dessus de la rivière : nouveau changement de strate, l'on peut observer des calcaires à chailles (accidents siliceux) ressemblant à des boudins blancs entourés d'une couche brune (due à la présence de magnésium). La transition avec le calcaire à oolithes est marquée par un lit d'argile rougeâtre de quelques centimètres d'épaisseur. Didier



Figure 2 : Présentation du samedi matin, avant l'entrée dans la cavité

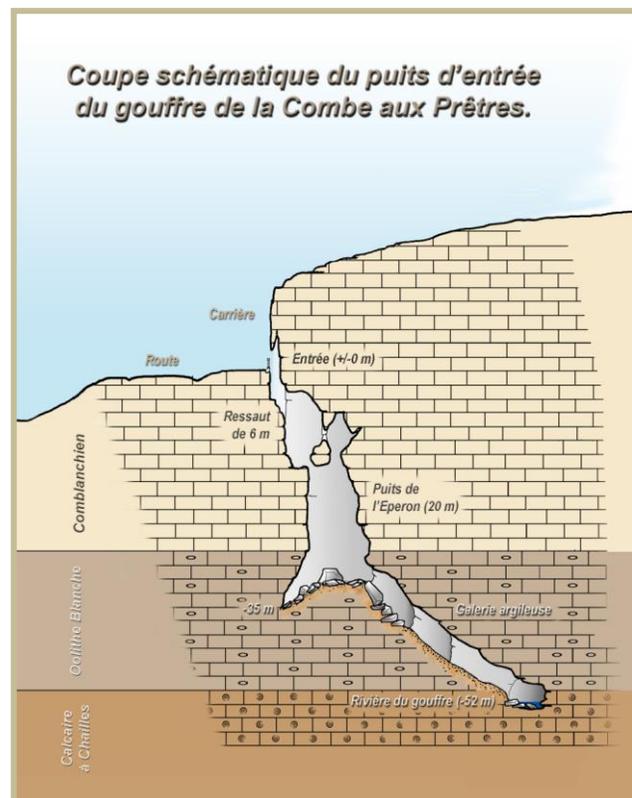


Figure 3 : Coupe schématique

nous détaille la formation de ces étonnantes chailles, issues de la cristallisation de la silice des structures des échinodermes, dans un contexte acide de décomposition organique.



Figure 4 :Observation studieuse de Chailles

Nous en profitons également pour observer les fantômes issus de la décomposition du calcaire, laissant la place à des poches remplies d'argiles, qui se vident lorsqu'elles sont érodées. De nombreux exemples sont visibles à la Combe aux Prêtres, et laissent un terrain particulièrement favorable aux discussions de spécialistes !

La fin du parcours dans la 1^{ère} rivière Ben permet également d'observer les radioles d'oursins et des restes de coraux.

1.2 Histoire de la formation des reliefs souterrains, observation des remplissages et lecture initiatique des parois

Par endroits, il est possible de repérer d'anciennes failles, mises en évidence par le décalage des couches géologiques (les calcaires à chailles se retrouvent au même niveau que les calcaires oolithiques), et la zone broyée issue du mouvement de la faille. Elle a également permis le développement de cheminées dans le réseau. Vincent nous expose le déplacement des failles grâce aux Lego® de ses enfants.

Heureusement, cette année, le niveau de l'eau a permis de passer le lac de glaise, et d'aller entre la galerie des gours et le pont de singe, repérer la faille qui met en contact le calcaire oolithique et le calcaire a chailles.



Figure 5 : Démonstration des déplacements de failles à l'aide de Lego®

Les coups de gouge sont des témoins importants pour la détermination du sens du courant du paléokarst, la partie la plus creuse représentant l'arrivée du courant. L'utilisation du diagramme de Curl, établi de manière empirique, permet, à partir de la taille du coup de gouge, d'estimer la vitesse du courant l'ayant creusé. Des mesures sont effectuées pour estimer de cette manière la vitesse du courant.

L'abaque de Hjulstrom (elle aussi empirique) est utilisée par ailleurs pour déterminer la vitesse du courant ayant permis la sédimentation des galets, dans une branche du réseau entre la sortie de la chatière et le départ du réseau nord.

Les abaques de Curl et Hjulstrom sont données en annexe (cf. § 4.1.3)



Figure 6 : Utilisation du diagramme de Hjulstrom

1.3 Chronologie relative

La chronologie relative permet d'organiser de manière chronologique des événements sans (pouvoir) indiquer de date de chaque événement. Le lieu choisi pour ce type d'analyse est la Salle du Balcon (Figure 7) qui permet de confronter et d'organiser plusieurs événements :

- Creusement en plafond,
- Concrétionnement important,
- Chute de blocs du plafond,
- Fistuleuses.

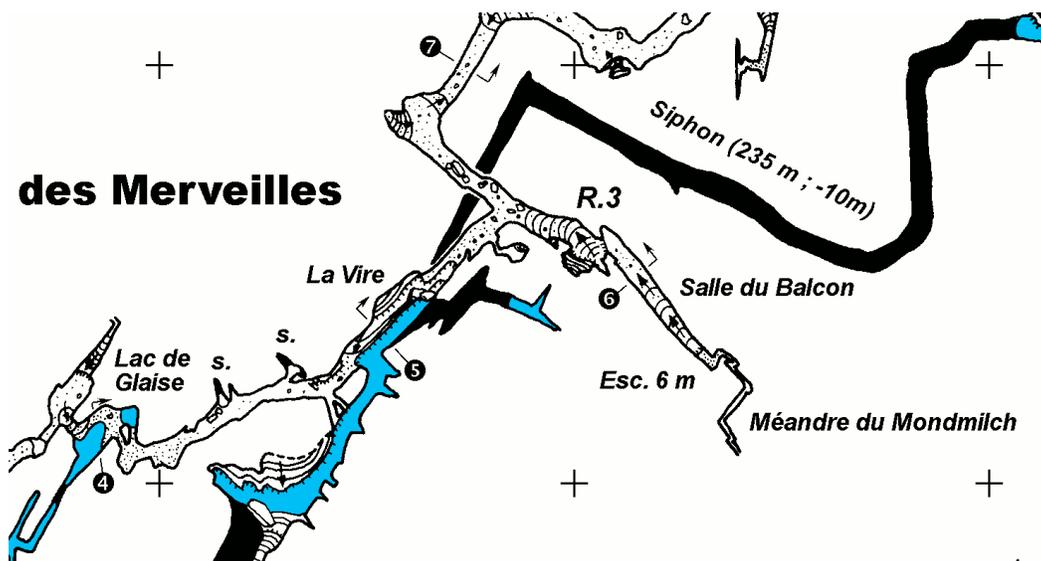


Figure 7 : localisation de la Salle du Balcon

1.4 Vocabulaire

Quelques termes ont été utilisés, et ont nécessité quelques explications.

Argiles : les termes d'argiles désignent plusieurs choses selon de domaine d'utilisation : minéralogie, sédimentologie, géologie, ou ... cosmétique !

- Les argiles au sens minéralogique sont des feuillets silicatés renfermant de nombreux cations échangeables en fonction des conditions de milieu. Cette une famille relativement complexe, comprenant de nombreuses variations, selon les éléments contenus dans les feuillets.
- Les argiles au sens de la sédimentologie correspondent à une gamme granulométrique ($<2\mu\text{m}$, soit moins de deux millièmes de millimètres), indépendamment de la nature minéralogique.
- Au sens géologique l'argile désigne une roche plutôt plastique, généralement très peu perméable, majoritairement composée de minéraux argileux.

Failles, diaclases : Ces deux termes désignent tous deux des discontinuités affectant la roche, résultant de mouvements tectoniques directs ou indirects. Ces deux termes désignent une rupture de la continuité de la roche : la diaclase est une simple fracture, sans déplacement des deux compartiments, alors que la faille comporte un mouvement relatif entre les deux compartiments, pouvant atteindre plusieurs mètres. La diaclase tire le plus souvent son origine de rééquilibrages (décompaction, réajustements de forces, ...) après des mouvements plus importants (failles, ...).

2 ELEMENTS D'HYDROGEOLOGIE

2.1 Mesures de débit

Comme pour la session précédente nous avons utilisé la fluorescéine, non pas pour effectuer des traçages visuels depuis le réseau nord, mais pour effectuer des jaugeages par traceur chimique, en couplage avec le sel.



Figure 8 : Mise en place des capteurs lors

2.1.1 Par le sel

Le principe : une solution concentrée en sel est injectée dans la rivière. On détecte son passage en aval en mesurant la conductivité : c'est la mesure de la concentration en sels dissous, en ions, en micro Siemens par centimètre, noté $\mu\text{S}/\text{cm}$). La courbe de restitution enregistrée en aval, à une distance permettant d'avoir un bon mélange, permet de déterminer le débit par le calcul. Dans notre cas la conductivité est mesurée à environ 19 m du lieu de déversement du sel.

La quantité à injecter est de l'ordre de 1 kg pour 100 l/s. Compte tenu du débit évalué à moins de 500 l/s, nous décidons d'injecter tout le sel.

1. La conductivité de base (« bruit de fond ») est d'environ 600 $\mu\text{S}/\text{cm}$. A titre de comparaison, dans le réseau Nord, on a constaté une conductivité de 530 $\mu\text{S}/\text{cm}$ dans le petit actif, et 580 $\mu\text{S}/\text{cm}$ dans la marmite.

2. Une courbe d'étalonnage du conductimètre est établie avec plusieurs étalons à différentes concentrations de sel préparés en laboratoire.

3. La mise en pratique en cavité se traduit par un unique test, avec 29 kg de sel dilués dans 3 kits (le dernier kg de sel est resté malencontreusement caché dans le coffre de ma voiture !).

4. La conductivité a augmenté jusqu'à environ 1200 $\mu\text{S}/\text{cm}$; elle a été mesurée en deux endroits et de deux façons :

- le long de la rive gauche, par lecture d'un conductimètre et saisie manuelle de la valeur toutes les 5 secondes à compter du déversement du sel.

- le long de la rive droite, dans la ligne de courant principale, par un enregistreur automatique toutes les secondes.

5. L'analyse des résultats avec explicitation du modèle s'effectue en salle : passage de la conductivité à la concentration en sel, et grâce au volume écoulé et au temps de passage (durée du test), le débit est savamment calculé !

Ainsi, le débit est défini grâce au tableur Excel par étapes successives :

1. Conductivité mesurée en $\mu\text{S}/\text{cm}$
2. Détermination de la concentration en NaCl = $0,48 \times \text{conductivité}$
3. Détermination de la concentration en NaCl sans bruit de fond = on soustrait la concentration de base au calcul du 2.
4. Détermination du débit = volume écoulé total/temps de passage (=durée du test)
avec volume écoulé = masse de sel (en g)/concentration moyenne (en g/l)

On obtient un débit d'environ $2,9 \text{ m}^3/\text{s}$.

Par comparaison, le débit constaté sur le site de la station hydrométrique de Val Suzon le 15 novembre 2014 est $5 \text{ m}^3/\text{s}$ (cf. Figure 1).

2.1.2 Par la méthode de jaugeage aux flotteurs

Plutôt que des bouchons de liège, nous optons pour environ 30 flacons en plastique (avec leur bouchon et partiellement remplis) en guise de flotteurs, ce qui permet qu'ils soient partiellement immergés et donc mieux entraînés par le courant. Compte tenu des turbulences, certains bouchons se retrouvent bloqués dans les anfractuosités des parois. Le débit est calculé beaucoup plus simplement, grâce à une formule établie de manière empirique tenant compte de la valeur moyenne de la section et de la vitesse de la bouteille.

La formule est la suivante :

$$Q=0,4 \times S \times V$$

Avec :

- Q, débit en m³/s
- 0,4 : constante calculée de manière empirique
- S, valeur moyenne de la section en m², obtenue à partir des relevés topographiques des sections
- V, vitesse en m/s

On obtient un débit d'environ 2,6 m³/s.

2.1.3 Par la méthode de remplissage d'un kit

Facile, on connaît le volume d'un kit (environ 25 l), on connaît le temps de remplissage, soit environ 6 à 7 secondes (moyenne de 2 ou 3 mesures), alors on connaît le débit approximatif du petit actif du réseau nord : environ 4 l/s



Figure 9 : Remplissage d'un kit dans le petit actif du réseau Nord pour mesure de débit

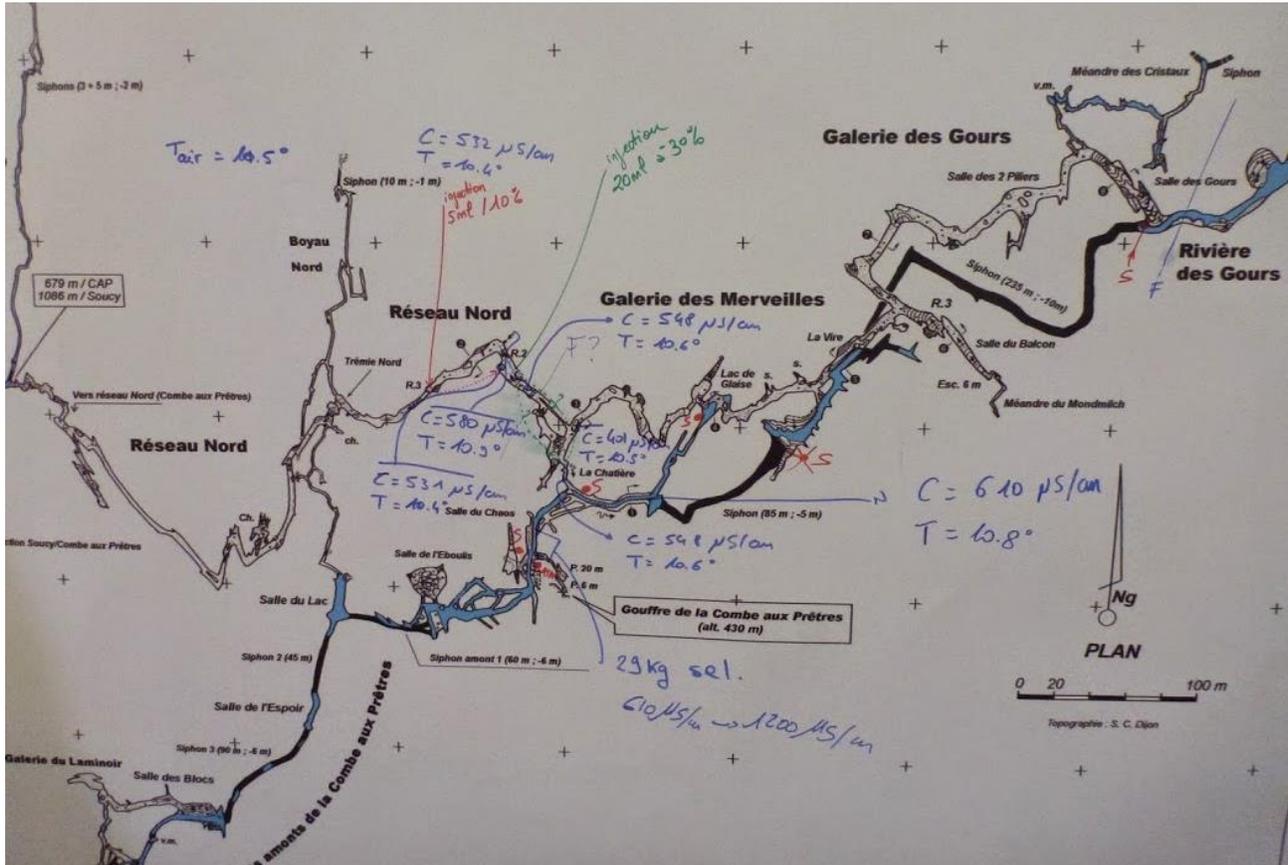


Figure 10 : Récapitulatif des tests et mesures effectués dans la cavité

2.2 Démonstration du fonctionnement des sondes de mesure de hauteurs d'eau

Des sondes Reefnet Sensus ont été installées depuis juin 2013 à divers endroits de la cavité afin de mesurer la température de l'eau, la pression atmosphérique et la pression de l'eau (en millibars), que l'on peut convertir en hauteurs d'eau. Les mesures ont eu lieu toutes les 10 minutes, puis maintenant toutes les 2 heures. Les sondes installées dans des tubes pour supprimer l'effet de la pression du courant. Tout déplacement intempestif provoque un écart dans la série de données qu'il faudra corriger.

Les sondes sont relevées et les données déstockées grâce à une tablette Ruggedbook étanche et supportant d'être malmenée (un peu) sous terre. L'analyse des données et du résultat des tests montre une montée générale du niveau de l'eau dans la cavité depuis les fortes précipitations des jours précédents. Ces niveaux restent toutefois bien inférieurs à ceux enregistrés début novembre, pour lesquels il n'aurait probablement pas été possible d'accéder au réseau.

3 EVALUATION, SUITE ... ?

Comme l'année dernière, la passion des encadrants a été soulignée, et les apports ont été qualifiés d'enrichissants, grâce à un encadrement technique fort de son expérience. Le fait d'avoir pris son temps pour observer, poser des questions... a été apprécié. L'intégration du stage dans le cadre d'une étude de plus grande ampleur lui donne tout son intérêt. La cavité propose plein d'aspects divers pour « jouer ».



Figure 11 : L'équipe à la résurgence du Creux Bleu, le dimanche, avant le départ

En attendant, quelques repères pour veiller à votre sécurité avant d'accéder au réseau :

- La station de Val Suzon, bien qu'étant sur un bassin versant différent, présente un comportement assez proche de ce que l'on peut observer dans le réseau. <http://www.rdbmrc.com/hydroreel2/station.php?codestation=587>
- Si le débit dépasse le module interannuel sur la station de Val Suzon (environ $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$), les initiations sont déconseillées dans le réseau.
- A partir de $3,5 \text{ m}^3/\text{s}$ environ à Val Suzon, le passage de la chatière peut être possible, mais l'eau arrive jusqu'aux aisselles entre la salle des gours et le pont de singe, et à la taille au pont de singe (à la base des puits la dalle triangulaire est presque totalement immergée, à l'entrée de la chatière, l'eau commence à passer au-dessus de la dalle en travers de la rivière) : à réserver aux personnes expérimentées.

Consultez la météo avant de vous engager via meteofrance ou meteociel qui donnent les précipitations trihoraires sur Dijon : **Erreur ! Référence de lien hypertexte non valide.** <http://www.meteociel.fr/previsions/6180/dijon.htm>

Et l'année prochaine ? On recommence ! Le stage devrait être organisé par le CDS93 sur le même modèle, dans la même cavité.

Nous remercions toutes les associations et spéléos pour leurs contributions au bon déroulement de ce stage, que ce soit par leurs accords ou autorisations, leur soutien financier et logistique, et les moyens humains investis dans ce projet. Nous remercions également l'Andra pour son soutien financier et matériel.

Texte : Pascale Vivancos

Photos : Vincent Schneider et Pascale Vivancos

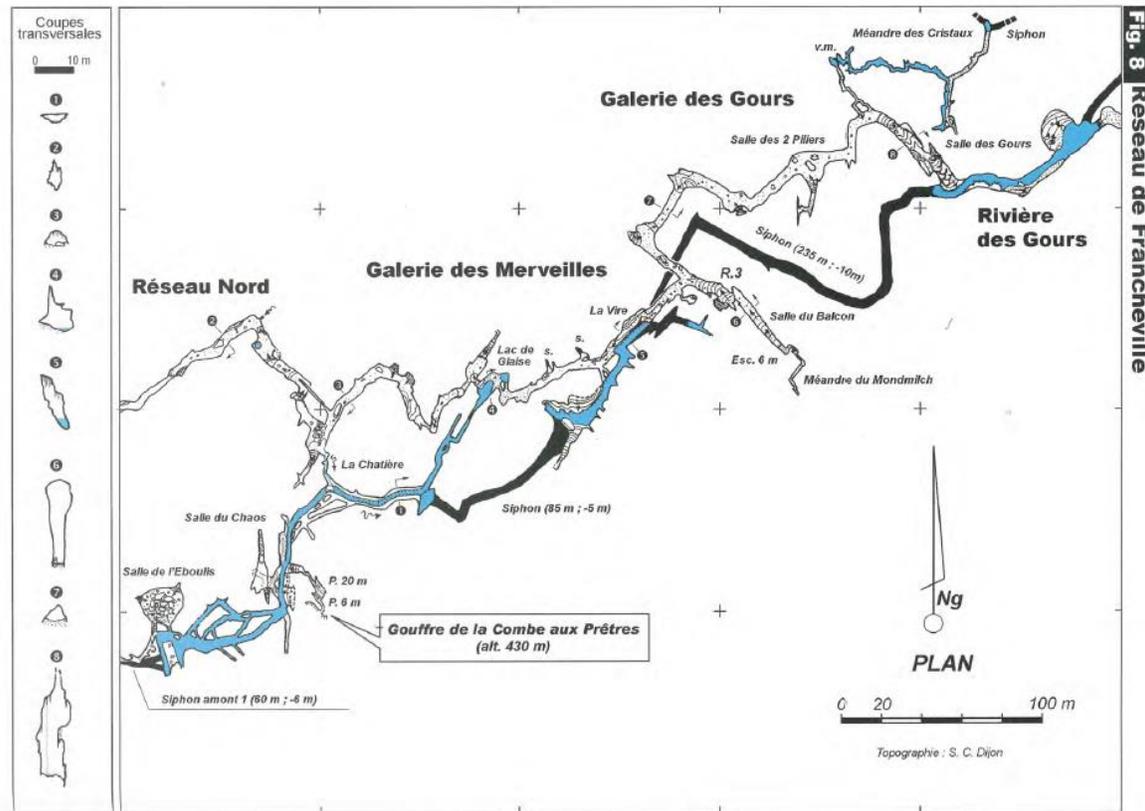


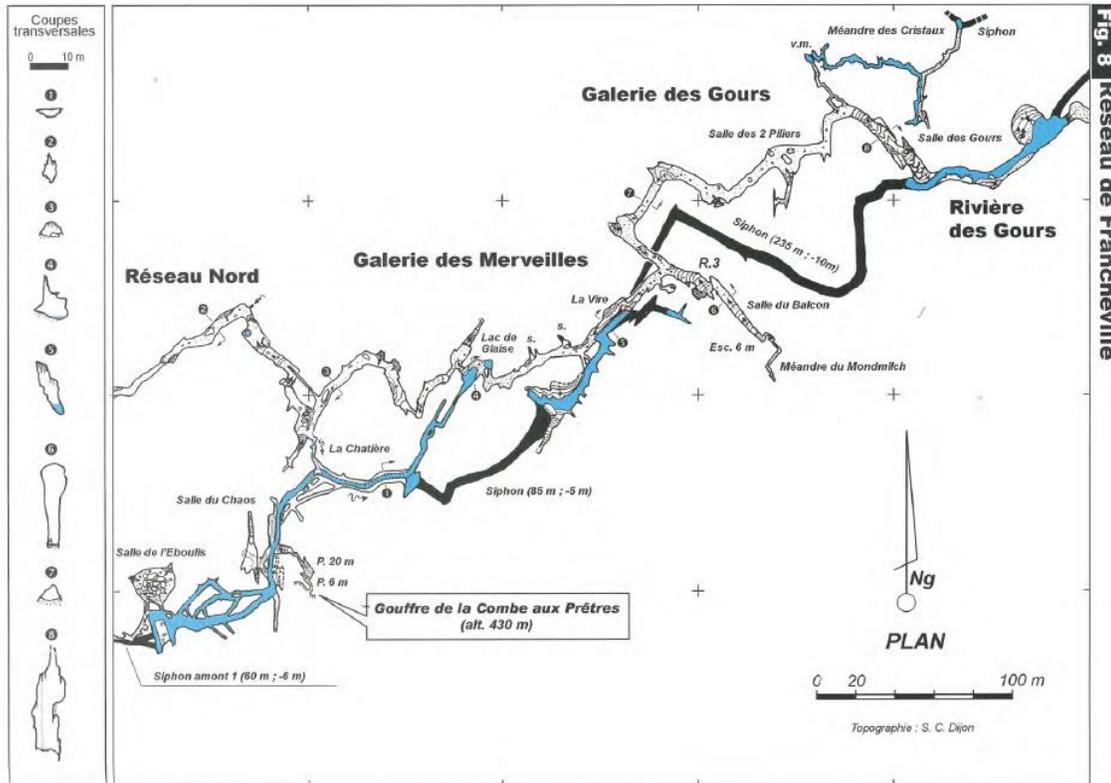
Fédération Française
de Spéléologie

4 ANNEXES

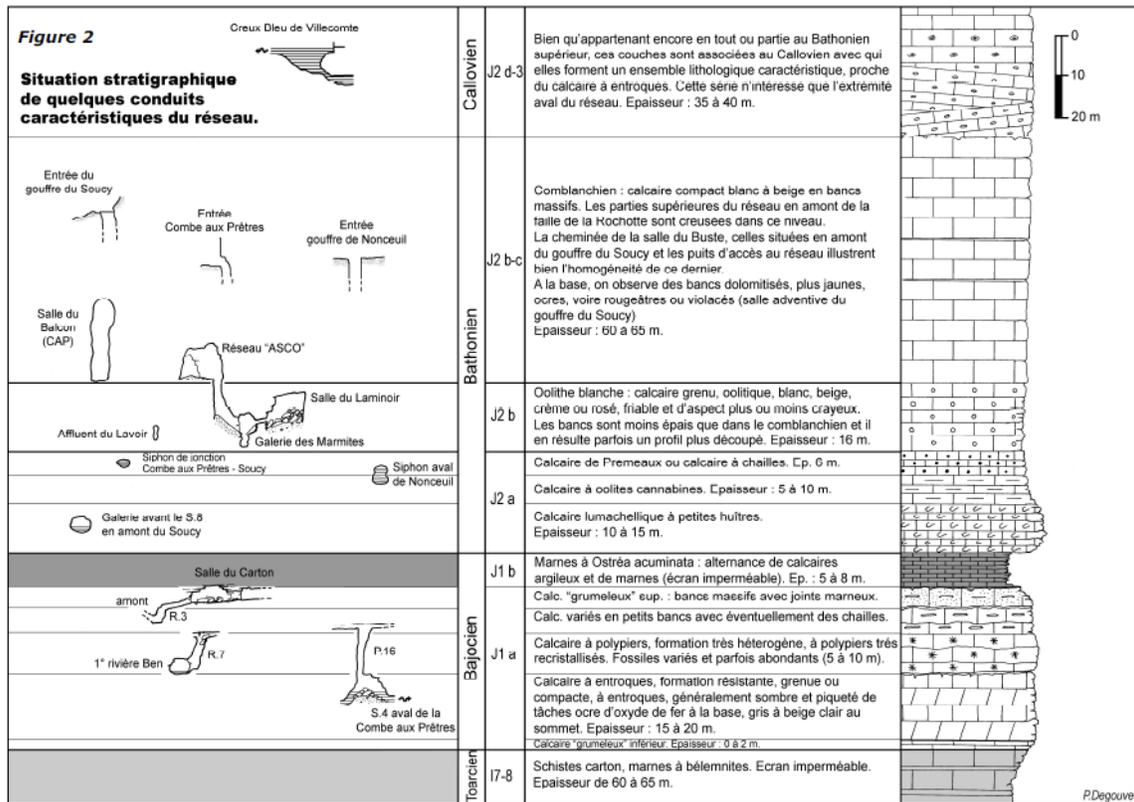
4.1 Extraits du document transmis aux stagiaires pendant le stage

4.1.1 Topographie de la Combe aux Prêtres



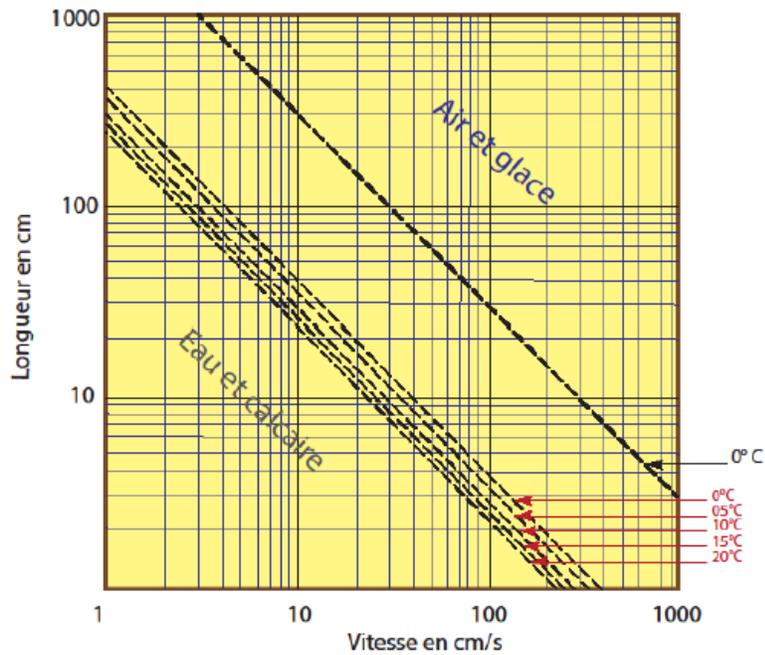


4.1.2 Les couches géologiques du massif du réseau de Francheville

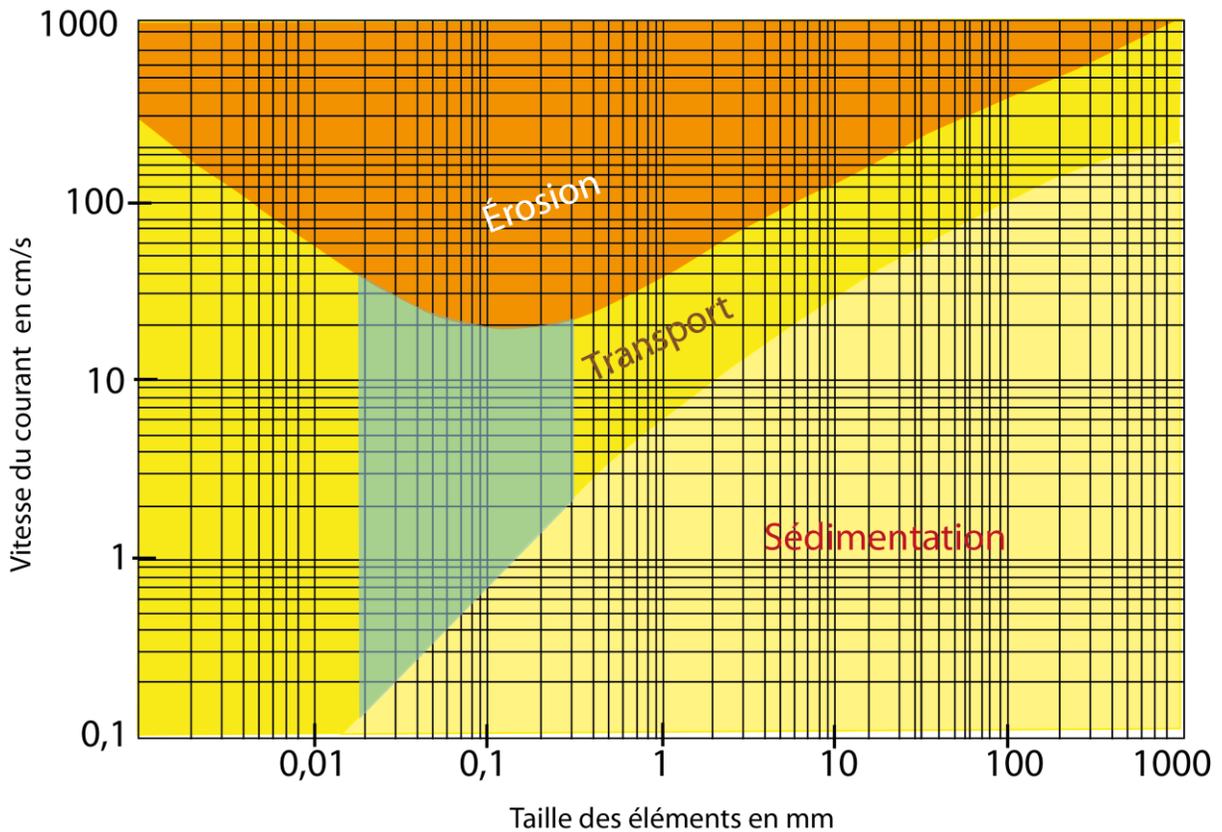


4.1.3 Abaques de Curl et Hjulstrom

Abaque de Curl



Abaque de Hjulstrom



CUPULES D'EROSION - VITESSES - DEBITS

Vitesse du courant = formule de Curl

Déplacement des particules = diagramme de Hjulstrom



Section de galerie en m2 =

1	2	3	4	5	10	15	20	
---	---	---	---	---	----	----	----	--

Longueur Moyenne cupules cm	Vitesse du courant		Particules > 0 mm		Débit m³/s									
	cm/s	m/s	0.1	1	10	Section								
						1 m²	2 m²	3 m²	4 m²	5 m²	10 m²	15 m²	20 m²	? m²
1	250	2.50	Erosion	Erosion	E	2.5	5.0	7.5	10.0	12.5	25.0	37.5	50.0	
2	125	1.25				1.3	2.5	3.8	5.0	6.3	12.5	18.8	25.0	
3	83	0.83				0.8	1.7	2.5	3.3	4.2	8.3	12.5	16.7	
4	63	0.63				0.6	1.3	1.9	2.5	3.1	6.3	9.4	12.5	
5	50	0.50				0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	5.0	7.5	10.0	
6	42	0.42				0.4	0.8	1.3	1.7	2.1	4.2	6.3	8.3	
7	36	0.36				0.4	0.7	1.1	1.4	1.8	3.6	5.4	7.1	
8	31	0.31				0.3	0.6	0.9	1.3	1.6	3.1	4.7	6.3	
9	28	0.28				0.3	0.6	0.8	1.1	1.4	2.8	4.2	5.6	
10	25	0.25				0.3	0.5	0.8	1.0	1.3	2.5	3.8	5.0	
11	23	0.23		0.2	0.5	0.7	0.9	1.1	2.3	3.4	4.5			
12	21	0.21		0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	2.1	3.1	4.2			
13	19	0.19		0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.9	2.9	3.8			
14	18	0.18		0.2	0.4	0.5	0.7	0.9	1.8	2.7	3.6			
15	17	0.17		0.2	0.3	0.5	0.7	0.8	1.7	2.5	3.3			
16	16	0.16		0.2	0.3	0.5	0.6	0.8	1.6	2.3	3.1			
17	15	0.15		0.1	0.3	0.4	0.6	0.7	1.5	2.2	2.9			
18	14	0.14		0.1	0.3	0.4	0.6	0.7	1.4	2.1	2.8			
19	13	0.13		0.1	0.3	0.4	0.5	0.7	1.3	2.0	2.6			
20	13	0.13		0.1	0.3	0.4	0.5	0.6	1.3	1.9	2.5			
21	12	0.12	0.1	0.2	0.4	0.5	0.6	1.2	1.8	2.4				
22	11	0.11	0.1	0.2	0.3	0.5	0.6	1.1	1.7	2.3				
23	11	0.11	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	1.1	1.6	2.2				
24	10	0.10	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	1.0	1.6	2.1				
25	10	0.10	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	1.0	1.5	2.0				
30	8	0.08	0.1	0.2	0.3	0.3	0.4	0.8	1.3	1.7				
35	7	0.07	0.1	0.1	0.2	0.3	0.4	0.7	1.1	1.4				
40	6	0.06	0.1	0.1	0.2	0.3	0.3	0.6	0.9	1.3				
45	6	0.06	0.1	0.1	0.2	0.2	0.3	0.6	0.8	1.1				
50	5	0.05	0.1	0.1	0.2	0.2	0.3	0.5	0.8	1.0				
55	5	0.05	0.0	0.1	0.1	0.2	0.2	0.5	0.7	0.9				
60	4	0.04	0.0	0.1	0.1	0.2	0.2	0.4	0.6	0.8				
65	4	0.04	0.0	0.1	0.1	0.2	0.2	0.4	0.6	0.8				
70	4	0.04	0.0	0.1	0.1	0.1	0.2	0.4	0.5	0.7				
75	3	0.03	0.0	0.1	0.1	0.1	0.2	0.3	0.5	0.7				
80	3	0.03	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.3	0.5	0.6			

4.1.4 Mesure du débit par le sel

4 - Mesure à l'aval

On utilise la conductivité de l'eau, c'est-à-dire son aptitude à transmettre l'électricité. La conductivité de l'eau croît avec la quantité d'ions en solution (carbonates, sel...), l'eau pure étant pratiquement isolante. On la mesure avec un conductimètre, l'unité étant le micro-Siemens par centimètre ($\mu S / cm$).

À un pas de temps régulier variable selon les cas mais suffisamment resserré pour tracer la courbe, on note les valeurs de la conductivité (**Cond** en $\mu S / cm$). L'arrivée du sel dissout est marquée par une montée brutale de la conductivité, la fin du passage correspondant au retour définitif à la valeur initiale. Si le conductimètre n'effectue pas automatiquement les corrections de température, on prendra soin de noter la température de l'eau (*infra*). Ces mesures permettent d'établir la courbe de concentration correspondant au passage du nuage de sel (fig. 6).

5 - Calcul des paramètres nécessaires au dosage chimique

De la courbe de concentration, on en déduit le débit (**Q** en l/s), qui correspond au rapport de la masse (**M** en g) sur le produit du temps (**t** en s) par la concentration moyenne supplémentaire liée à l'ajout du sel (\overline{Conc} en mg/l).

$$(7) Q (l/s) = M \cdot 1000 / (t \cdot \overline{Conc})$$

Les paramètres **M** et **t** ne posent pas de problème d'acquisition, en revanche, l'obtention de la concentration moyenne liée à l'ajout de sel nécessite une série de calculs.

Rappelons que le conductimètre mesure la conductivité de l'eau, qui varie dans le temps et qui intègre non seulement la conductivité supplémentaire liée à l'ajout de sel mais aussi la conductivité initiale de l'eau. Enfin il faut passer de la conductivité de l'eau aux concentrations en sel. Chaque étape est détaillée ci-dessous.

• Passage de la conductivité mesurée à la conductivité à 25°C

Comme la température influe sur la conductivité, on rapporte toujours la conductivité à une température de

référence conventionnelle (25 ° C), afin de pouvoir comparer les valeurs. La plupart des conductimètres actuels font automatiquement la compensation de température et affichent la conductivité à 25 ° C. Dans ce cas, passer directement au point suivant. Dans le cas contraire, la relation linéaire existant entre conductivité et température permet d'effectuer la compensation selon de la formule suivante :

$$(8) \text{Cond}_{25} (\mu S / cm) = \text{Cond}_t \cdot 1,161 / (0,023t + 0,586)$$

Avec : **Cond₂₅** = conductivité à 25° C recherchée ;

Cond_t = conductivité mesurée sur le terrain ;

t = température de l'eau sur le terrain [formule établie d'après HÖFFMANN & PELLEGRIN 1996].

• Passage de la conductivité mesurée à la concentration en charge équivalente de sel dissout

L'eau dans la nature contient une grande variété d'ions en solution qui déterminent sa conductivité. Dans le karst, ce sont essentiellement les ions provenant du calcaire mis en solution. On va considérer que la totalité de la conductivité mesurée provient du sel et convertir cette conductivité en charge équivalente de sel dissout en utilisant la relation entre la concentration en sel (**Conc** en mg/l) et la conductivité (**Cond** en $\mu S / cm$).

$$(9) \text{Conc} (mg / l) = 0,48 \cdot \text{Cond}$$

• Calcul de la concentration liée au sel

Pour le calcul du débit, on ne prend bien entendu en compte que la conductivité liée à l'ajout de sel. Il faut donc pour chaque mesure ôter à la concentration totale la part liée à la conductivité "naturelle". On calcule la valeur de la concentration en charge équivalente de sel pour la conductivité mesurée initialement selon la formule ci-dessus (9). Ensuite, il suffit d'ôter cette valeur à chaque mesure.

• **Calcul de la concentration moyenne**

La dernière étape consiste à calculer la concentration moyenne en sel lors du passage du nuage, correspondant à la somme des concentrations en sel mesurées, divisée par le nombre de mesures.

$$(10) \overline{\text{Conc}} \text{ (mg / l)} = \frac{\sum_{i=1}^n \text{Conc}_i}{n}$$

Une fois cette valeur obtenue, on peut finalement calculer le débit, à l'aide de la formule (7).

6 – Exemple d'un calcul de jaugeage chimique

• **Colonne (1)** - Moment des prélèvements à pas de temps régulier après l'injection à $t = 0$. Le calcul des valeurs s'effectue automatiquement par itération à partir de la valeur de pas de temps, renseignée à la ligne (6) de la figure 5.

• **Colonne (2)** - Conductivités mesurées sur le terrain. Les premières valeurs ($850 \mu\text{S/cm}$) correspondent à la conductivité "naturelle" avant l'arrivée du nuage de sel. La dernière valeur correspond au retour aux conditions initiales après le passage du nuage (voir lignes 10 à 12, fig. 5).

• **Colonne (3)** - Dans cette colonne, une formule permet d'afficher la valeur du temps, si la conductivité est différente de la conductivité initiale. Elle sert à déterminer le début et la fin du passage du nuage.

• **Colonne (4)** - Valeurs de la concentration totale en équivalent sel, obtenue par la formule (8).

• **Colonne (5)** - Valeurs de la concentration en sel, obtenue par soustraction de la concentration initiale à chaque valeur de concentration totale mesurée (colonne 4). La concentration initiale (ligne 9, fig. 5) est issue de calcul à partir de la conductivité initiale (ligne 8) en appliquant la formule (8). Ces valeurs permettent de construire la courbe de concentration en sel (fig. 6).

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
N°	Cond. mesurée (en $\mu\text{S/cm}$)	t1 t2	Conc. tot. équiv. NaCl (en mg/l)	Conc. liée NaCl (en mg/l)
0	850		413	0
0,5	850		413	0
1	850		413	0
1,5	870	1,5	423	10
2	1070	2	521	108
2,5	1170	2,5	571	158
3	1270	3	620	207
3,5	1260	3,5	615	202
4	1230	4	600	187
4,5	1190	4,5	580	168
5	1150	5	561	148
5,5	1120	5,5	546	133
6	1090	6	531	118
6,5	1060	6,5	516	103
7	1030	7	501	89
7,5	1010	7,5	492	79
8	995	8	484	71
8,5	980	8,5	477	64
9	960	9	467	54
9,5	950	9,5	462	49
10	940	10	457	44
10,5	930	10,5	452	39
11	920	11	447	34
11,5	915	11,5	445	32
12	910	12	442	30
12,5	905	12,5	440	27
13	900	13	437	25
13,5	895	13,5	435	22
14	890	14	433	20
14,5	886	14,5	431	18
15	882,5	15	429	16
15,5	879	15,5	427	14
16	875	16	425	12
16,5	872,5	16,5	424	11
17	870	17	423	10
17,5	867,5	17,5	422	9
18	865	18	420	7
18,5	863,5	18,5	420	7
19	862,5	19	419	6
19,5	861,2	19,5	418	6
20	860	20	418	5
20,5	857,5	20,5	417	4
21	855	21	415	2
21,5	852,5	21,5	414	1
22	850		413	0

Figure 4 – Exemple de feuille de suite de conductivité lors d'un jaugeage chimique (ruisseau de la Foux, Tourettes, Var – mars 2001)

Ligne	Paramètres calculés	Valeur
(6)	Pas de temps échantillonnage (en mn décimales)	0,5
(7)	M (masse NaCl injectée en g)	750
(8)	Conductivité initiale à 25° (en $\mu\text{S}/\text{cm}$)	350
(9)	Concentration initiale en solutés (en mg/l équiv. NaCl)	413
(10)	t1 (début restitution en mn)	1,0
(11)	t2 (fin restitution en mn)	12,0
(12)	t (durée restitution en mn)	21
(13)	Conc. moy. (en $\mu\text{S}/\text{cm}$)	56
(14)	Q (en l/s)	11

Figure 5 – Calcul des paramètres d'un jaugeage chimique (ruisseau de la Foux, Tourettes, Var – mars 2001)

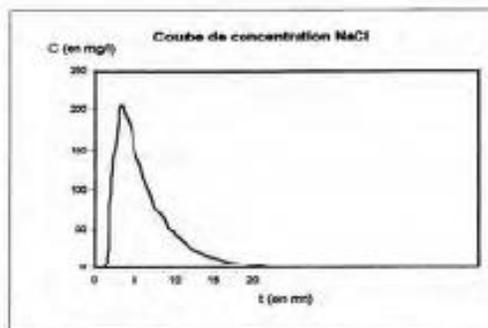


Figure 6 – Courbe de concentration obtenue lors du passage du nuage de sel (ruisseau de la Foux, Tourettes, Var – mars 2001)

- **Ligne 6** – Pas de temps d'échantillonnage, exprimé en minutes, ou minutes décimales pour les pas de temps plus courts (0,5 mn = 30 s).
- **Ligne 7** – Masse en g de sel injectée.
- **Ligne 8** – Conductivité initiale à 25° C.
- **Ligne 9** – Concentration initiale exprimée en équivalent NaCl, obtenue avec la formule (8) et la valeur de la ligne (8).
- **Ligne 10** – Temps du début de la restitution. S'obtient en recherchant le minimum de la colonne (3).
- **Ligne 11** – Temps de la fin de la restitution. S'obtient en recherchant le maximum de la colonne (3).
- **Ligne 12** – Durée de la restitution, obtenue à partir des valeurs des deux lignes précédentes.
- **Ligne 13** – Concentration moyenne, obtenue en sommant les concentrations (colonne 5) et en divisant par le temps de restitution (valeur de la ligne 12), selon la formule (9).
- **Ligne 14** – Calcul du débit, avec la formule (5).

MÉTHODE DE JAUGEAGE AU BOUCHON

PRINCIPE :

La mesure du débit d'une exsurgence ou d'un cours d'eau peut se faire à partir de la section d'une lame d'eau et de la vitesse de déplacement de celle-ci.

La formule qui permet de calculer le débit Q en m^3/s est la suivante :

$$Q \text{ m}^3/\text{s} = 0,4 \times S \text{ m}^2 \times V \text{ m/s}$$

MATÉRIEL NÉCESSAIRE :

- Une chevillière triple décamètre
- Six bouchons de liège
- Un mètre pliant (rigide)
- Un carnet de relevés
- Une calculatrice

MODE OPÉRATOIRE :

- Choisir une portion de rivière où le lit est le plus régulier possible, sans changement de section conséquent et pas trop encombré d'obstacles.
 - Mesurer en plusieurs points la largeur et la profondeur de la lame d'eau afin d'en calculer une valeur moyenne.
 - Déterminer une longueur de référence et à l'aide de bouchons de liège, procéder à la mesure du temps nécessaire pour parcourir celle-ci.
- Cinq à six mesures sont nécessaires pour dégager une moyenne significative.

Calcul de la section :

- A partir des valeurs moyennes de largeur et de profondeur calculer la section assimilée à un rectangle, de notre lame d'eau.
- Le résultat doit être exprimé en m^2 .

Calcul de la vitesse :

- Calculer la valeur moyenne des temps de déplacement des bouchons sur la longueur de référence.
- Diviser la distance exprimée en mètres par le temps en seconde.

Calcul du débit Q :

- Appliquer le plus bêtement possible la formule :

$$Q \text{ m}^3/\text{s} = 0,4 \times S \text{ m}^2 \times V \text{ m/s}$$

4.2 Programme du stage : les grandes lignes

Vendredi 14 novembre 2014 :

- arrivée des premiers cadres et de la plupart des stagiaires
- équipement de la cavité par une équipe composée de l'un des cadres « techniques » et de deux stagiaires

Samedi 15 novembre 2014 :

- 7h30 : petit déjeuner
- 9h : arrivée de Didier Cailhol
- 9h30 : départ pour la cavité & introduction
- 10h30 : entrée dans la cavité
- 17h : sortie de la cavité et retour au gîte, quelques présentations théoriques
- 21h : dîner

Dimanche 16 novembre 2014 :

- 8h : petit déjeuner
- 9h : en salle, analyse des résultats (sondes, mesure de débit au sel), questions...
- 13h : déjeuner et débriefing, rangement
- 14h : nettoyage du matériel
- 16h : départ

4.3 Participants

Stagiaires :

- Alexandre Zappelli, des Bouches du Rhône
- Nathalie Loza, de l'Essonne
- Nadine Düger, de Seine Saint Denis
- Christian Düger, de Seine Saint Denis
- Mathieu Gillot, de l'Aisne
- Frédéric Bonizec, de Seine Saint Denis
- Anne-Hélène Monsellato, de l'Aube
- Alexandre Leroy, de l'Essonne

Cadres :

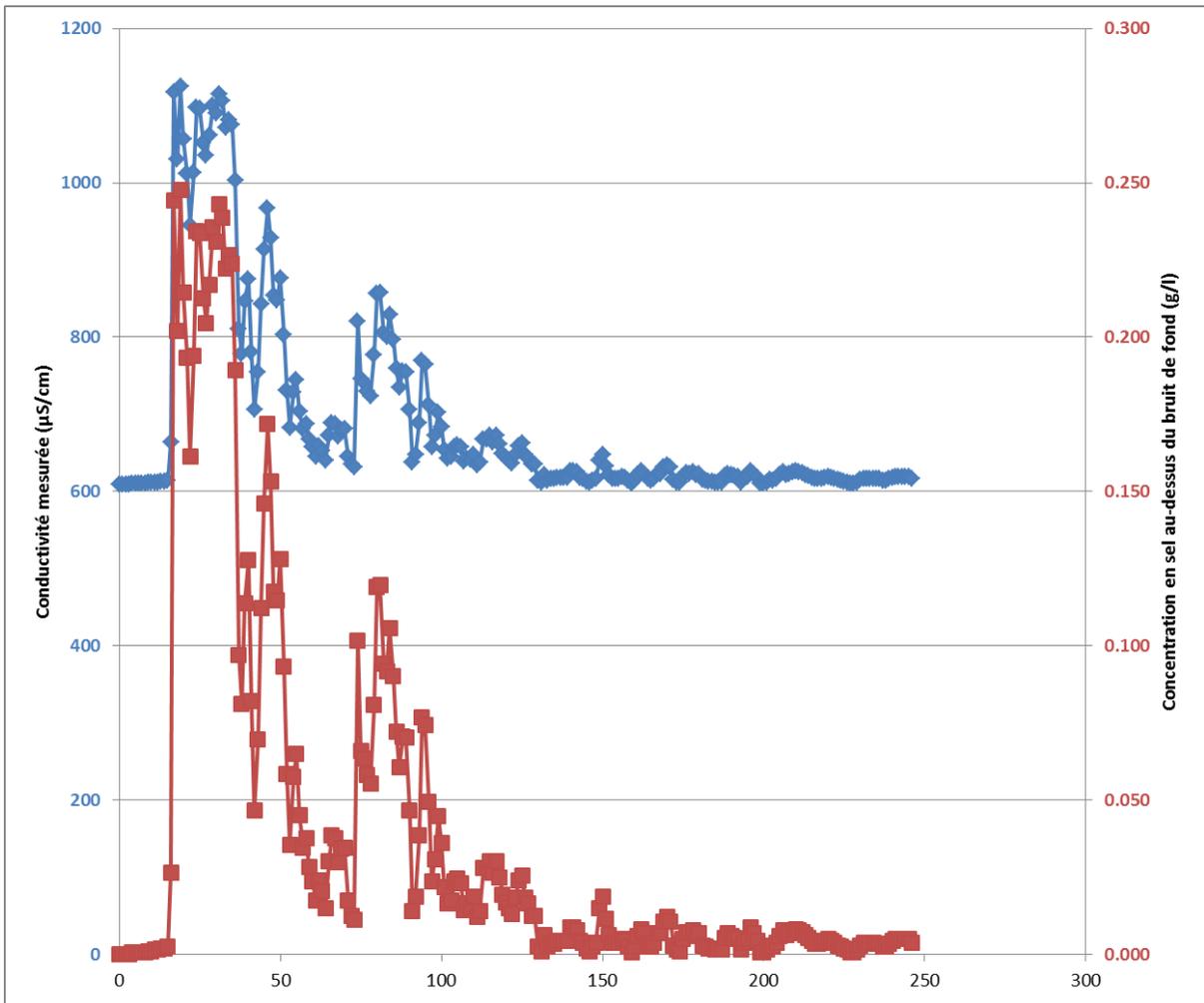
- Vincent Schneider - Spéléo Club Rosnéen et Spéléo Club Aubeois, initiateur spéléo
- Didier Cailhol - Club Spéléus, géomorphologue, responsable de la commission environnement de la FFS, moniteur spéléo
- Fabien Fécherouille - Spéléo Club Rosnéen, instructeur spéléo, responsable de la commission secours du CoSIF
- Pascale Vivancos - SCMNF, initiateur spéléo, responsable commission scientifique du CoSIF

4.4 Dépouillement du jaugeage au sel

Date :	15/11/2014				Pour mémoire - saturation = 360 g/l NaCl à 20°C
Lieu :	La Combe aux Prêtes, bas des puits				
Description :	Debit entre sections bas des puits et 19m en aval				
Distance :	15.5 (m) entre inbjection et mesure				
App. Mesure :	conductimètre GLF100				
Etalonnage :	0.00048 g/l / μ S/cm (Conc NaCl / Conducti)			Débit estimé	3.20941765
Pas mesure :	1 s				0.878665689

Type	Volume (l)	Temps	Conductivité (μ S/cm)	masse sel (g)	Commentaire	Conc NaCl (g/l)	Temps passage (s)
Solution mère	75	0	saturation	28000		373.33	244
Bruit de fond =			609	0.292			

Type	Temps	Conductivité (μ S/cm)	Conc NaCl (g/l)	Cond-BF (g/l)	Conc moyenne - BF (g/l)	V écoulé (l)	Débit (m3/s)
Rivière	0	609		0.292			
Rivière	1	609		0.292			
Rivière	2	609		0.292			
Rivière	3	609		0.292			
Rivière	4	610		0.293	0.000		
Rivière	5	610		0.293	0.000		
Rivière	6	610		0.293	0.000		
Rivière	7	610		0.293	0.000		
Rivière	8	610		0.293	0.000		
Rivière	9	611		0.293	0.001		
Rivière	10	611		0.293	0.001		
Rivière	11	612		0.294	0.001		
Rivière	12	612		0.294	0.001		
Rivière	13	613		0.294	0.002		
Rivière	14	613		0.294	0.002		
Rivière	15	614		0.295	0.002		
Rivière	16	664		0.319	0.026		
Rivière	17	1118		0.537	0.244		
Rivière	18	1030		0.494	0.202		
Rivière	19	1125		0.540	0.248		
Rivière	20	1056		0.507	0.215		
Rivière	21	1012		0.486	0.193		
Rivière	22	945		0.454	0.161		
Rivière	23	1013		0.486	0.194		
Rivière	24	1097		0.527	0.234		
Rivière	25	1096		0.526	0.234		
Rivière	26	1052		0.505	0.213		
Rivière	27	1035		0.497	0.204		
Rivière	28	1061		0.509	0.217		
Rivière	29	1100		0.528	0.236		
Rivière	30	1090		0.523	0.231		
Rivière	31	1115		0.535	0.243		
Rivière	32	1106		0.531	0.239		
Rivière	33	1072		0.515	0.222		
Rivière	34	1081		0.519	0.227		
Rivière	35	1075		0.516	0.224		
Rivière	36	1003		0.481	0.189		
Rivière	37	811		0.389	0.097		
Rivière	38	778		0.373	0.081		
Rivière	39	846		0.406	0.114		
Rivière	40	875		0.420	0.128		
Rivière	41	780		0.374	0.082		
Rivière	42	706		0.339	0.047		
Rivière	43	754		0.362	0.070		
Rivière	44	843		0.405	0.112		
Rivière	45	913		0.438	0.146		
Rivière	46	967		0.464	0.172		
Rivière	47	928		0.445	0.153		
Rivière	48	854		0.410	0.118		
Rivière	49	848		0.407	0.115		
Rivière	50	876		0.420	0.128		
Rivière	51	803		0.385	0.093		
Rivière	52	731		0.351	0.059		
Rivière	53	683		0.328	0.036		
Rivière	54	729		0.350	0.058		
Rivière	55	744		0.357	0.065		
Rivière	56	703		0.337	0.045		



4.5 Dépouillement du jaugeage aux flotteurs

Date	15/11/2014			
Heure	17:00 environ			
Localisation :	Base des puits, entre env. 4m aval station et 14.4m plus bas			
Distance	temps	section	Debit (m3/s)	Commentaire
14.4	18	3.52	2.48	
14.4	24	3.52	1.86	
14.4	24	3.52	1.86	
14.4	31	3.52	1.44	
14.4	22	3.52	2.03	
14.4	27	3.52	1.65	
14.4	26	3.52	1.72	
14.4	26	3.52	1.72	
14.4	25	3.52	1.78	
14.4	17	3.52	2.62	
14.4	24	3.52	1.86	
14.4	23	3.52	1.94	
14.4	26	3.52	1.72	
14.4	40	3.52	1.12	
14.4	33	3.52	1.35	
14.4	28	3.52	1.59	
14.4	19	3.52	2.35	
14.4	30	3.52	1.49	
14.4	21	3.52	2.12	
14.4	24	3.52	1.86	
14.4	24	3.52	1.86	
14.4	22	3.52	2.03	
14.4	21	3.52	2.12	
14.4	18	3.52	2.48	
14.4	25	3.52	1.78	
14.4	18	3.52	2.48	