



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

12-13 octobre 2013 - (Francheville - 21)



Baignade autorisée voire fortement conseillée, avec Vincent en chef d'orchestre

Préparation et encadrement : Vincent Schneider et Fabien Fécheroulle

Organisation : Pascale Vivancos

La Combe aux prêtres, cavité usuellement prisée par les « Parisiens », à l'esthétique intéressante, peu difficile, et parsemée de richesses géologiques et de surprises, constitue un terrain de jeux parfait pour ce stage organisé par le CoSIF en collaboration avec le CDS93. Quant à elle, l'Andra nous a fourni des échelles géologiques et un ouvrage dédié à l'argile.

Il ne s'agit pas d'un choix effectué au hasard, puisque la 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), pour la collaboration du SCR, du CDS93, du CoSIF et du CDS21 à cette étude.

11 stagiaires sont attendus, 8 de région francilienne et 3 de Rhône-Alpes.

Un week-end, c'est un laps de temps très court pour le menu qu'ont préparé les encadrants. Un programme consacré à la pratique de la karstologie et à l'hydrogéologie souterraine. Arrivés le 11 octobre au soir pour la plupart d'entre nous, Fabien et Vincent partent équiper la cavité en double pour que le stage puisse démarrer rapidement le samedi matin. Il a pas mal plu les jours précédents, la rivière semble être remontée d'un cran, mais son niveau permet la tenue du stage, ouf. Le gîte est celui de la Clairière, à Francheville, où l'accueil est chaleureux. Les tartines des petits déjeuners sont couronnées de confiture maison et le repas est concocté par la maîtresse des lieux le samedi soir.

1. Eléments de karstologie

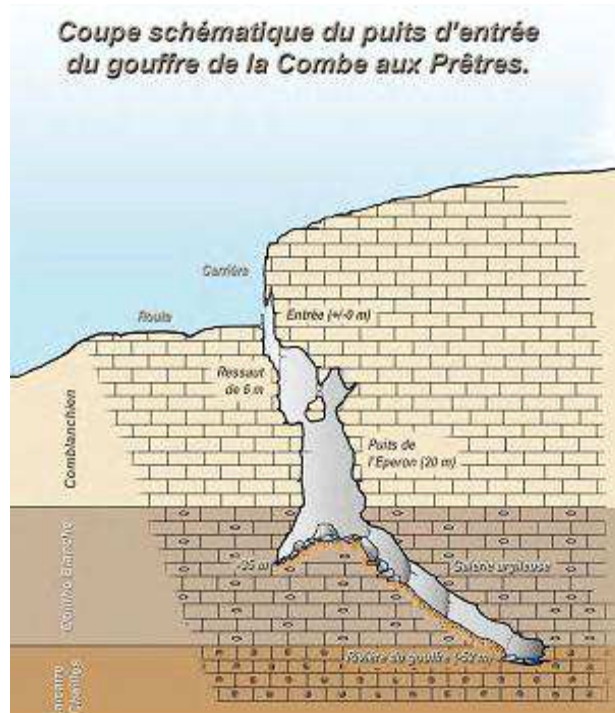
1.1. Repérage des couches géologiques in vivo !

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 sont l'une des causes de la formation du massif sur lequel la Combe s'est créée.



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

La coupe schématique au niveau de l'entrée présente trois principales couches : le comblanchien, le calcaire à oolithes, puis les calcaires à chailles :



10h, nous descendons dans la grotte. Le premier exercice est de repérer sous terre les changements de strates :

- dans la partie supérieure, le comblanchien : dont les composantes sont fines ;
- à la base des puits : on observe la transition avec le calcaire oolithique, avec des enchevêtrements de lignes (stratification entrecroisée), puis présence d'oolithes, plus granuleuses ;
- 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.



Chailles

1.2. Histoire de la formation des reliefs souterrains, et plongée vers le passé géologique marin

Le décor de la cavité permet de repérer des marmites, des blocs effondrés (avec crochons), des gours... :



Gours

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 fait découvrir « en live » la passionnante histoire de la faille de la Rochotte, qui, grâce à un glissement sub-vertical des deux parois, nous permet de passer sous la couche marneuse, pour le plaisir d'observer de fabuleux vestiges marins, aiguilles d'oursins et polypiers (coraux) :



Aiguilles d'oursins fossiles (radioles)



Polypier fossile (coraux)

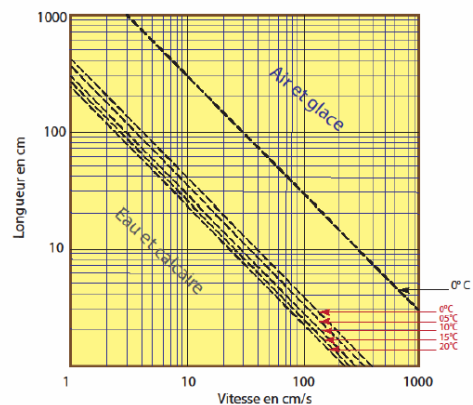
1.3. Observation des remplissages et lecture initiatique des parois

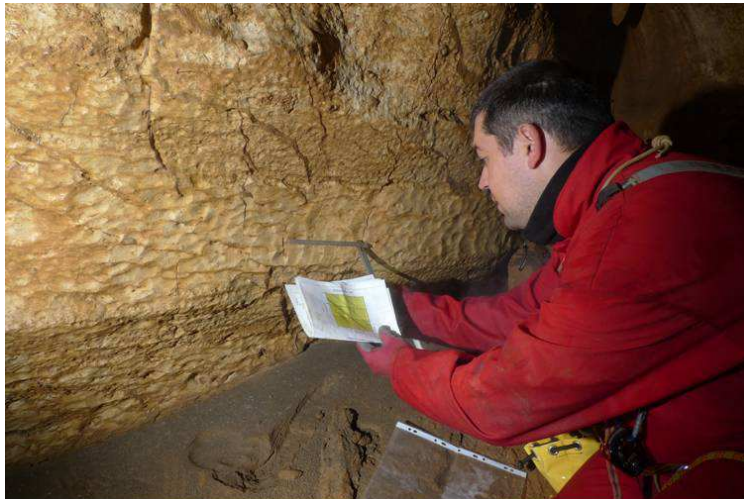
Graviers, sapins d'argile, concrétions... constituent des types de remplissage visibles dans la cavité. La présence de concrétions est l'occasion de rappeler les étapes de leur formation (l'eau de surface, acidifiée par le passage des couches d'humus riche en CO₂, pénètre par les cassures/fissures, puis libère le calcaire dissout en formant les concrétions.

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 :

Abaque de Curl





Utilisation du diagramme de Curl

2. Éléments d'hydrogéologie

2.1. Des mesures de débit au gros sel et aux flotteurs

- Par le sel :

Le principe : c'est grâce à différence de conductivité (qui mesure la concentration en ions en micro Siemens, noté μS) entre deux points distincts de l'écoulement que le débit peut être mesuré.

1. La conductivité de base (« bruit de fond ») est d'environ 550 à 600 μS . On s'est amusés à mesurer celle de l'eau bouillie, qui ne dépasse pas 270 μS , à cause de la précipitation du calcium.
2. Une courbe de tarage 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 deux tests, avec 5 kg de sel chacun. La distance entre le point de déversement et le point de mesure de la conductivité est mesurée. La conductivité est mesurée toutes les 5 secondes à compter du déversement du sel :





Préparation de la solution salée, déversement du sel et mesure de la conductivité

4. 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 μS
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 $0,6 \text{ m}^3/\text{s}$.

Par comparaison, le débit constaté sur le site de la station hydrométrique de Villecomte (Igon) : <http://www.rdbmrc.com/hydroreel2/station.php?codestation=582> le 12 octobre 2013 est de $2,7 \text{ m}^3/\text{s}$, et $2,6 \text{ m}^3/\text{s}$ le 13 octobre, et de l'ordre de $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$ à la station de Val Suzon .

- Par la méthode de jaugeage « au bouchon » : en l'absence de bouchons en liège, nous optons pour des bouteilles d'eau vides (avec leur bouchon et partiellement remplies) en guise de flotteurs. 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 m^3/s

0,4 : constante calculée de manière empirique

S, valeur moyenne de la section en m^2

V, vitesse en m/s

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 (en ° Kelvin), la pression atmosphérique et la pression de l'eau (en millibars), donc des hauteurs d'eau. Les mesures ont lieu toutes les 10 minutes. 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 :



Les sondes sont relevées

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, mais pas de crue importante.

3. Evaluation, suite ... ?

La cavité, certes fréquemment pratiquée en progression spéléologique, regorge de surprises géologiques, un décor parfait pour ce premier stage d'initiation pratique programmé par la commission scientifique du CoSIF. Les apports ont été enrichissants, grâce à un encadrement technique passionné et fort de son expérience. Le programme était dense, certains auraient peut-être apprécié plus de théorie au préalable, mais la brièveté du stage ne pouvait pas le permettre. Par ailleurs, les évaluations démontrent qu'à l'avenir, il ne faudra pas augmenter le nombre de participants.

Les stagiaires espèrent pouvoir mettre en pratique ces premiers enseignements dans une autre cavité, sans la présence de l'équipe d'encadrement, éventuellement en se basant sur des monographies qui traitent, pour une grotte donnée, de géologie souterraine.

En tout cas, l'étude des niveaux d'eau au sein du gouffre de la Combe aux prêtres se poursuit ... L'étude se poursuit au moins pendant tout l'hiver si des crues importantes adviennent. Un article sur le sujet devrait être préparé en 2014 pour Spélunca.

En attendant, pensez à votre sécurité avant d'accéder au réseau. Quelques repères :

Si le débit dépasse le module interannuel sur les stations de Villecomte ($3,35\text{m}^3/\text{s}$) ou Val Suzon ($0,494\text{m}^3/\text{s}$), 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 reste 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 :

<http://www.rdbrmc.com/hydroreel2/station.php?codestation=582>

<http://www.rdbrmc.com/hydroreel2/station.php?codestation=587>

<http://www.meteociel.fr/previsions/6180/dijon.htm>

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



SPÉLÉO CLUB ROSNÉEN

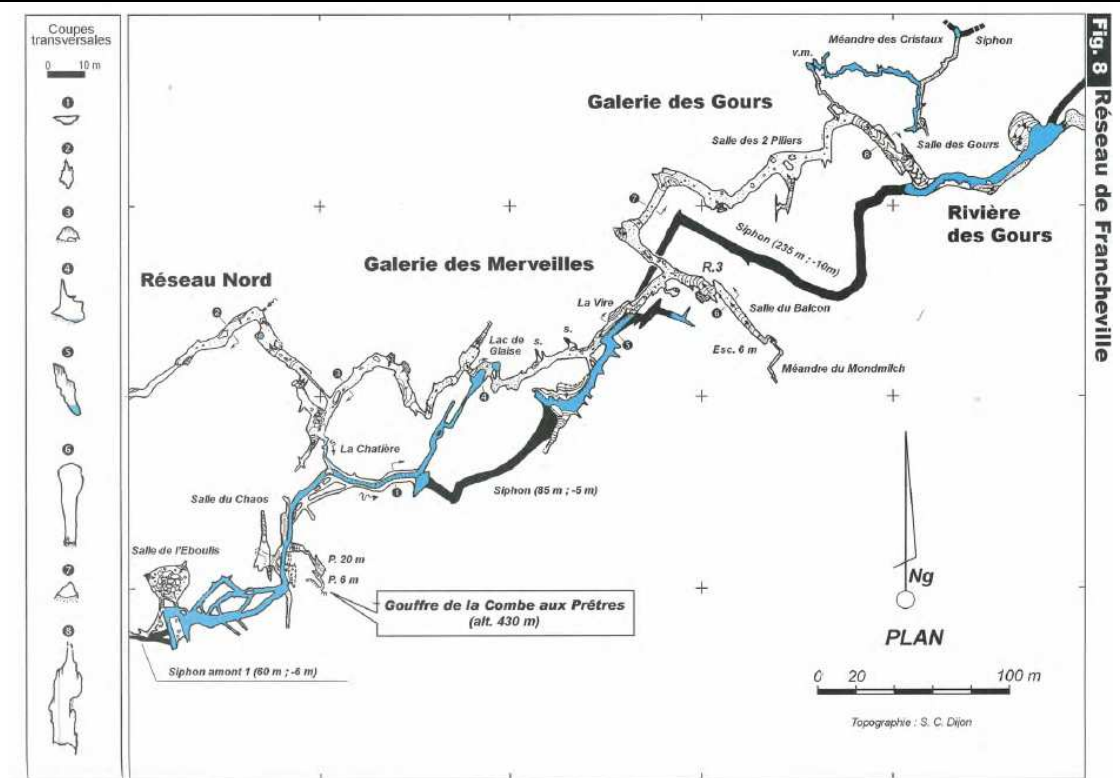
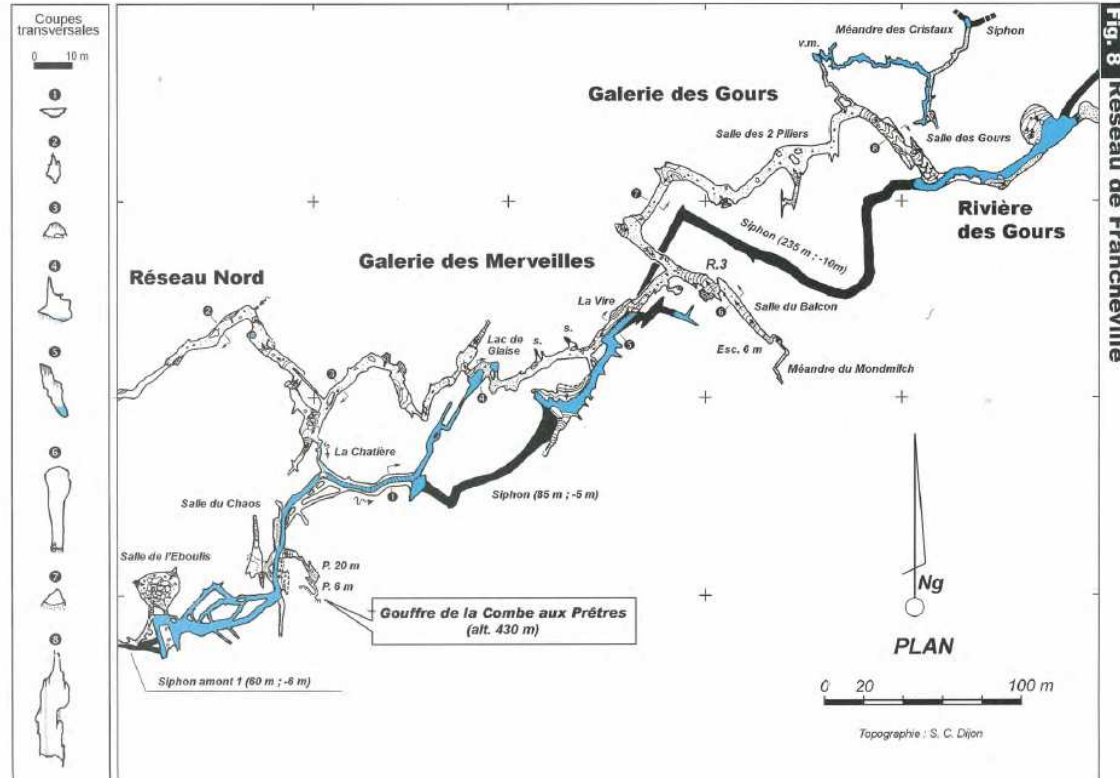


Texte : Pascale Vivancos
Photos : Philippe Guillemain

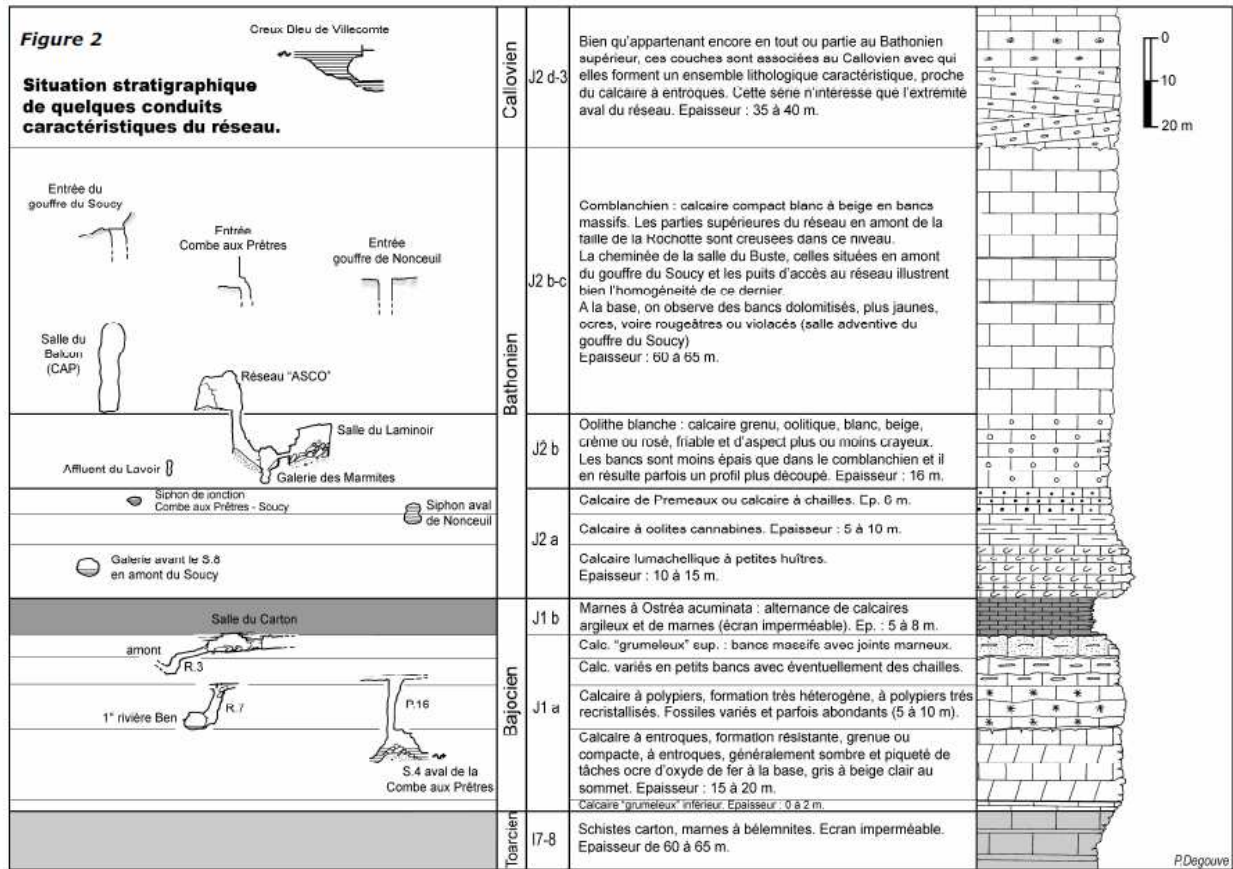
ANNEXES

I. Extraits du document transmis aux stagiaires pendant le stage

Topographie de la Combe aux Prêtres :

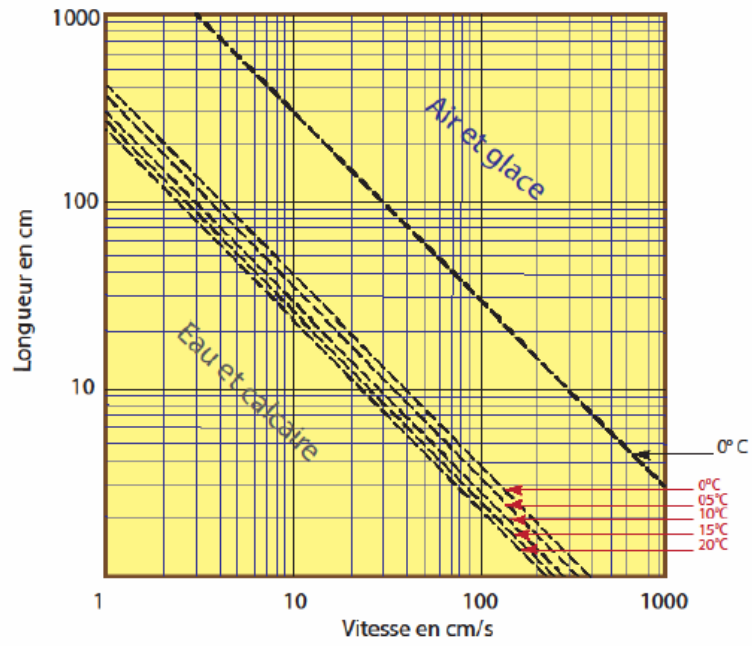


Les couches géologiques du massif du réseau de Francheville :



Abaque de Curl :

Abaque de Curl



Mesure du débit par le sel :

4 - Mesure à l'éval

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 (*in situ*). Ces mesures permettent d'établir la courbe de concentration correspondant au passage du usage de sel (fig. 6).

5 - Calcul des paramètres nécessaires au jaugeage 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 (**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 HOFFMANN & 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 (5) de la figure 5.

• **Colonne (2)** - Conductivités mesurées sur le terrain. Les premières valeurs ($850 \mu\text{S} / \text{cm}$) 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. mesuré (en $\mu\text{S}/\text{cm}$)	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)

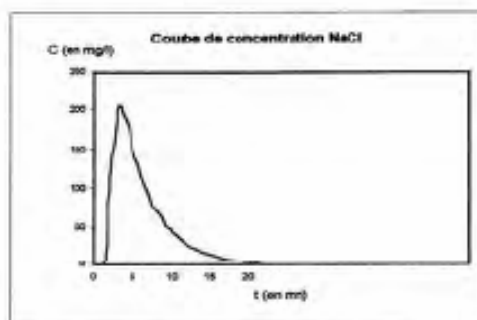


Figure 6 – Courbe de concentration obtenue lors du passage du nuage de sel (ruisseau de la Foux, Tourettes, Var – mars 2001)

- **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 exurgence 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 m³/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 chevillère triple décimètre
- 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 :

- À 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 m².

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 :

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

II. Programme du stage : les grandes lignes

Vendredi 11 octobre 2013 :

- arrivée des cadres et de la plupart des stagiaires
- équipement de la cavité par les cadres « techniques »

Samedi 12 octobre 2013 :

7h30 : petit déjeuner
9h : départ pour la cavité
10h entrée dans la cavité
17h : sortie de la cavité et retour au gîte, quelques présentations théoriques
20h : dîner

Dimanche 13 octobre 2013 :

8h : petit déjeuner
9h : nettoyage du matériel
10h30 : en salle, analyse des résultats (sondes, mesure de débit au sel), questions...
13h : déjeuner et débriefing, rangement
16h : départ

III. Participants

Stagiaires :

Sabrina Mazon - SCP
Pascale Porté - SCMNF
Philippe Guillemin - SCMNF
Stéphane Barnérias - GASPAR
Brice Augustin - Spéléo club de Montgeron
Maria-Luiza Crivat - Spéléo club de Montgeron
Emelyne Guidez - Terre et Eau
Marc Bouligaud - Terre et Eau
Marc Latapie - Spéléo club de Louhans
Simon Moureau - Spéléo club de Louhans
Philippe Zanni - Spéléo club de Louhans

Cadres :

Vincent Schneider - Spéléo Club Rosnéen et Spéléo Club Aubeis, initiateur 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