



Equipier Scientifique 2016

Hydrologie souterraine - méthodes et pratiques

29 octobre au 1^{er} novembre 2016

Combe aux Prêtres, Réseau de Francheville, Francheville, Côte d'or

Encadrement

Fabien Fécherouille, Vincent Schneider, Alexandre Zappelli

Stagiaires

Christophe Babé, Jean-François Balacey, Sébastien Durand, Véronique Hautin, Clément Le Disquay, Régine Le Gad, François Masson, Celina Milaszewicz, Lucie Richier.

I. INTRODUCTION

La compréhension du fonctionnement hydrologique d'un système karstique passe par une stratégie d'étude scientifique globale à l'échelle d'un massif ou d'un bassin versant. Cette démarche permet d'amener des éléments de compréhension sur le fonctionnement du système karstique qui intéressent les gestionnaires de la ressource en eau, ceux des milieux naturels et bien entendu les spéléologues dans le cadre des projets d'exploration et de documentation du milieu souterrain qu'ils sont amenés à conduire.

Un projet d'étude s'est installé sur le système spéléologique de Francheville, porté par un groupement de différentes structures spéléologiques franciliennes, champardenaises et bourguignonnes. Cette étude s'attache à étudier le comportement de la rivière souterraine du réseau de Francheville, dans la partie pénétrable entre les gouffres de la Combe aux Prêtres et de la Rochotte. L'un des axes de cette étude a pour objectif d'installer un réseau de mesures à haute densité dans le système avec une définition pointue des techniques et des protocoles de mesures afin d'optimiser la fiabilité et l'exploitabilité des résultats obtenus. Elle utilise en particulier les sondes de mesures de pressions Sensus de « Reefnet », peu onéreuses et largement utilisées ces dernières années.

Le projet d'étude du réseau de Francheville a débuté en 2013, et initié par le Comité Départemental de Spéléologie de Seine-Saint-Denis (CDS 93) et le Comité Spéléologique d'Île de France (CoSIF). Un article présentant la méthodologie mise en œuvre dans ce projet a été soumis à Karstologia en octobre 2016.

Un des volets de ce projet est la sensibilisation et la formation des spéléologues au travers de stages, qui ont eu lieu chaque année depuis 2013 : « Initiation pratique à la karstologie et l'hydrologie souterraine ». En 2015, la Commission Scientifique de la Fédération Française de Spéléologie a sollicité l'équipe de ce projet pour organiser le module « Equipier scientifique 2016 » sur le réseau de Francheville. Nous avons bien évidemment accepté avec plaisir cette proposition, et mis en place pour la première fois une formule sur 4 jours, laissant davantage de place à la formation et à l'autonomie.

Le stage a eu lieu du 29 octobre au 1^{er} novembre 2016, au gîte de la Clairière à Francheville, agréé par la Fédération Française de Spéléologie sous le numéro d'agrément SSC05016A. Les participants sont accueillis dès le 28 octobre au soir, pour la nuitée.

Il est destiné à tout spéléo autonome sur corde, désireux de découvrir ou de se perfectionner dans les aspects scientifiques de l'hydrologie souterraine, ainsi que les méthodes de mesures associées. Ce stage correspond au volet Hydrologie de la formation d'Équipier Scientifique.

Avec plus de trois ans de données de niveau d'eau en de nombreux points du réseau, ce stage a permis d'aborder la problématique de l'étude hydrologique d'une cavité de ce type, et de se familiariser avec les méthodes nécessaires à cette approche. D'une manière plus générale il permettra d'aborder les moyens, méthodes et limites d'évaluation des débits actuels et passés. Pour cela il est proposé de croiser les méthodes par des équipes différentes sur différentes stations, et de comparer les résultats. Ils pourront être cartographiés et interprétés, vis-à-vis du fonctionnement actuel et passé du réseau. Il a été proposé à chaque équipe de suivre un tableau de bord des différentes mesures qu'ils effectuent au cours du stage. Les stagiaires doivent également rédiger le mode opératoire de chaque méthode, en présentant une approche de ses incertitudes, ses limites et les précautions à prendre.

Débit actuel		
Station : -----	Méthode	Débit (L/s)
	Estimation « à l'œil »	
	Capacitive	
	Flotteurs	
	Hydraulique (déversoir)	
	Fluorescéine	
	Sel	

Débit passé (vitesse)		
Station : -----	Méthode	Vitesse (cm/s)
	Galets	
	Coups de gouge	

Les objectifs du stage sont que (i) chaque participant ait pu découvrir les méthodes disponibles, (ii) les mesures aient été réalisées au même endroit par différentes équipes et différentes méthodes, (iii) un rapport de synthèse soit préparé et soutenu par chaque équipe.

Les résultats des mesures réalisées lors de ce stage contribueront à l'étude en cours sur le réseau.



Figure 1 : préparation de la mesure de débit au sel et fluorescéine, rivière Ben

II. ORGANISATION DU STAGE

A. Programme

Tableau 1 : Programme du stage

Jour	Matin	Après-midi	Soirée
Vendredi 28/10/2016			Accueil des stagiaires pour la nuitée
Samedi 29/10/2016	7h30 : Petit déjeuner 8h30 : Présentation du massif, des objectifs, des méthodes, puis départ pour le réseau	Présentation du réseau 18h : retour au gîte 20h30 : Dîner	21h30 : Débriefing, choix des équipes, des travaux
Dimanche 30/10/2016	7h30 : Petit déjeuner 8h30 : Départ sous terre Relevés sur le terrain	Relevés sur le terrain 17h30 max : retour au gîte 20h30 Dîner	21h30 : Travail en équipe, préparation des opérations du lendemain
Lundi 31/10/2016	7h30 : Petit déjeuner 8h30 : Relevés complémentaires sur le terrain ou interprétations 13h : repas au gîte	Interprétation et rédaction 17h30 max : retour au gîte 20h30 : Dîner	21h30 : Premier bilan de l'avancement des travaux, travail en équipe, interprétations, rédactions
Mardi 01/11/2016	7h30 : Petit déjeuner 8h30 : Présentations des participants et remise des rapports 13h : repas au gîte	14h : Débriefing 15h : nettoyage et rangement du matériel 16h : retour.	Retour

B. Matériel

1. Matériel mis à disposition

Jaugeage aux flotteurs

- Fiches de mesure
- Décamètre
- Perche télescopique
- Mètre de charpentier
- Flotteurs
- Distancemètre laser

Jaugeage au sel

- Fiches de mesure
- Sel
- Conductimètre (dont WTW 3410 enregistrement au pas de temps seconde, 10000 mesures), clé USB
- Seau de mélange
- Gants-manchette de protection

Jaugeage à la fluorescéine

- Fiches de mesure
- Fluorescéine (en flacons et en doses de 0,99g)
- Fluorimètre (Aquaread AM-200 et sonde AP-Lite, enregistrement au pas de temps minute, capacité 1000 mesures)

Jaugeage hydraulique

- Fiches de mesure
- Décamètre
- Perche télescopique
- Mètre de charpentier
- Niveau laser et trépied
- Distancemètre laser

Divers

- Plaquettes PVC
- Papier syntosil
- Mousse de conditionnement
- Crayons, stylos
- Elastics

Documentation

- Cf. annexe
- Fascicule Onema « Contrôle des débits réglementaires » (http://www.fomodo.fr/files/ONEMA_controle-debit_s-reglementaires_11-2011.153.pdf)

2. Matériel à prévoir

- Indispensable : Matériel individuel de progression (combi, sous-combi, chaussons néoprène, casque, bottes, baudrier complet et accessoires, couverture de survie ou équivalent, montre, moyen de chauffe sous terre, ...). Les chaussons néoprène sont très vivement conseillés !
- Un shorty ou combinaison néoprène si besoin
- Prise de notes sous terre
- Si possible : Appareil photo pour sous terre et de quoi le conditionner
- Mètre pour sous terre
- Pour travailler au gîte : ordi portable (si possible), carnet de notes, de quoi écrire et dessiner.

C. Participants

Tableau 2 : Participants

Nom	Statut	n° licence	e-mail
Fabien Fécheroulle	cadre	A93-007-030	<i>fabienf@neuf.fr</i>
Vincent Schneider	cadre	A93-007-064	<i>vince-schneider@orange.fr</i>
Alexandre Zappelli	cadre	D13-036-014	<i>alexandre.zappelli@free.fr</i>
Christophe Babé	stagiaire	A92-009-017	<i>christophe-babe@orange.fr</i>
Jean-François Balacey	stagiaire	B12-002-011	<i>jef2192@gmail.com</i>
Sébastien Durand	stagiaire	F46-011-168	<i>sdurand@parc-causses-du-quercy.org</i>
Véronique Hautin	stagiaire	A92-012-091	<i>veronique.hautin@sia-partners.com</i>
Clément Le Disquay	stagiaire	A92-010-206	<i>clement.ledisquay@gmail.com</i>
Regine Le Gad	stagiaire	B71-005-003	<i>regine.legad@fr.ibm.com</i>
François Masson	stagiaire	E66-016-005	<i>francois.masson0832@orange.fr</i>
Celina Milaszewicz	stagiaire	A92-010-199	<i>miwacreations@gmail.com</i>
Lucie Richier	stagiaire	B71-005-034	<i>didier.richer@free.fr</i>

D. Equipes et travaux réalisés

Tableau 3 : Constitution des équipes

Equipe 1	Equipe 2	Equipe 3
François Masson	Véronique Hautin	Clément Le Disquay
Sébastien Durand	Christophe Babé	Céline Milaszewicz
Jean-François Balacey	Régine Le Gad	Lucie Richier



Figure 2 : installation des enregistreurs de conductivité et fluorescéine, rivière des gours

Tableau 4 : Programme des équipes

Equipe	Date	Zone	Station	Objet	V. Schneider	A. Zappelli	F. Fécherouille
1	30-oct	Galerie des merveilles	Amont chatière ouest (diverticule)	Coups de gouge			x
		Galerie des merveilles	virage rive gauche	Coups de gouge			x
		Galerie des merveilles	virage rive droite	Coups de gouge			x
		Salle des deux piliers	Ouest salle rive gauche	Galets			x
		Salle des deux piliers	Ouest salle rive gauche	Galets			x
		Rivière des gours		Visuel	x		
		Rivière des gours		Sel	x		
		Rivière des gours		Fluo	x		
		Rivière des gours		Flotteurs	x		
	Galerie des merveilles	Arrivée d'eau au plafond	Capacitif	x			
	31-oct	Base Puits CAP		Sel			
Base Puits CAP			Hydraulique				
2	30-oct	Base des puits		Visuel		x	
		Base des puits		Flotteurs		x	
		Base des puits		Sel		x	
		Réseau nord	Entrée trémie nord	Coups de gouge		x	
		Réseau nord	Affluent du R2	Capacitif		x	
	31-oct	Rivière des gours		Sel	x		x
		Rivière des gours		Fluo	x		x
		Salle des deux piliers		Galets	x		x
		Salle de la vire	ouest, bande supérieure	Galets	x		
		Salle de la vire	ouest, bande inférieure	Galets	x		
3	30-oct	Siphon Ben		Visuel	x		
		Siphon Ben	Amont S1 Ben	Fluo	x		
		Siphon Ben	Amont S1 Ben	Sel	x		
		Siphon Ben	Amont S1 Ben	Flotteurs			
		Siphon pont de singe	aval	Galets			x
	31-oct	Base Puits CAP	Siphon aval CAP	Hydraulique		x	
		Base Puits CAP	Siphon aval CAP	Flotteurs		x	
		Réseau nord	Amont R2, bande inférieure	Coups de gouge		x	
		Réseau nord	Amont R2, bande supérieure	Coups de gouge		x	
		Réseau nord	Affluent du R2	Capacitif		x	

III. COMPTES RENDUS DES EQUIPES

Chaque équipe a réalisé une synthèse de ses travaux et a effectué une présentation de ses principaux résultats en fin de stage.

A. Equipe 1 (François Masson, Sébastien Durand, Jean-François Balacey)

Notre objectif était de tester différentes méthodes d'évaluation des débits passés et présents, et de vérifier si ces méthodes aboutissent à des résultats cohérents entre eux. Nous avons commencé par utiliser les méthodes permettant d'évaluer les débits du passé : coups de gouge et taille des galets.

1. Méthodes d'évaluation des débits passés

a) Méthode des coups de gouge

Nous avons choisi d'effectuer des relevés dans le diverticule à l'ouest de la sortie de la chatière et dans la galerie des Merveilles en différents endroits, afin de voir si les résultats étaient cohérents, et si la topographie influençait les estimations obtenues.

Les coups de gouge localisés sur les parois sont mesurés (Figure 3), et leur longueur moyenne permet de déterminer grâce à l'abaque de Curl la vitesse du courant. On notera toutefois que le résultat dépend de la température, et nous admettrons en première approximation que cette température est restée constante au cours du temps (température actuelle : 10°C)



Figure 3 : mesure des coups de gouge (équipe 1)

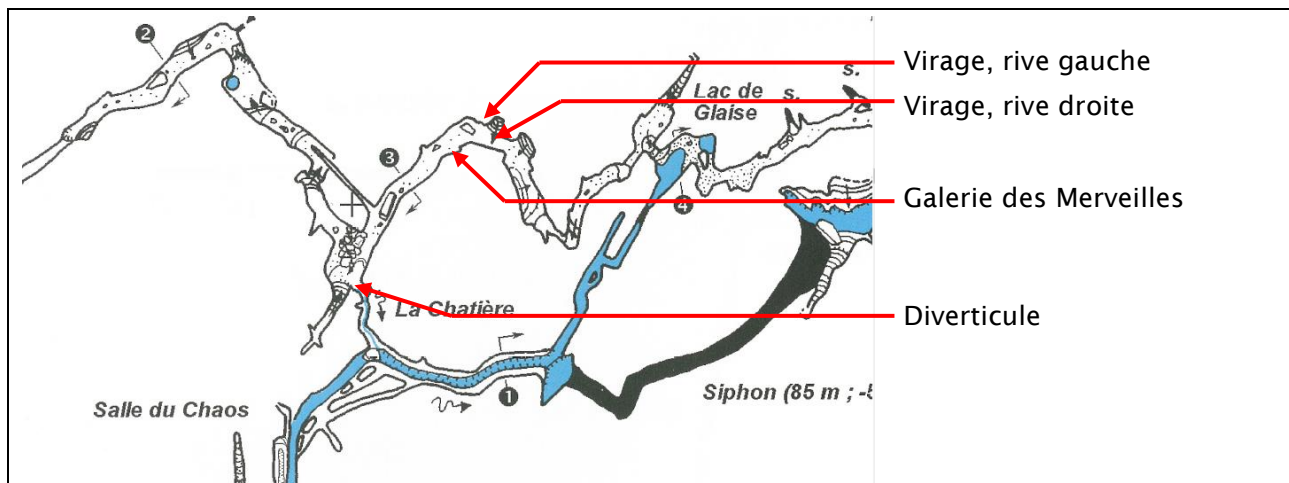
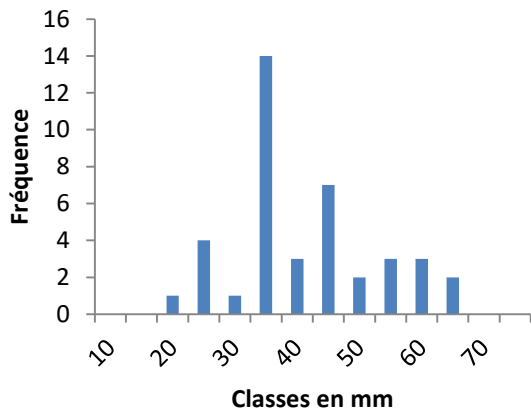
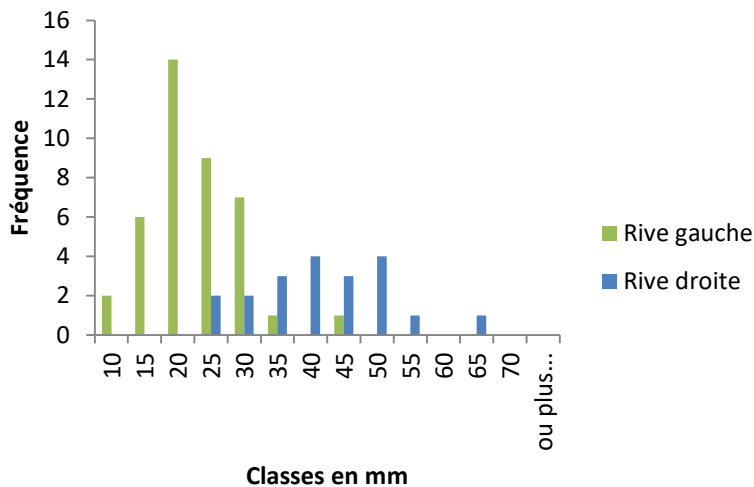


Figure 4 : Localisation des sites étudiés par la méthode des coups de gouge (équipe 1)



L'analyse des données montre une longueur moyenne des coups de gouge de 40 mm, ce qui correspond à une vitesse estimée de courant de 6 cm/s (moyenne sur 40 échantillons).

Figure 5 : histogramme de répartition des longueurs de coups de gouge au niveau du diverticule (équipe 1)



La longueur moyenne des coups de gouge est de 21 mm en rive gauche, ce qui correspond à une vitesse de 12 cm/s.

La longueur moyenne est de 40 mm en rive droite, ce qui correspond à une vitesse de 6 cm/s.

Figure 6 : histogramme de répartition des longueurs de coups de gouge sur les deux rives de l'étranglement (équipe 1)

Les résultats sont cohérents dans la mesure où toutes les directions de courant obtenues sont identiques, à savoir un courant se déplaçant globalement vers l'Est.

En revanche, les résultats obtenus diffèrent fortement entre les relevés des rives gauche et droite. Nous avons formulé comme hypothèse que la vitesse du courant était influencée par le virage brutal de la galerie: le courant à l'intérieur du virage était plus faible que celui à l'extérieur. Par ailleurs, les coups de gouge sont dans tous les cas plus petits que ceux observés dans la galerie des Merveilles, que nous n'avons pas mesurés précisément par manque de temps. Nous supposons ici que le rétrécissement au niveau du virage a provoqué une augmentation de la vitesse du courant, et que l'eau circulait donc plus doucement dans la galerie plus grande.

b) Méthode des galets

Nous avons travaillé au niveau de la Galerie des gours, avant la salle des deux Piliers. Notre objectif était de voir en quoi la répartition des galets pouvait nous renseigner sur le débit passé, et si cette répartition était liée à la localisation du site d'échantillonnage.

Le principe est de mesurer un échantillon représentatif de galets déposés dans la galerie et d'en déduire grâce au diagramme de Hjulström la vitesse maximale qui a permis le dépôt de ces galets.

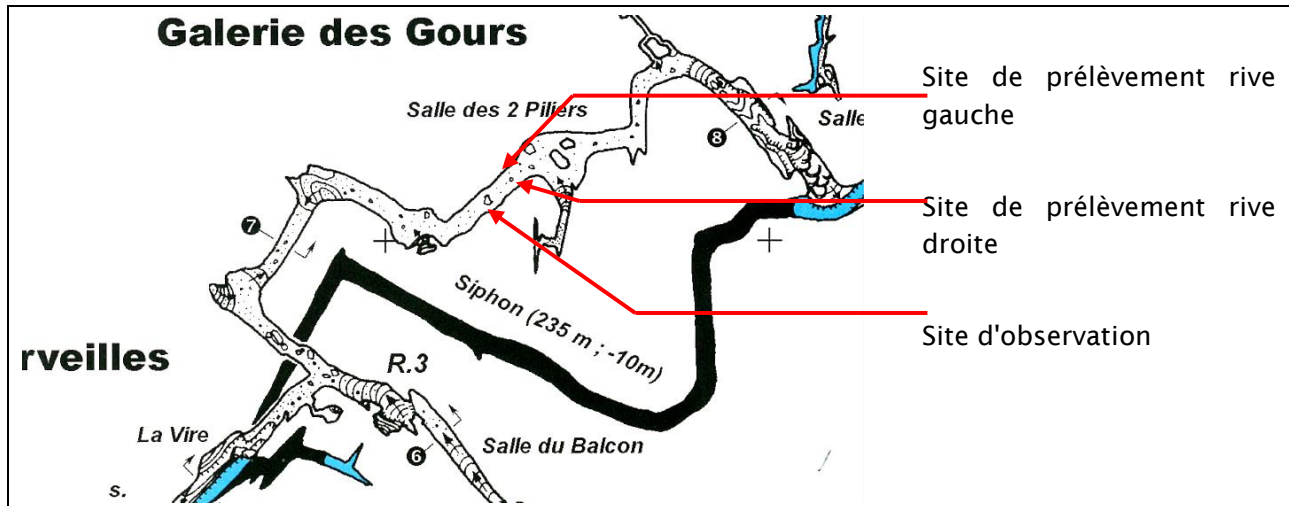


Figure 7 : Localisation des sites étudiés par la méthode des galets (équipe 1)

Au niveau du site d'observation, nous avons constaté que les galets étaient empilés comme les tuiles d'un toit, la partie haute vers le Nord Est (Figure 8). Nous pouvons en déduire que le courant dans la galerie se dirigeait dans cette direction. Nous n'avons pas effectué de mesures à cet endroit car des gours concrétionnés se trouvaient à proximité, et nous n'avons pas voulu risquer de les détériorer.

Une grosse incertitude est liée à la forme des galets : nous avons hésité sur l'axe à considérer (longueur, largeur ou hauteur). Nous avons décidé de garder la largeur, qui est plus représentative: la courbe de répartition est plus gaussienne comme le montre la Figure 9.



Figure 8 : Galets empilés montrant le sens du paléocourant (équipe 1)

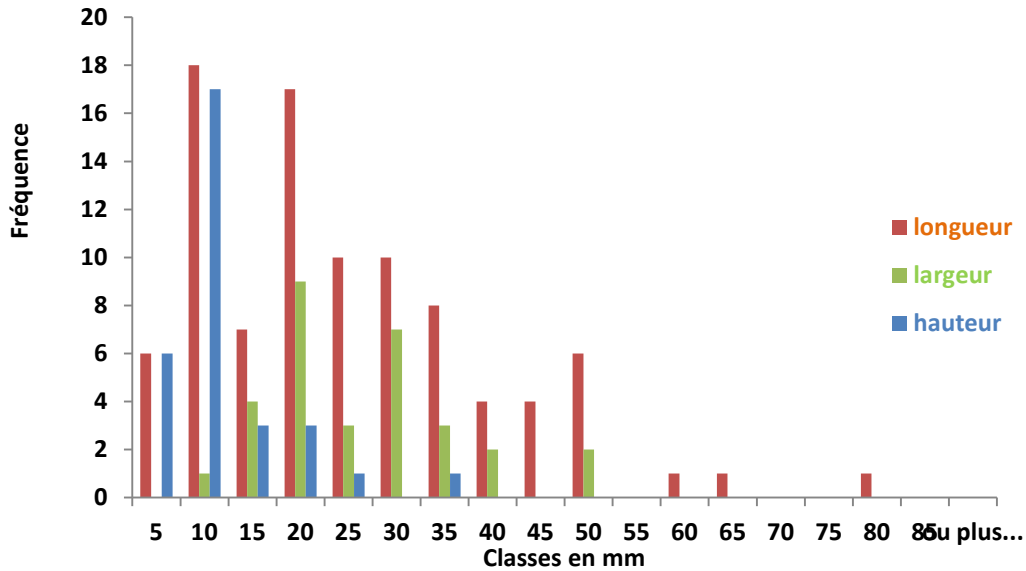


Figure 9 : Histogramme de répartition des longueurs des différents axes (équipe 1)

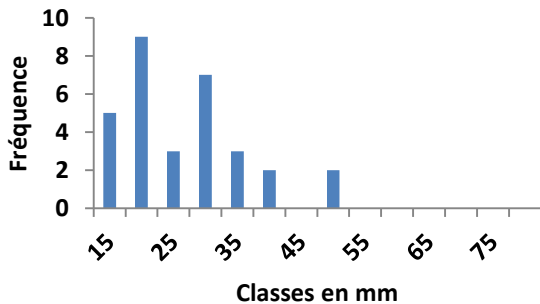


Figure 10 : répartition des tailles de galets sur la rive gauche (équipe 1)

Mesure moyenne: 37,5 mm

Vitesse estimée du paléocourant: 60 cm/s

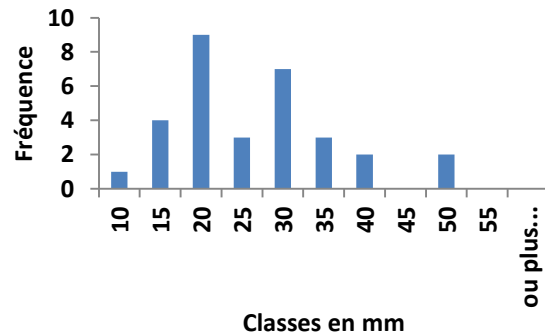


Figure 11 : répartition des tailles de galets sur la rive droite (équipe 1)

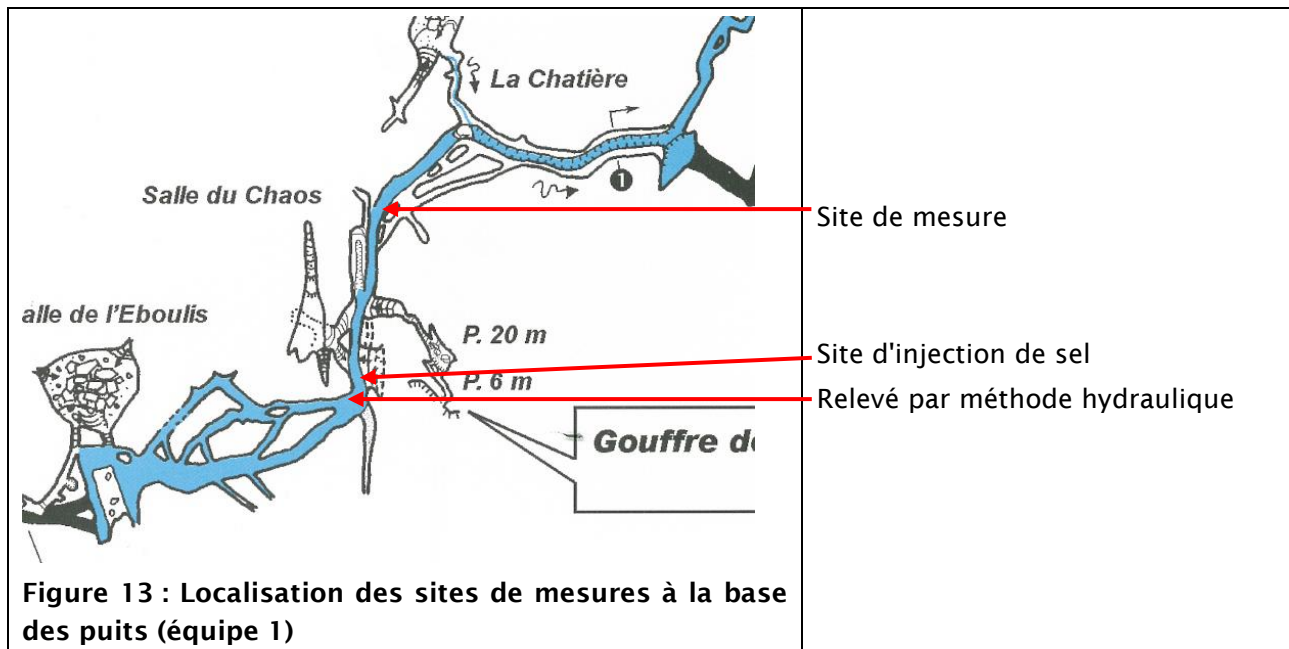
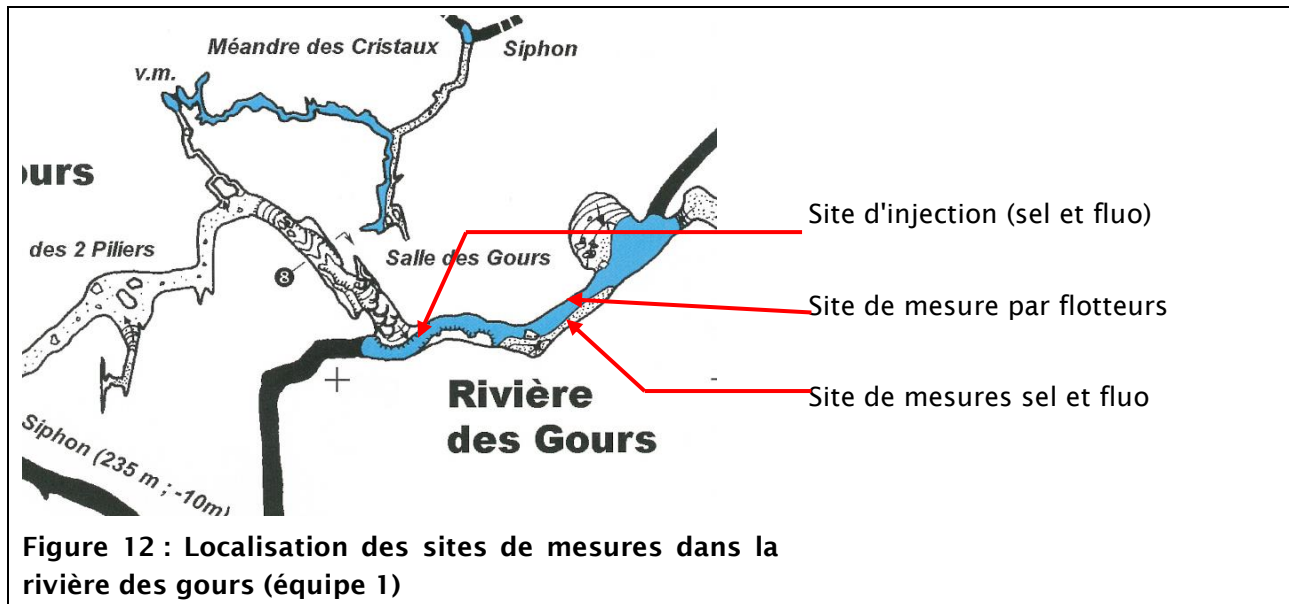
Mesure moyenne: 26 mm

Vitesse estimée du paléocourant: 48 cm/s

Le diagramme de Hjulström nous permet d'estimer les vitesses des paléocourants ayant déposé ces galets. On obtient des valeurs différentes entre les deux rives, ce qui pourrait aussi être lié à la topographie, la galerie amorçant un léger coude dans ce secteur. Par ailleurs, de gros blocs au sol pourraient aussi avoir un lien avec ces différences, à condition qu'ils soient tombés avant le dépôt des galets.

2. Méthodes d'évaluation des débits actuels

Nous sommes allés dans la rivière des gours, juste avant le pont de singe, afin de déterminer les débits actuels par trois méthodes différentes. Nous avons aussi effectué des mesures à la base des puits : l'objectif était de vérifier la cohérence entre les résultats obtenus.



a) Méthode au sel

Rivière des Gours

Nous avons versé 4 kg de sel au niveau de la rivière des gours, puis nous avons mesuré les variations de conductivité. La vitesse pour que le "nuage de sel" passe dépend du débit de la rivière.

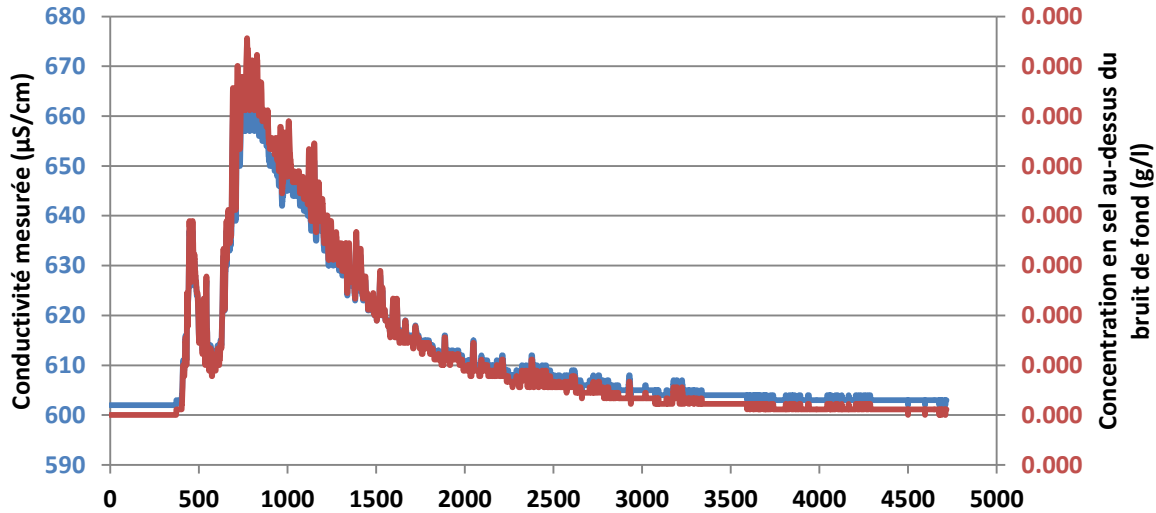


Figure 14 : Conductivité et concentration en sel en fonction du temps à la rivière des gours (équipe 1)

Le calcul réalisé donne un débit de 135 l/s

On notera une anomalie aux alentours du temps 500. Elle peut s'expliquer par le brassage artificiel que nous avons provoqué en retournant près du conductimètre.

Base des puits

Nous avons injecté 5 kg de sel à la base des puits. Les relevés ont été réalisés manuellement au pas de temps de 5 secondes au moment du passage du pic puis 15 s, 30 s et 10 minutes.

Le débit obtenu est de 137 l/s.

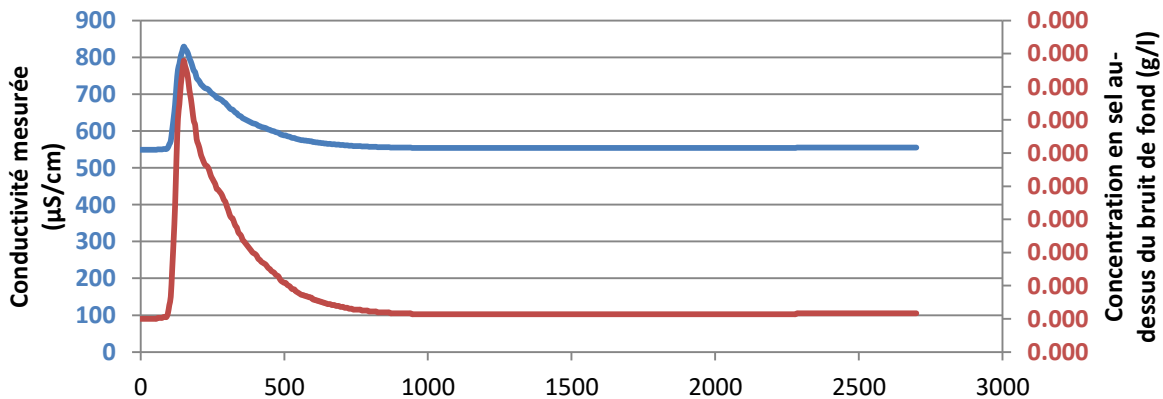


Figure 15 : Conductivité et concentration en sel en fonction du temps, base des puits (équipe 1)

b) Méthode à la fluorescéine

Nous avons versé en même temps que le sel 0,99 g de fluorescéine, puis nous avons enregistré la fluorescence.

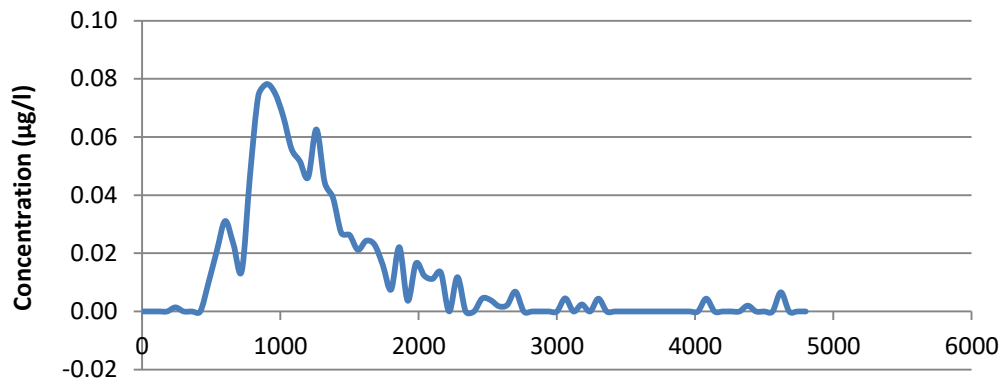


Figure 16 : Concentration en fluorescéine en fonction du temps, base des puits (équipe 1)

Le calcul réalisé donne une valeur de 161 l/s. On notera la même anomalie que celle notée pour la méthode au sel.

c) Méthode au flotteur

Nous avons déterminé une ligne de départ et une autre d'arrivée, séparées de 7,2 m. Nous avons lâché des flotteurs en amont de la ligne de départ, puis avons mesuré le temps nécessaire pour parcourir la distance connue.

Tableau 5 : Tableau de vitesse des flotteurs (équipe 1)

Position du flotteur	Rive gauche	Centre	Rive droite
Mesure 1 (s)	45	30	39
Mesure 2 (s)	36	29	36
Mesure 3 (s)	30	32	35
Mesure 4 (s)	32	30	34
Mesure 5 (s)	30	36	35
Moyenne (s)	34.6	31.4	35.8
Vitesse moyenne (cm/s)	21	23	20
Vitesse moyenne totale	21 cm/s		

Nous avons ensuite réalisé un profil de la rivière, afin de déterminer la surface d'eau dans la zone (Tableau 6). Pour cela, nous avons mesuré la profondeur d'eau tous les 20 cm, puis nous avons calculé la surface sous forme de rectangles.

On obtient donc un débit de 21×7030 , soit 150 l/s.

Tableau 6 : Tableau de calcul de la surface d'eau (équipe 1)

Profondeur (cm)	22	19	28	27,5	24	25	23	22	21	19,5	19	19	19	18,5	18	16	10	1
Largeur (cm)	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
Surface (cm²)	440	380	560	550	480	500	460	440	420	390	380	380	380	370	360	320	200	20
Surface totale (cm²)	7030																	

d) Bilan

On peut noter que les résultats obtenus, s'ils sont dans la même fourchette, présentent des différences notables. Il est possible que les quantités de traceurs injectées aient été trop faibles : la valeur maximale atteinte est inférieure au double du bruit de fond.

Tableau 7 : Comparaison des débits obtenus avec différentes méthodes (équipe 1)

Méthode	Estimatif	Sel	Fluo	Flotteurs
Débit (l/s)	120	135	161	150

e) Méthode capacitive

A l'ouest du lac de glaise, dans la galerie des merveilles, nous avons tenté de mesurer le débit d'un écoulement le long de concrétions par la méthode capacitive. Nous avons tendu une bâche (en l'occurrence un poncho) et récupéré dans un bidon l'eau qui coulait. Nous avons mesuré le temps pour que le bidon se remplisse, puis nous avons vérifié le volume de retour au gîte.

Tableau 8 : Tableau d'évaluation du débit par méthode capacitive, galerie des merveilles (équipe 1)

	Temps de remplissage (s)	Volume (l)	Débit (l/s)
Essai 1	116	2.75	0.023
Essai 2	105	2.75	0.026
Essai 3	110	2.75	0.025
Moyenne	110	2.75	0.025

f) Méthode hydraulique

Nous avons mesuré par méthode hydraulique le débit au niveau de la base des puits, juste après avoir utilisé la méthode au sel, afin de comparer les deux méthodes.

Voici les mesures réalisées :

Tableau 9 : paramètres de mesure du débit par la méthode hydraulique (équipe 1, base des puits)

Longueur du réservoir	(m)	b	4
Largeur du réservoir	(m)	e	0.25
Hauteur du réservoir	(m)	p	0.25
Hauteur de la lame d'eau	(m)	h	0.08

On peut alors calculer le débit avec la formule :

$$Q = C \cdot b \cdot h^{1,5} \cdot \sqrt{2g}$$

C'est un coefficient lié à e, p et h. En l'occurrence, il est de 0,864.

On peut alors calculer $Q = 133$ l/s.

3. Conclusion

Les différentes méthodes doivent être adaptées aux conditions locales : la méthode hydraulique ou capacitive nécessite des conditions particulières (topographie, débit faible).

On peut aussi noter que les valeurs de traceurs doivent être suffisantes, et supérieures à celles préconisées, afin de s'affranchir des incertitudes liées au bruit de fond.

4. Annexe : comparaison des méthodes d'évaluation des débits

Méthode	Avantage	Inconvénient
Estimative	Rapide d'exécution	Imprécision
Flotteur	Facilité de mise en œuvre	<ul style="list-style-type: none"> • Synchronisation entre opérateurs • Variabilité des résultats en fonction du site du lâcher
Sel	<ul style="list-style-type: none"> • Précision • Cout de l'appareil abordable (conductimètre) 	<ul style="list-style-type: none"> • Impact sur le milieu • Bien dissoudre avant l'injection
Hydraulique	Cout de l'appareil abordable (laser)	<ul style="list-style-type: none"> • Complexité pour obtenir tous les paramètres • Longueur du temps de la mesure
Fluorescéine	Précision	Cout de l'appareil (fluorimètre)
Capacitive	Rapidité de mise en œuvre	Difficulté de trouver des lieux adaptés
Coups de gouge	Mesures simples	Sites pas toujours présents dans la cavité
Galets	Mesures simples	Sites pas toujours présents dans la cavité

5. Restitution des résultats



Compte rendu du stage spéléo équipier scientifique
(28/10/16 – 01/11/16)
Réseau de Francheville (Cote d'Or)

Jean-François
François
Sébastien

Programme sur le terrain :

Jour 1 : Repérage du réseau

Jour 2 : Test des méthodes de mesure de débits

- Coups de gouge
- galets
- Estimative
- flotteurs
- Sel
- Fluorescéine
- Capacitive

Jour 3 : Test des méthodes de mesure de débits

- Sel
- Hydraulique

Jour 2 : Test des méthodes de mesure de débits :

➤ La méthode Coups de gouge

Objectif : Estimer la vitesse des paléocourants

Y a-t-il eu des différences de vitesses dues à la morphologie de la cavité ?

Méthode :

- > Rechercher une paroi présentant des coups de gouge
- > Eclairer en lumière rasante
- > Mesurer la longueur des coups de gouge

Localisation :

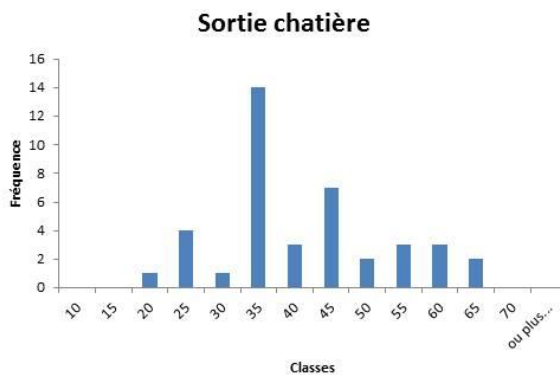
- sortie de la chatière (zone 1)
- galerie des merveilles (zone 2)



Jour 2 : La méthode Coups de gouge

Résultats

	Sortie chatière	Galerie des merveilles rive gauche	Galerie des merveilles rive droite
Nombre de mesures	40	40	20
Longueur moyenne (mm)	40	21	40
Vitesse (cm/s)	6	12	6



- rive droite dans l'intérieur du virage
-> vitesse faible
- rive gauche dans l'extérieur du virage
-> vitesse plus importante
- On observe des coups de gouge plus longs en amont -> le courant devait être moins rapide

4

Jour 2 :

➤ La méthode des galets

Objectif : Estimer la vitesse des paléocourants

Y a-t-il eu des différences de vitesses dues à la morphologie de la cavité ?

Méthode :

- > Rechercher des galets mobilisables pour pouvoir les mesurer
- > Mesurer la longueur, largeur, hauteur

Localisation :

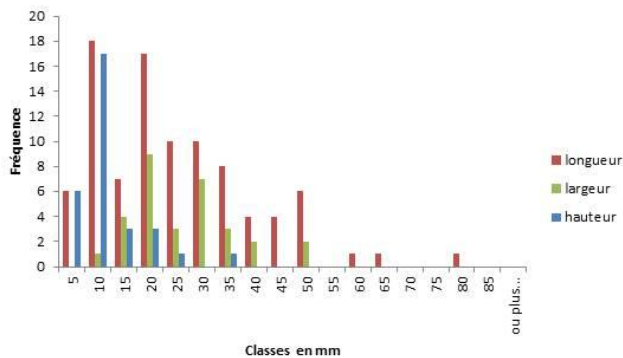
Salle des 2 piliers



Jour 2 : La méthode des galets

	Rive droite galets moyens	Rive droite galets gros	Rive gauche galets moyens	Rive gauche galets gros
Nb de mesure	31	15	50	15
Largeur moyenne (mm)	26	64	37	63
Vitesse (cm/s)	48	80	60	80

Histogramme



- Disposition en tuile vers le nord est -> sens du courant
- Vitesses variables -> fonction de la géomorphologie du conduit

Jour 2 :

➤ La méthode estimative

Objectif : Estimer la vitesse à la louche pour connaître la quantité de sel nécessaire à injecter

Méthode : 🖐️ la méthode du doigt mouillé !!

Localisation : Rivière des gours (avant le pont de singe)

Résultat : 120 l/s



Jour 2 :

➤ La méthode au sel

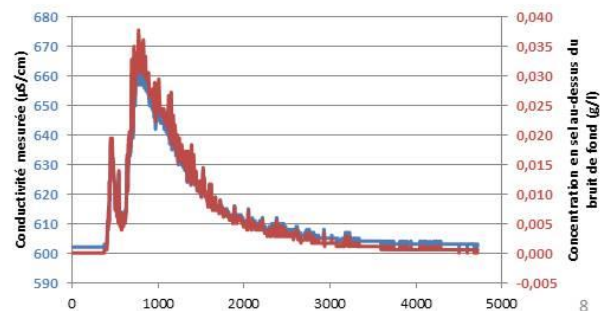
Objectif : Mesurer le débit actuel de la rivière

Méthode :

- Détermination de la quantité de sel à partir de la méthode estimative (1kg sel par 100 l/s)
- Injection de sel et suivi de la conductimétrie

Localisation : Rivière des gours (avant le pont de singe)

Résultat : 135 l/s



Jour 2 :

➤ La méthode à la fluorescéine

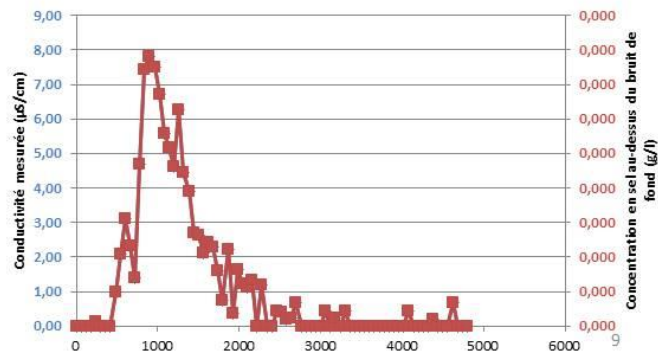
Objectif : Mesurer le débit actuel de la rivière

Méthode :

- Détermination de la quantité de fluorescéine nécessaire à partir de la méthode estimative (1g de fluo par m³/s)
- Injection de la fluo et suivi de la fluorescence

Localisation : Rivière des gours (avant le pont de singe)

Résultat : 161 l/s



Jour 2 :

➤ La méthode des flotteurs

Objectif : Mesurer le débit actuel de la rivière

Méthode :

- Mesurer la section et la longueur parcourue par les flotteurs
- Chronométrer les temps d'arrivées de chaque flotteur
- 4 séries de 5 lancers (rive droite, centre, rive gauche et derrière caillou)

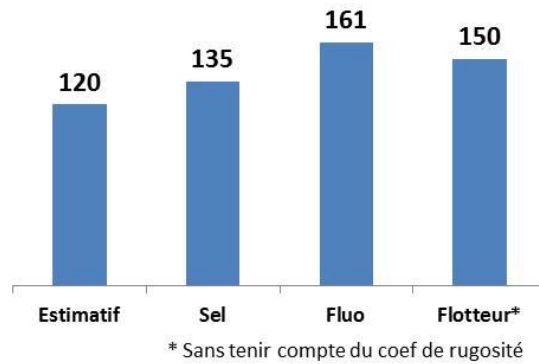
Localisation : Rivière des gours (avant le pont de singe)

Résultat : 150 l/s



Jour 2 :

➤ Récapitulatif des débits obtenus à la rivière des gours (l/s)



- Cohérence des résultats
- Coefficient de rugosité faible

11

Jour 2 :

➤ Méthode capacitive

Objectif : Mesurer le débit d'une arrivée d'eau du plafond

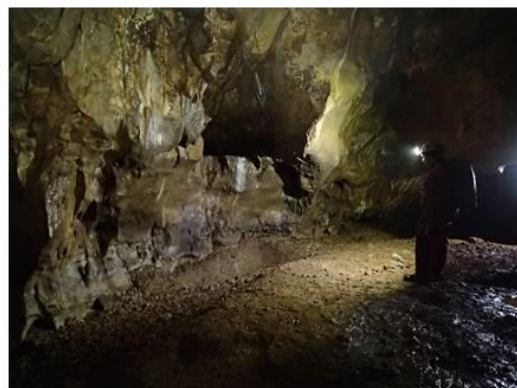
Méthode :

- Collecter toute l'eau (bâche) dans un récipient (bidon)
- Chronométrer le temps nécessaire pour remplir le bidon

Localisation : à l'ouest du lac de glaise

Résultat :

3 essais : 0,023 l/s, 0,026 l/s, 0,025 l/s
-> moyenne : 0,025 l/s



Jour 3 :

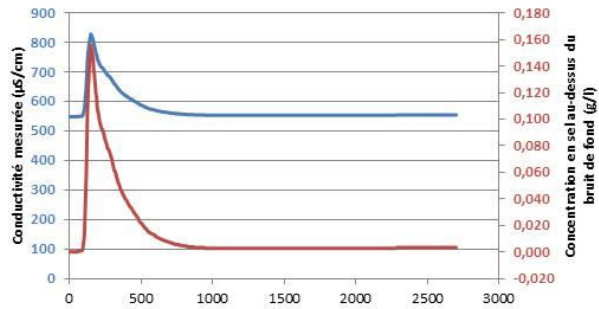
➤ La méthode au sel

Objectif : Mesurer le débit actuel de la rivière

Méthode : Injection de sel et suivi de la conductimétrie (non programmable)

Localisation : Rivière à la base des puits

Résultat : 137 l/s



13

Jour 3 :

➤ La méthode hydraulique

Objectif : Mesurer le débit actuel de la rivière

Méthode : utiliser un laser, un décamètre

$$Q=C bh^{1,5} \text{ racine (2g)}$$

Localisation : Rivière à la base des puits

Résultat : 133 l/s



Jour 3 :

➤ **Récapitulatif des débits obtenus à la rivière base des puits**

Méthode au sel	137 l/s
Méthode hydraulique	133 l/s



15

Conclusion

Méthode	Avantage	Inconvénient
Estimative	Rapide d'exécution	Imprécision
Flotteur	Facilité de mise en œuvre	<ul style="list-style-type: none">• Synchronisation entre opérateurs• Variabilité des résultats en fonction du site du lâcher
Sel	<ul style="list-style-type: none">• Précision• Cout de l'appareil abordable (conductimètre)	<ul style="list-style-type: none">• Impact sur le milieu• Bien dissoudre avant l'injection
Hydraulique	Cout de l'appareil abordable (laser)	<ul style="list-style-type: none">• Complexité pour obtenir tous les paramètres• Longueur du temps de la mesure
Fluorescéine	Précision	Cout de l'appareil (fluorimètre)
Capacitive	Rapidité de mise en œuvre	Difficulté de trouver des lieux adaptés
Coups de gouge	Mesures simples	Sites pas toujours présents dans la cavité
Galets	Mesures simples	Sites pas toujours présents dans la cavité

16

MERCI À TOUS !!



17



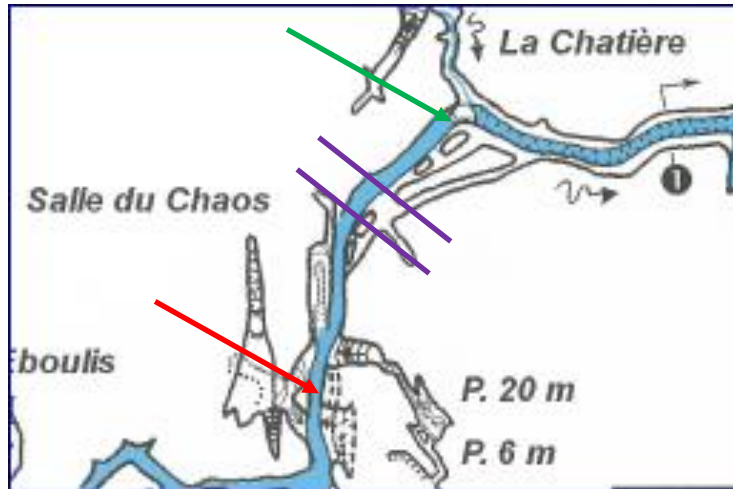
Figure 17 : mesure débit au sel et à la fluorescéine, rivière des gours

B. Equipe 2 (Véronique Hautin, Christophe Babé, Régine Le Gad)

1. Programme

a) Jour 1

A la Base des Puits



Injection sel
Mesure conductivité
Débit aux bouchons

Figure 18 : localisation des points d'injection de sel et de mesure de la conductivité + estimation du débit aux bouchons

- Mesures de débits avec les méthodes des flotteurs et jaugeage au sel.
- Estimations visuelles
- Réseau Nord :
 - o Mesures de débits passés : coups de gouges.
 - o Mesure de débits de 3 petits cours (méthode capacitive utilisée : remplissage + d'un bidon de volume connu et différence de conductivités naturelles (bruit de fond)).

b) Jour 2

Galerie des Gours



Injection sel et fluo

Mesure conductivité et fluorescence

Figure 19 : localisation des points d'injection (sel et fluorescéine) et de restitution

Mesure de débits par jaugeage au sel et fluorescéine.

Salle de la Vire Ouest et salle des 2 piliers

Mesures de débits passés : dimensions des galets.

2. Estimation du débit (base des puits)

Echelle limnimétrique le 30 octobre à 10h48 : 8cm (Le 29/10 vers 13h : 9cm)

Evaluation du débit à l'œil nu :

- Véronique : 90 l/s,
- Christophe : 200 l/s,
- Régine : 300 l/s.

3. Débit passé, mesures de la taille des galets charriés

a) Méthodologie

- Objet : mesurer le débit passé qui a amené au déplacement puis dépôt des galets sur les parois d'une galerie
- Hypothèses :
 - o la température passée est la température moyenne actuelle constatée : 10,7°C
 - o la largeur du galet est la donnée qui est déterminante lors d'un passage dans un tamis
- Choix de l'endroit de mesure : repérage d'une paroi où à l'œil nu, on peut identifier 2 bandes de dépôt, correspondant à deux périodes de dépôt différentes, la bande supérieure étant postérieure. Sélection des lieux privilégiant les galets charriés, et non broyés au bas d'une faille, avec une forme ovoïde marquée et une taille permettant la mesure des 2 côtés (grosso modo).

- Sites choisis pour les mesures (Figure 20) :
 - o Salle des 2 Piliers (le 31/10) : mesures d'une banquette horizontale sur une largeur de 1,40 m.
 - o Salle de la Vire (le 31/10), 2 : mesures de 2 bandes de dépôt vertical, sur une largeur de 1,20 m (Figure 21, Figure 22)
- Mesure : A l'aide d'un mètre, gradué au dixième de centimètre : mesures des côtés visibles (nous avons choisi une méthode non destructive, garantissant la conservation de la disposition des galets. A contrario : on peut mesurer des petits ou grands côtés).

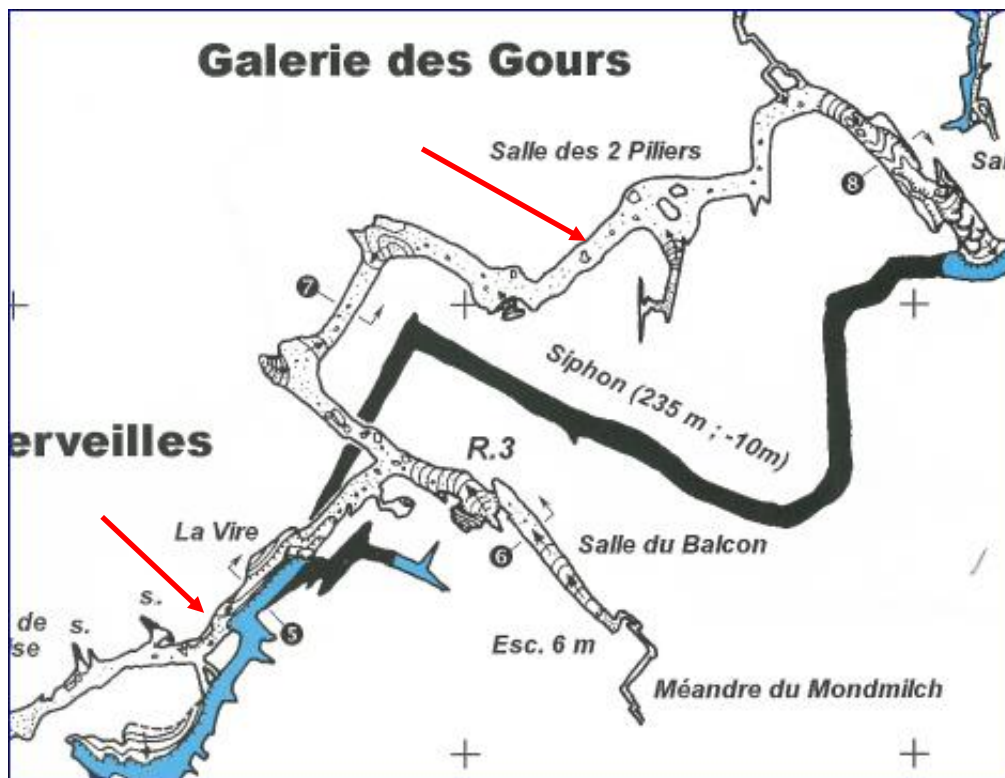


Figure 20 : localisation des mesures de taille des galets, équipe 2

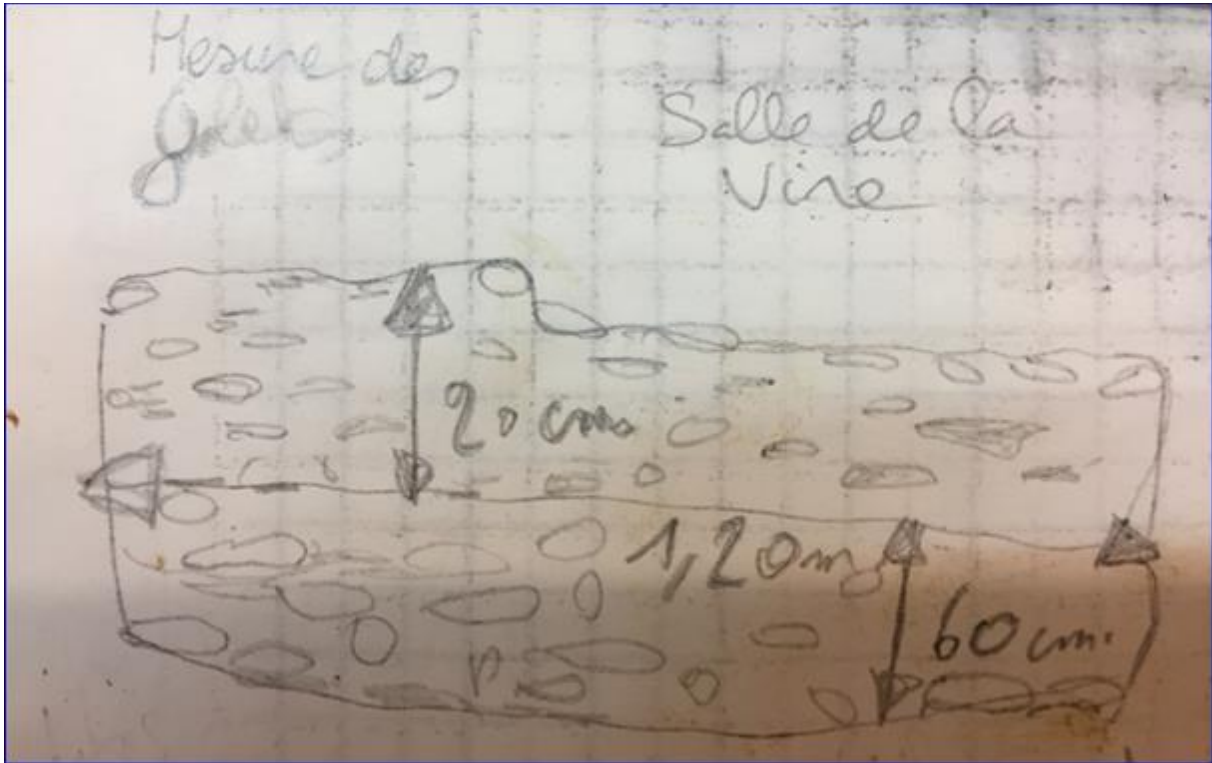


Figure 21 : schéma du panneau de galets observé à la salle de la vire (équipe 2)



Figure 22 : Photographie du panneau de galets observé à la salle de la vire (équipe 2)

b) Résultats de la salle de la vire : le 31 oct., 2 bandes de dépôt

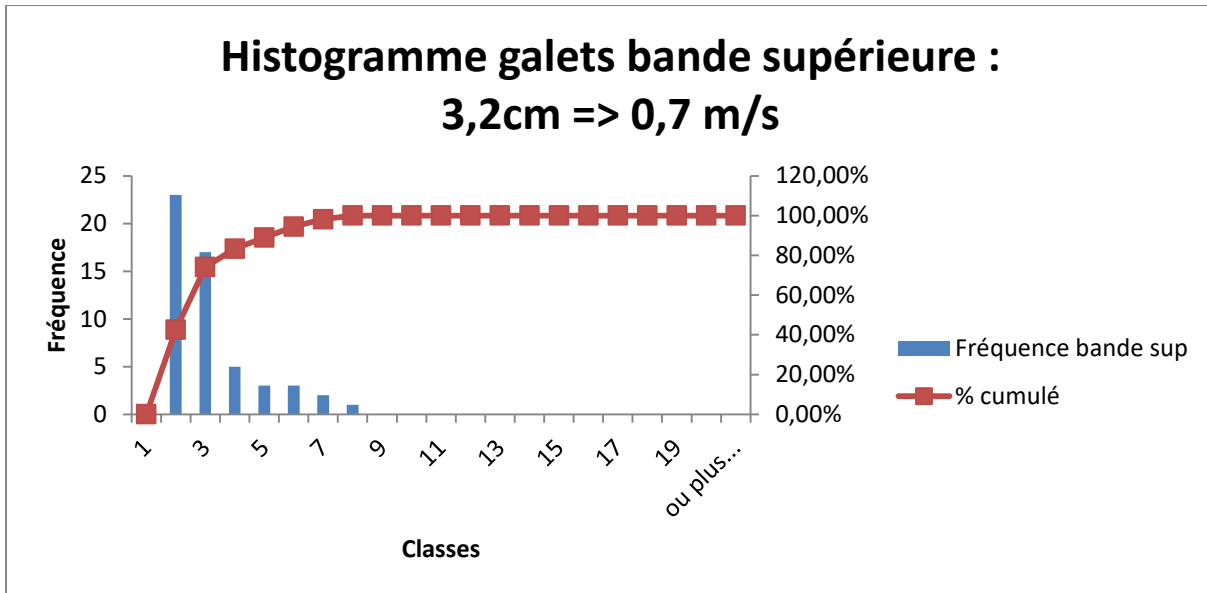


Figure 23 : histogrammes des tailles des galets, Salle de la Vire, bande supérieure (équipe 2)

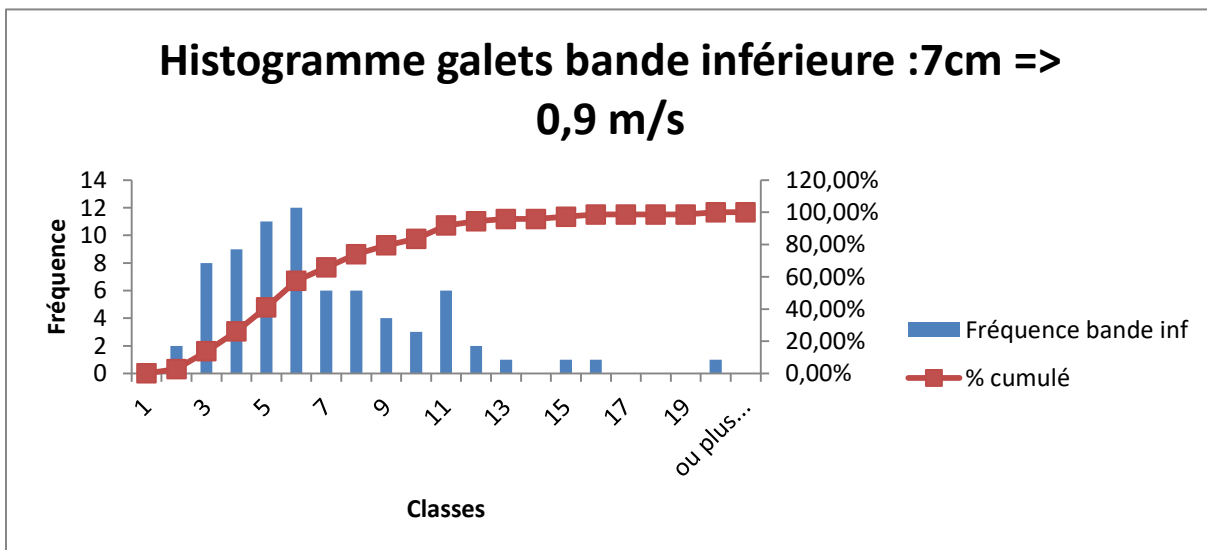


Figure 24 : histogrammes des tailles des galets, Salle de la Vire, bande inférieure (équipe 2)

Malgré des tailles de galets bien différentes sur les bandes (7 cm en bas, 3,2 cm en haut), les vitesses passées estimées sont relativement proches (0,9 m/s et 0,7 m/s).

Comme l'énergie est proportionnelle au carré des vitesses, la différence de forces de l'eau est moins importante que la différence des tailles de galets déplacés.

Nota. Nous avons remarqué sur le haut de la paroi à laquelle s'adosent les 2 dépôts, des coups de gouges de tailles significatives. Comme l'a fait remarquer Vincent, une mesure de ces coups de gouges pourrait éclairer les résultats trouvés avec les galets (si les deux formations sont de la même période). Nous ne l'avons pas fait car il était déjà tard !

c) Résultats de la salle des deux piliers : le 31 oct., une banquette de dépôt

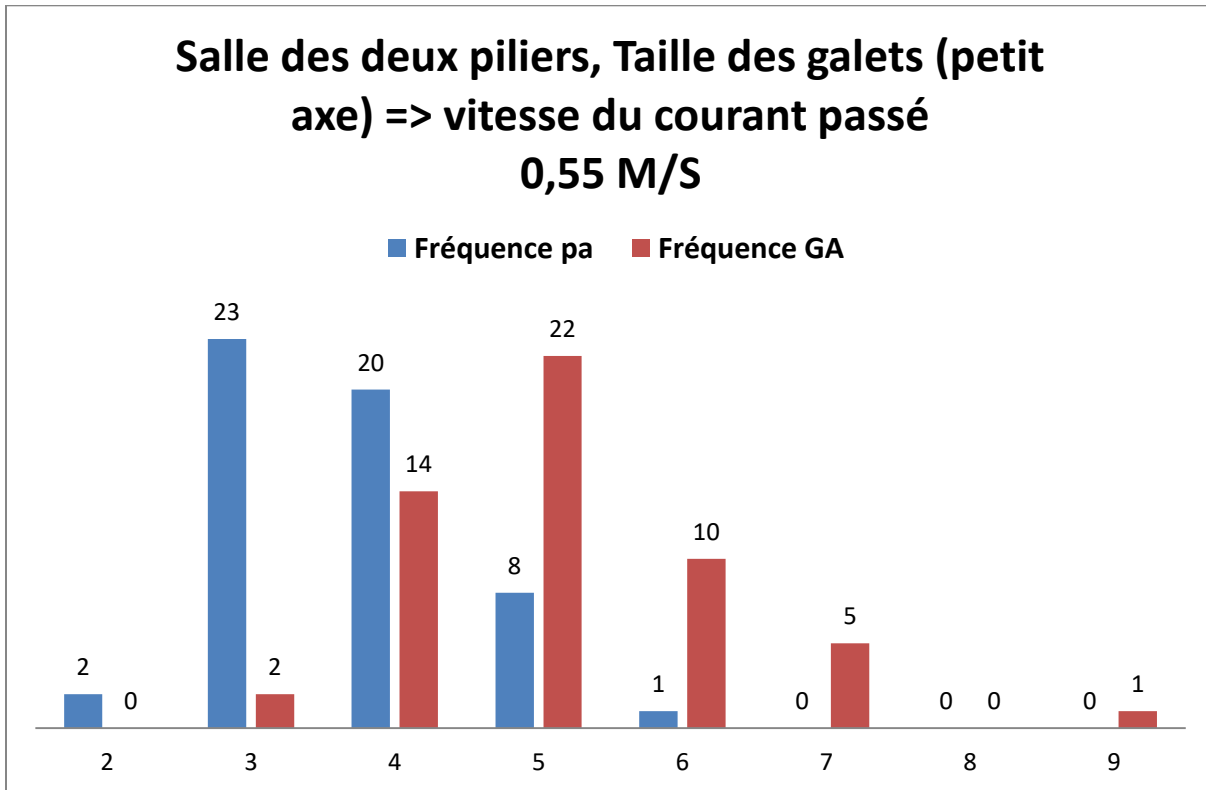


Figure 25 : histogrammes des tailles de galets, Salle des deux piliers (équipe 2)

On a mesuré les petits axes et grands axes des galets observés, mais retenu au final uniquement le petit axe, car on part du principe qu'une pierre pourra passer dans un tamis de cette taille. (Méthode de tri utilisé pour établir l'abaque de Hjulström).

4. Débit passé, méthode des coups de gouge (galerie nord)

Mesure d'un panneau de coups de gouge sur un panneau de 1m par 20 cm sur une paroi verticale (cf. Figure 26, localisation en Figure 28)

Interprétation : difficulté de connaître la température au moment de l'activité du cours d'eau, la valeur variant énormément en fonction de la température de la grotte. On propose donc 2 résultats selon 2 valeurs de température (10 ° et 0°).

5. Mesure de débit de petit cours d'eau, réseau nord (R2), par la méthode capacitive

Objectifs

Mesure de débit de petite capacité, et utilisation de la conductivité des cours d'eau pour les discriminer.

Lieux de mesure

Dans la galerie nord (Figure 28, Figure 29), un petit cours d'eau coule en fond de galerie. Il semble arroser le conduit de l'étranglement.

A une centaine de mètres dans la galerie nord, un petit affluent sort de la paroi. Quelques mètres en aval une vasque semble être alimentée par ce dernier.



Figure 26 : panneau de coups de gouge, réseau Nord (équipe 2)

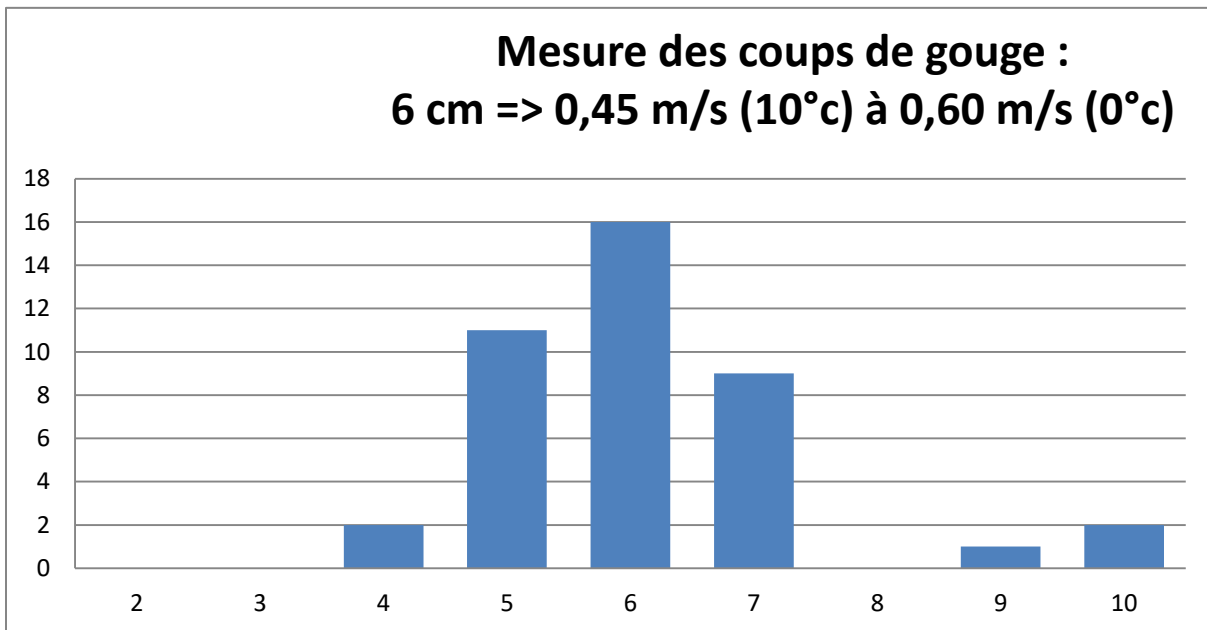


Figure 27 : histogramme des tailles de coups de gouge, réseau Nord (équipe 2)

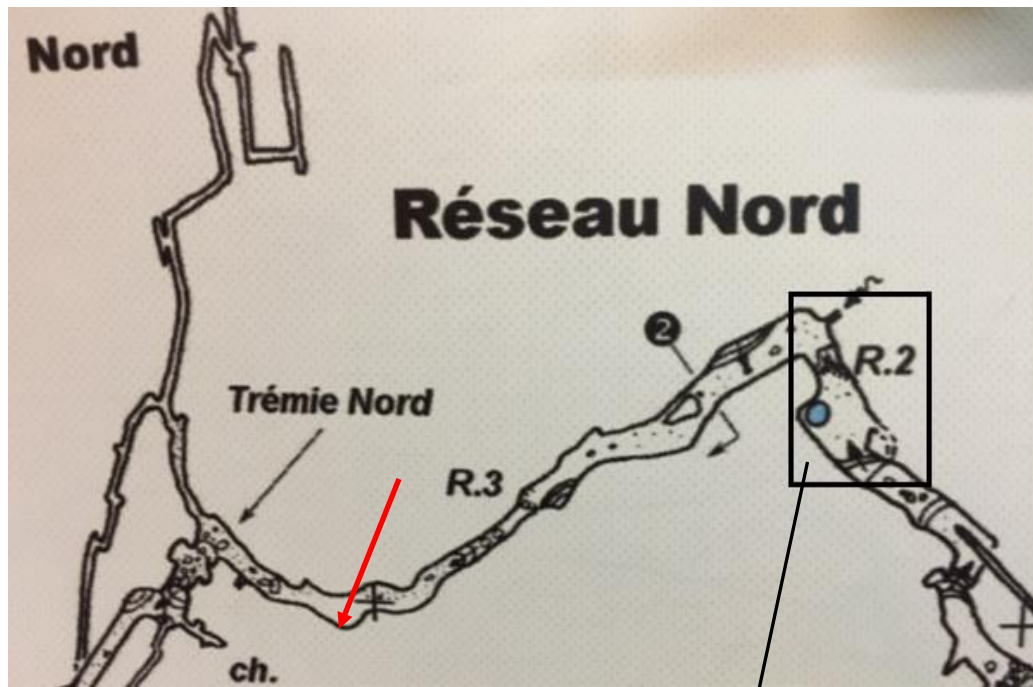


Figure 28 : localisation des mesures des coups de gouge (flèche rouge) et de l'affluent mesuré par la méthode capacitive (rectangle noir et Figure 28), équipe 2

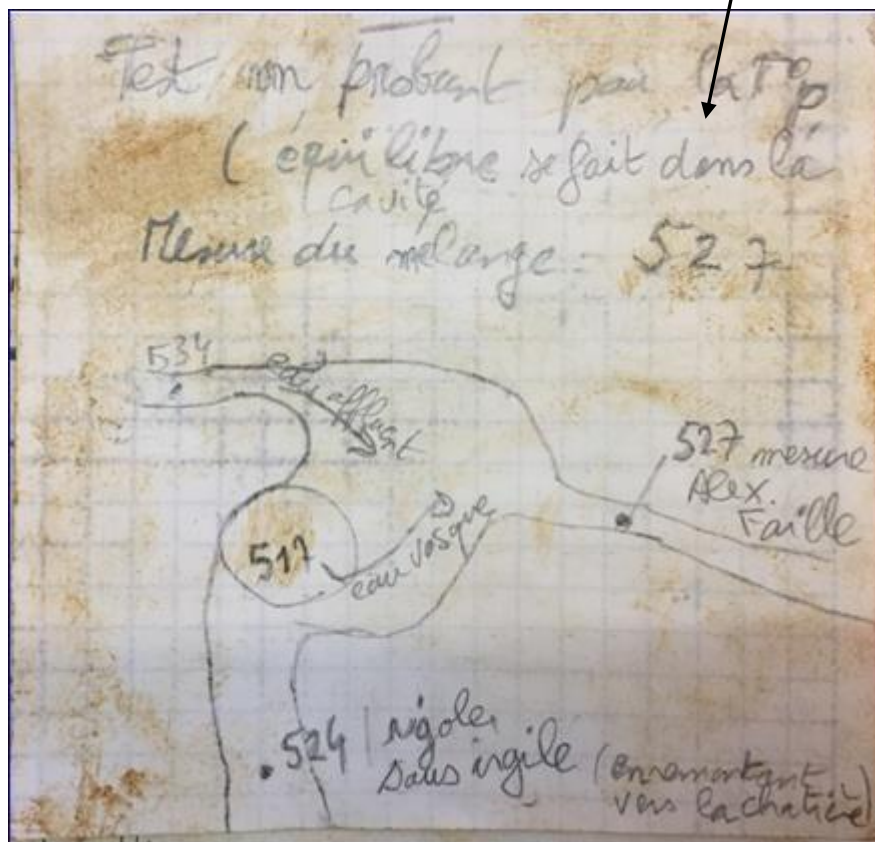


Figure 29 : schéma de localisation des mesures de conductivité dans le réseau nord (équipe 2)

Mesures effectuées dans le réseau nord

- Mesure de la conductivité de l'affluent : CA=534 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 12,3 °C
- Mesure de débit par durée de remplissage d'un bidon étanche (méthode capacitive, cours d'eau R2 en fond de galerie, petite cascade) : Nous avons réalisé trois mesures différentes de durée de remplissage, mais n'avons retenu 1 seule valeur (meilleur test) = 47secondes pour 4,5 l (trait inférieur du bidon). Soit un débit de 0,096 l/s.
- Mesure de la conductivité de la vasque bleue : CV=517 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 10,7 °C
- Mesure de la conductivité dans la faille : CP=527 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 10,7 °C

Conclusions : La vasque n'est pas constituée d'eau de remplissage de l'affluent. Elle est active (résurgence ?). Avec ces valeurs nous pouvons en déduire :

- les débits de la vasque : 0,067 L/s,
- le débit du cours d'eau aval : 0,163 L/s

$$D_{\text{Vasque}} = D_{\text{Afluent}} * (CP - CA)/(CV-CA).$$

Mesures effectuées dans la galerie des merveilles

Deux autres points de mesure de conductivité ont été réalisés :

- Eau d'écoulement le long d'une concrétion : 466 $\mu\text{S}/\text{cm}$
- Eau à l'entrée de la chatière 511 $\mu\text{S}/\text{cm}$

Conclusion : L'eau dans la chatière est sans doute constituée de la confluence du cours d'eau de la galerie nord et d'apport d'eau venant de la galerie des merveilles.

6. Mesure de débit au bouchon (base des puits)

Mesure du profil de la rivière : nous avons sélectionné la section la plus représentative de la portion de rivière (Figure 30) que nous avons retenue en raison de son profil laminaire.

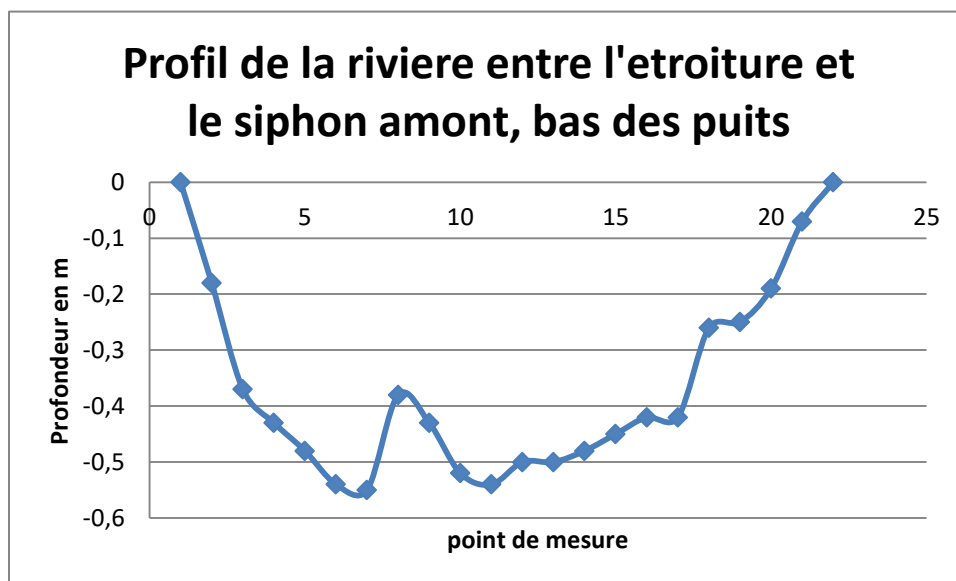


Figure 30 : profil de la rivière à la base des puits pour la mesure de débit aux flotteurs (équipe 2)

Estimation du profil réalisé à l'aide de 20 mesures de hauteur d'eau (pas de 30cm) sur une largeur de 4m.

- Longueur de la zone de mesure : 7 m => Volume 11,032 m³
- Durée moyenne mesurée : 43'23 (pour 10 bouchons)
- Débit obtenus après coefficient correcteur de 0,5 : 0,128 m³/s.

7. Mesure du débit au sel, bas des puits

Conditions opératoires

- Injection de 3 kg de sel 10m en amont de l'arrivée de la zone des puits
- Mesure de la conductivité : juste avant la dalle marquant l'emplacement de l'affluent de la chatière (Figure 31).
- Distance entre injection du sel et la mesure 60 m.
- Niveau de bruit de fond 608 (μS/cm).
- Mesure à un pas de temps minimum de 15 secondes.
- Etalonnage de l'appareil de mesure réalisé après les relevés (série d'éprouvettes de dissolution de sel de référence)



Figure 31 : mesure de conductivité lors du jaugeage au sel, rivière au départ de la chatière (équipe 2)

Résultats

Conc moyenne - BF (g/l)	0,01147134
V écoulé (l)	261521,3282
Débit (l/s)	147,8

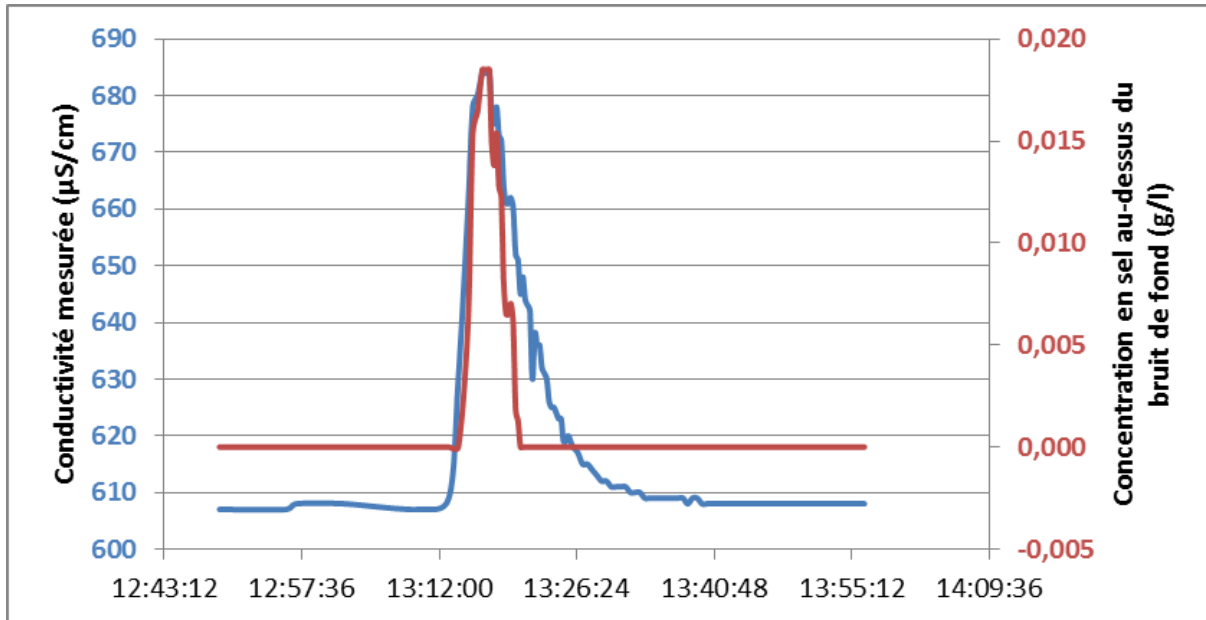


Figure 32 : évolution de la conductivité lors du jaugeage au sel à la base des puits

Interprétation

Notre débit estimé variait entre 100 et 300 litres. Nous n'avons sans doute pas assez injecté de sels car on s'éloigne peu du niveau de bruit relevé.

8. Mesure du débit avec sel et fluorescéine simultanément, rivière des gours

Conditions opératoires

- Injection de 10kg de sel et de 7 doses de 0.99g de fluo, 3m en amont de l'arrivée de la galerie des gours
- Mesure de la conductivité et de la fluorescence: au début du pont de singe
- Niveau de bruit de fond 602 ($\mu\text{S}/\text{cm}$) et 6 ($\mu\text{g}/\text{l}$),
- Mesure à un pas de temps minimum de 1 minute (fluo) et 1 seconde (conductivité).



Figure 33 : préparation de la solution de sel et de fluorescéine, rivière des gours (équipe 2)

Avant et après le monstre vert !



Figure 34 : avant l'injection de la solution de sel et de fluorescéine dans la rivière, à la base de la galerie des gours (équipe 2)



Figure 35 : après l'injection de la solution de sel et de fluorescéine dans la rivière, à la base de la galerie des gours (équipe 2)

Résultats

Conc moyenne - BF (g/l)	0,013233786
V écoulé (l)	755641,6634
Débit (l/s)	89,5

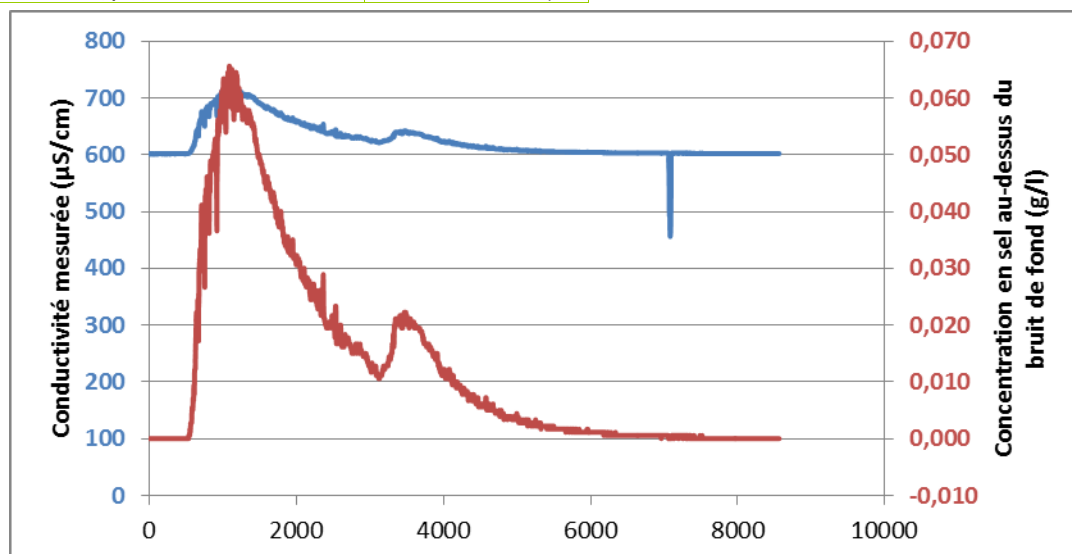


Figure 36 : évolution de la conductivité lors du jaugeage au sel dans la rivière des gours

Conc moyenne - BF (g/l)	0,0000
V écoulé (l)	445308,9628
Débit (l/s)	88,9
Restitution (g)	6,9

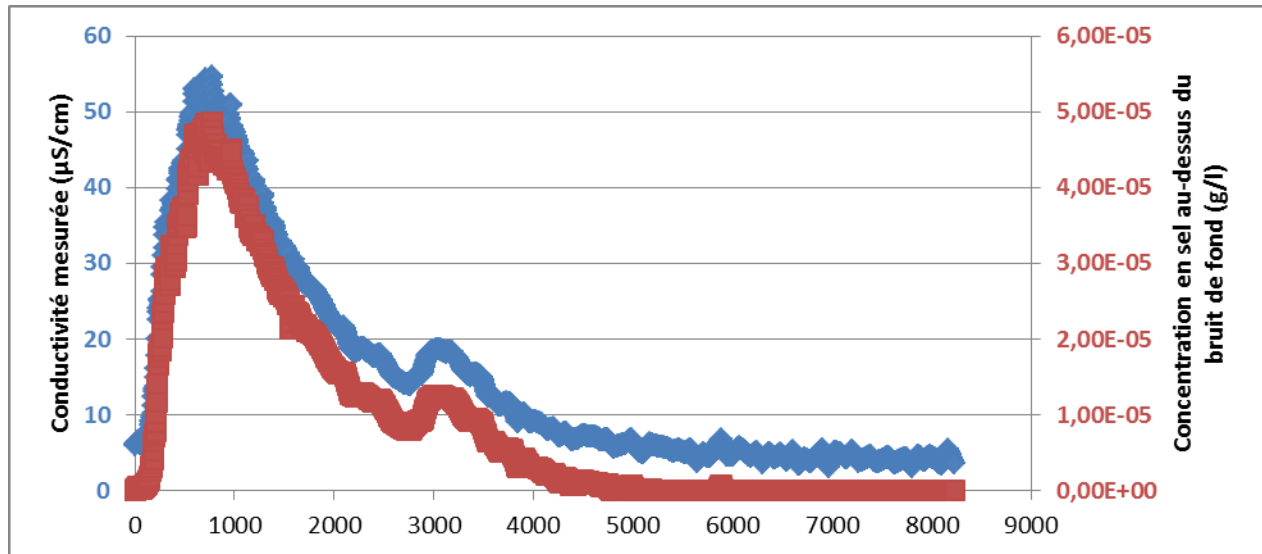


Figure 37 : évolution de teneur en fluorescéine lors du jaugeage au sel à la base des puits

Interprétation

L'augmentation (massive !) des doses injectées par rapport au volume de la veille a permis d'augmenter la précision des mesures (meilleure résistance à l'erreur du bruit de fond). Le rebond secondaire est sans doute dû au fait d'avoir brassé le fond de la rivière après le passage du pic principal.

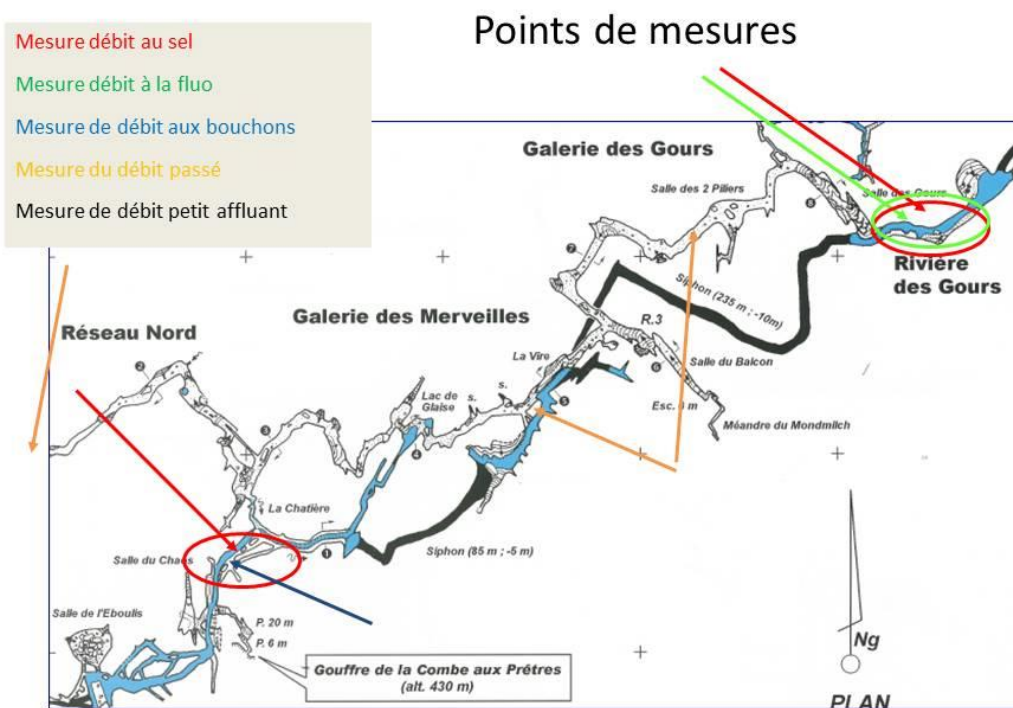
L'écart obtenu avec les deux méthodes est minime (moins de 1% d'écart), preuve de la bonne précision de nos mesures (!).



Figure 38 : collecte des mesures lors des jaugeages au sel et à la fluorescéine, rivière des gouts, au pont de singe

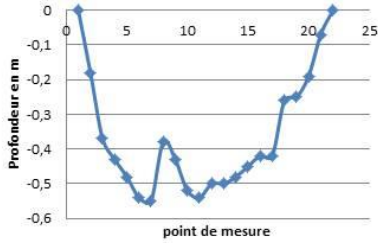
9. Restitution des résultats

Restitution équipe 2

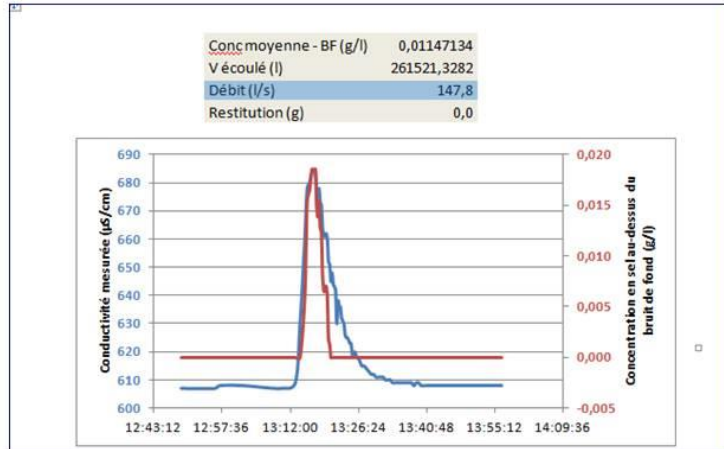


Débit bas des puits le 30/10/2016 (hauteur eau 8cm)

Résultat mesure aux
bouchons
→ 128 l/s

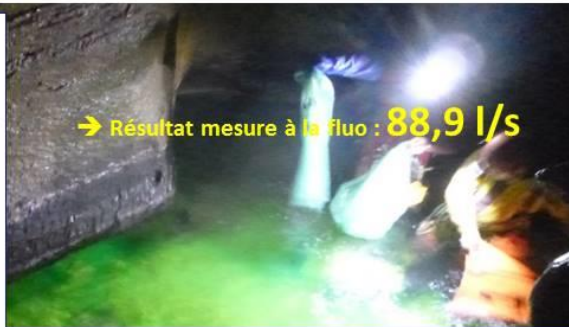
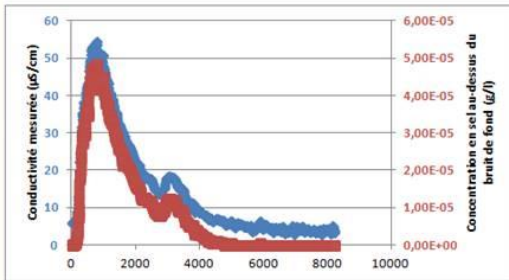


Résultat mesure au sel → 148 l/s



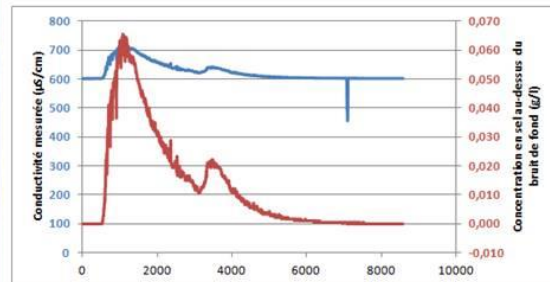
Débit rivière des gours le 31/10/2016 (hauteur eau < 8cm)

Conc moyenne - BF (g/l)	0,0000
V écoulé (l)	445308,9628
Débit (l/s)	88,9
Restitution (g)	6,9



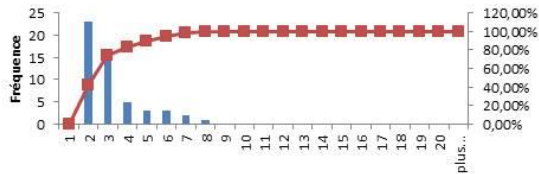
Conc moyenne - BF (g/l)	0,013233786
V écoulé (l)	755641,6634
Débit (l/s)	89,5
Restitution (g)	10000,0

Résultat mesure au sel : 89,5 l/s →



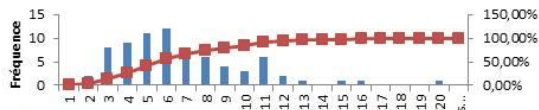
Débits passés , mesure de vitesse de courant par la taille des galets

Histogramme galets bande supérieure :
3,2cm => 0,7 m/s



→ Résultat mesure B Sup: **0,7 m/s**

Histogramme galets bande inférieure : 7cm
0,9 m/s

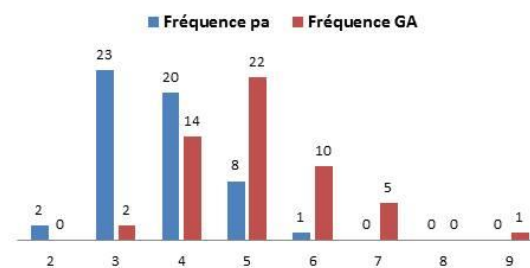


→ Résultat mesure B inf: **0,9 m/s**



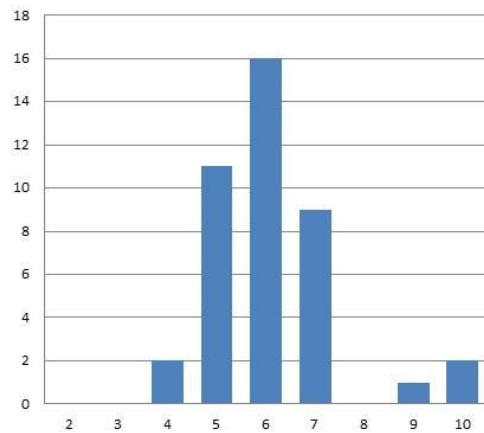
Résultat mesure : **0,55 m/s** →

Salle des deux piliers , Taille des galets (petit axe) => vitesse du courant passé
0,55 M/s



Débits passés , mesure de vitesse de courant Par la taille des coups de gouges

Mesure des coups de gouge :
6 cm => 0,45 m/s (10°C) à 0,60 m/s (0°C)



Résultat mesure : **0,45 m/s (10°C) à 0,60 m/s (0°C)**

Mode opératoire pour des débits passés via la mesure des galets

Objet : mesurer le débit passé qui a amené au déplacement puis dépôt des galets sur les parois d'une galerie

Choix de l'endroit de mesure : repérage d'une paroi où à l'œil nu, on peut identifier des galets (éléments plutôt arrondis sans arrête saillante qui ont été transportés par l'eau) : sélectionner un lieu privilégiant les galets charriés, et non broyés au bas d'une faille, avec une forme ovoïde marquée et une taille permettant la mesure.

Relevé de façon systématique la dimension des galets dans la zone choisie . suivant les cas on pourra noter les 3 dimensions , ou uniquement les dimensions mesurables.

Mesure : à l'aide d'un mètre, gradué au dixième de centimètre, mesure des côtés visibles (choix d'une méthode non destructive, garantissant la conservation de la disposition des galets observée et mesurée)

Ensuite , faire la moyenne des mesures que l'on reportera sur l'abaque de Hjulstrom pour obtenir la vitesse de courant passé.

Mode opératoire pour mesurer un débit avec la méthode d'injection de fluorescéine

Objet : mesure le débit d'un cours d'eau.

Hypothèse : le débit estimé du cours d'eau permet de définir la dose de fluorescéine à injecter.

Appareil de mesure : fluorimètre .

Principe :

Choisir un point d'injection qui soit suffisamment éloigné du point de mesure afin de respecter la distance de bon mélange (au moins 20 fois la largeur de la galerie).

Choisir un point de mesure suffisamment confortable pour pouvoir faire des mesures durant plusieurs heures.

Installer les sondes loin des perturbations (bord, zone morte etc.)

Au point de mesure étalonner le 0 de l'appareil en mesurant le niveau de bruit de fond (respecter la procédure fournie avec l'appareil).

Noter le niveau de bruit au point d'enregistrement .

Préparer l'injection en utilisant au moins 1g de Fluo par tranche de 100l/s de débit.

Configurer le pas de mesure de l'appareil en fonction de la durée d'enregistrement souhaitée.

Démarrer les mesures de fluorescence

Injecter le produit au lieu prévu

Continuer les mesures jusqu'à atteindre le niveau de bruit.

Une feuille Excel permettra de recouper le résultat de la mesure.

C. Equipe 3 (Clément Le Disquay, Céline Milaszewicz, Lucie Richier)

1. Introduction

Dans le cadre du stage organisé par le Comité spéléologique d'Ile de France et la Fédération Française de Spéléologie, en partenariat avec Andra, nous avons expérimenté un certain nombre de méthode de mesures de débit d'eau en milieu souterrain. Cette étude a été faite dans le réseau souterrain de Francheville, à la Combe au prêtre et la Rochotte du 29 octobre au 1^{er} Novembre 2016. La météo était favorable avec de très faibles précipitations sur le mois précédent. Le niveau d'eau était donc relativement faible : 9cm sur l'échelle située en bas des puits. Les modes opératoires ainsi que les résultats et leurs interprétations sont présentés ci-dessous.

L'objectif de notre groupe était de tester tous les modes opératoires réalisables, et d'étudier plus précisément la méthode des flotteurs. Nous nous sommes concentrés sur le réseau Ben, et le réseau Nord. Une étude hydraulique a également été réalisée dans la rivière de la combe au prêtre, après « la chatière », par absence de lieu propice à cette étude dans nos zones d'études.

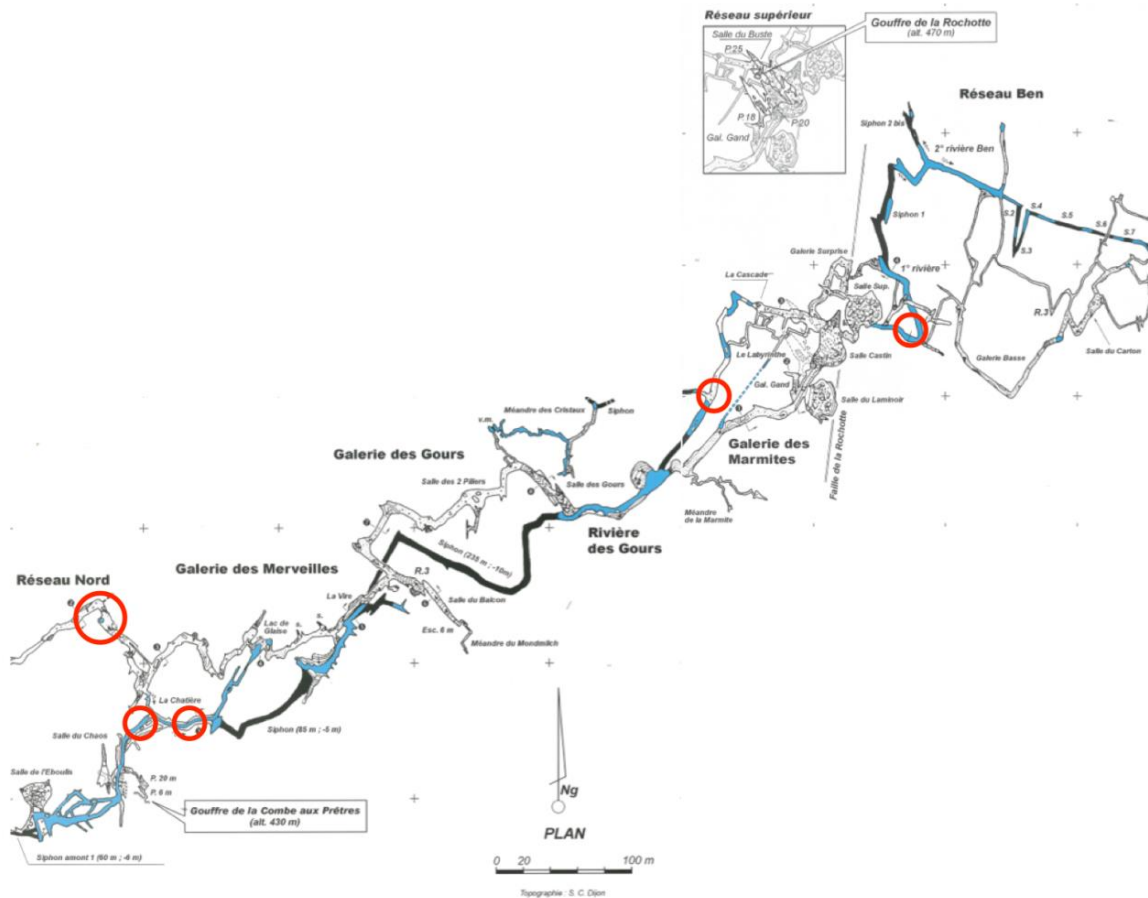


Figure 39 : plan du réseau de Francheville (partie pénétrable) et localisation des points de mesure de l'équipe 3

En termes d'organisation, les objectifs ont été fixés d'un jour sur l'autre, en prenant en compte les possibilités des différentes zones d'exploration. Certains ont dû être reportés au lendemain (expérimentation de la méthode hydraulique) car non réalisable dans la zone explorée.

2. Expérimentations

a) Réseau Ben : Première Rivière

Méthode au sel et fluorescéine

Objectif : avoir une estimation du débit de la rivière à cet endroit

Méthode générale: On a repéré une zone propice à la mesure : section réduite, vitesse importante et remous. Après estimation du débit à l'œil (180l/s), on a versé 5kg de sel et 1g de fluo dans la rivière. Les sondes de mesures en acquisition automatique (zone A) étaient disposées à 50m de la zone de largage (zone B).

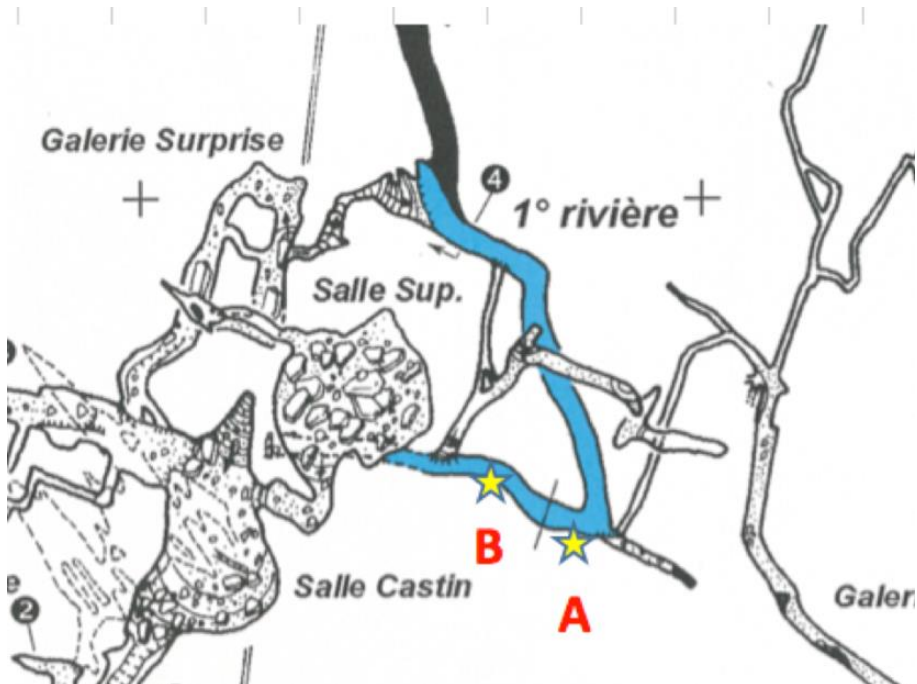


Figure 40 : Localisation des points d'injection (sel et fluorescéine) et restitution dans le réseau Ben (équipe 3)

Résultats : On a obtenu la conductivité avec un pas de temps de 1s et la fluorescence toutes les minutes. Les résultats sont présentés graphiquement ci-dessous.

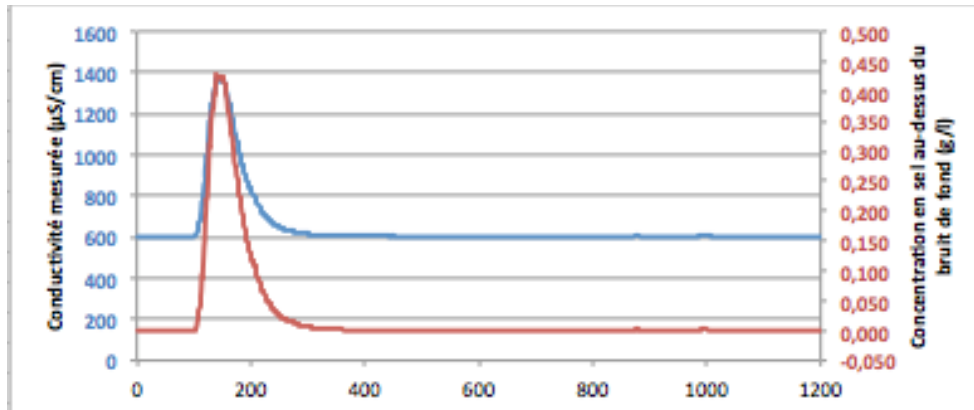


Figure 41 : restitution de sel lors du jaugeage dans le réseau Ben (équipe 3)

On en déduit un débit de :

- 169,6 l/s avec le sel
- 199 l/s avec la fluorescéine

Remarques : Les débits obtenus sont très différents (30 l/s de différence pour des méthodes qui sont censées être précises (de l'ordre du l/s). Cette différence s'explique par le pas de temps d'acquisition du fluorimètre trop important. La minute n'est pas suffisante pour observer le pic de fluorescence pour la section étudiée. Il faudrait refaire cette mesure avec un pas de temps à la seconde. Cependant le matériel ne le permet pas, une acquisition manuelle toutes les 5s est envisageable.

Le débit estimé à l'œil est très proche de celui effectué par la mesure au sel.

Mesure aux flotteurs

Objectif : déterminer le débit de la rivière et le comparer à celui obtenu par les méthodes précédentes.

Méthode générale : on sélectionne une portion de la rivière avec une section constante que l'on mesure pour obtenir un profil. On lâche les flotteurs et on les chronomètres afin de déterminer leur vitesse (et donc la vitesse de l'eau).

Résultats : On obtient un profil de la rivière tel que ci-dessous qui représente une section de 0,82 m²

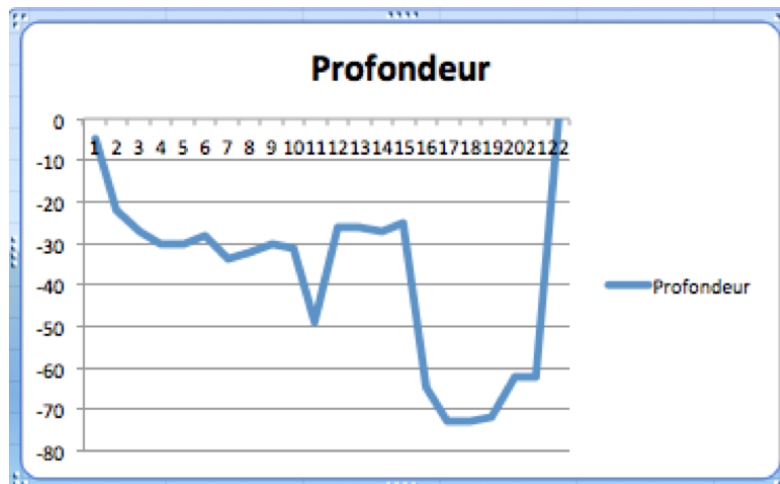


Figure 42 : section pour la mesure du débit aux flotteurs, réseau Ben (équipe 3)

On a moyenné les vitesses obtenues pour les 20 flotteurs. On obtient ainsi un débit de 320 l/s

Remarques : le débit obtenu est bien supérieur à celui observé via la méthode au sel (mesure de référence). Ceci s'explique par la perte de charge due aux frottements. On la modélise par un coefficient de frottement k tel que $v_{\text{eau}} = k \cdot v_{\text{flotteurs}}$ et donc $D_{\text{eau}} = k \cdot D_{\text{flotteurs}}$. La littérature donne un coefficient de 0,4. Nous avons obtenu quant à nous un coefficient de 0,6 qui correspond donc à une section relativement étroite, et des variations importantes de la profondeur dues à l'irrégularité du fond.

b) Aval du siphon du pont du singe

Mesure des galets

Objectif : déterminer la vitesse passée de la rivière souterraine

Méthode générale : on a mesuré 50 galets sur une zone délimitée. Via les courbes de Hjulström, on en a déduit une estimation de la vitesse passée.

Résultats : Pour les différentes dimensions, on a moyenné sur l'ensemble des valeurs mesurées. On a obtenu via l'abaque de Hjulström, des vitesses égales à :

- longueur : 10,5 cm/s
- largeur : 10,4 cm/s
- épaisseur : 0 cm/s

Remarques : Les valeurs obtenues pour la longueur et l'épaisseur sont sensiblement les mêmes. En revanche celle obtenue pour l'épaisseur est bien inférieure. Il paraît logique de prendre uniquement la longueur (ou la largeur), car les galets se déposent à l'horizontale.

En ce qui concerne le débit, il est très difficile de l'estimer correctement car il n'y a aucun moyen de connaître la section de la rivière à l'époque. On doit donc l'estimer à partir des indices géologiques présents, mais l'approximation est grande. Ce travail n'a pas été réalisé dans cette zone.

c) Réseau Nord

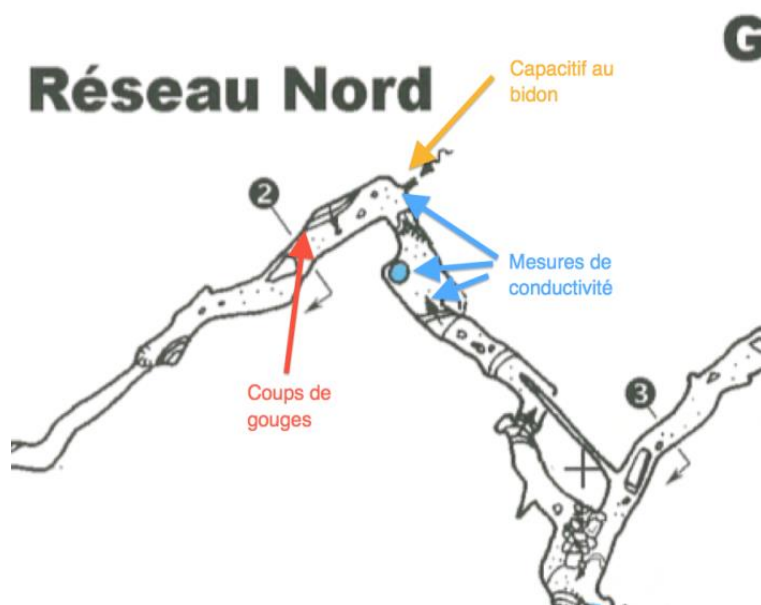


Figure 43 : localisation des points de mesure dans le réseau Nord (équipe 3)

Capacitive

Objectif : obtenir le débit de l'affluent

Méthode : on a trouvé une chute d'eau et on a positionné un bidon sous la cascade. On a mesuré le volume récolté en 1 minute.

Résultat : au cours des 4 essais le bidon s'est rempli à hauteur de 5l. Ce qui nous donne un débit total de 0,08 l/s

Remarques : la méthode est très approximative car il y a des pertes d'eau au cours de la mesure. Mais cela permet de donner rapidement une bonne estimation du débit à partir de moyens simples (un bidon suffit).



Figure 44 : mesure de débit capacitive, réseau Nord (équipe 3)

Coups de gouge

Objectifs : déterminer le débit passé de la rivière aujourd'hui à sec.

Méthode : On a mesuré la longueur des coups de gouge à l'aide d'un décimètre sur 2 échantillons d'une cinquantaine de coup de gouge sur 1 m² environ. On obtient la vitesse en passant par l'abaque de Curl. La section passée a été estimée à 2 m².

Résultat : Pour le premier échantillon, et en supposant que la température de l'eau à l'époque était de 10° comme aujourd'hui (milieu souterrain), on obtient une vitesse de 70 cm/s avec un intervalle de confiance compris entre 50 et 95 cm/s du fait de l'écart-type observé sur la taille des coups de gouge. Pour le deuxième échantillon situé 50cm au-dessus du premier, on obtient une vitesse de 100cm/s pour un intervalle de 90 à 105 cm/s. Soit des débits respectifs de 1,4 m³/s et de 2 m³/s.

Remarques : On observe une différence de débit entre les deux époques (identifiées par des différences de niveau. Cependant cette méthode est très approximative et basée sur différentes hypothèses difficilement vérifiables : la température de l'eau à cette époque, et la taille de la section qui ne peut être évaluée qu'à partir des indices géologiques visibles aujourd'hui.



Figure 45 : mesure de la longueur des coups de gouge, réseau Nord (équipe 3)

Conductivité et évaluation de débits

Objectifs : déterminer l'origine de l'eau en sortie du réseau nord et le comparer à celui observé dans la chatière.

Méthode : On mesure la conductivité de l'eau sur 5 différents endroits à l'aide d'un conductimètre.

Résultats : On obtient les résultats présentés ci-dessous en μS .

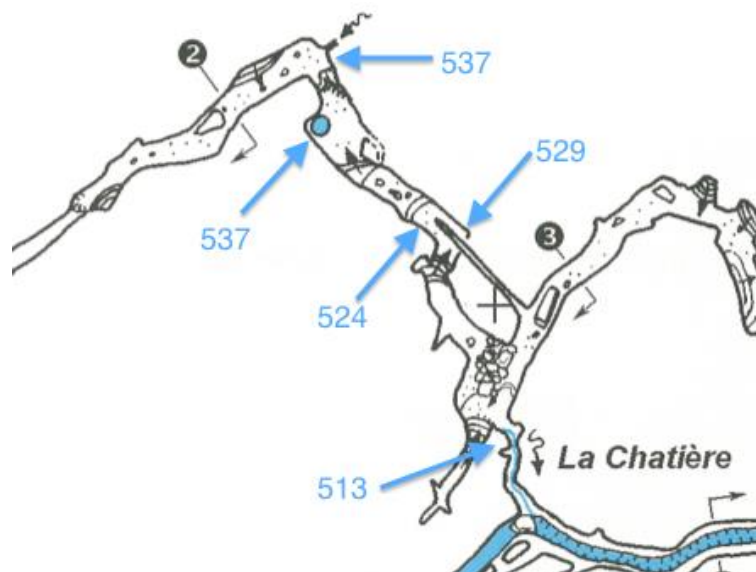


Figure 46 : mesures de conductivités dans des points d'eau du réseau Nord (équipe 3)

Remarques : On observe des variations légères dans la conductivité de l'eau. Celle de la vasque est inférieure à celle de l'affluent et de l'aval. On peut donc supposer qu'il s'agit d'une autre arrivée d'eau dans le réseau, dont le débit peut être déterminé à partir du débit de l'affluent calculé via la méthode capacitive.

En combinant ces deux résultats, on en déduit :

- débit aval = débit arrivée * (conductivité arrivée - conductivité vasque)/(conductivité aval - conductivité vasque) = 0.11 l/s
- débit vasque = débit aval - débit arrivée = 0,03 l/s

Pour les mesures plus loin en aval, la conductivité varie. On ne peut donc pas savoir s'il s'agit du même cours d'eau et qu'il y a d'autres arrivées, ou s'il s'agit d'un cours d'eau totalement indépendant.

d) Zone des rivières avant la chatière

Hydraulique

Objectif : mesurer le débit de la rivière à l'aide d'une méthode hydraulique

Méthode : on identifie l'horizontal à l'aide d'un laser, puis on mesure la hauteur par rapport au déversoir. On mesure aussi la section du déversoir.



Figure 47 : localisation et photographie du déversoir utilisé pour la méthode hydraulique, rivière à la base des puits (équipe 3)

Résultats : Le positionnement du laser à l'horizontal a été très compliqué. Le trépied est très peu réglable verticalement et il n'y a pas assez de pente pour pouvoir le positionner correctement. On a également essayé de suspendre le laser au plafond, mais il ne semble pas pouvoir déterminer l'horizontal dans cette position. En conséquence, la méthode hydraulique n'est pas applicable dans ce genre de situation.

On a essayé de le faire avec une méthode approximative, sans identifier l'horizontal à l'aide du laser, mais en la mesurant à l'aide d'un décimètre et en estimant l'horizontal à l'œil, et la

section du déversoir. On considère des sections rectangulaires sur des portions données. On obtient un débit de 309l/s.

Remarques : Cette méthode est peu applicable sur le terrain, à cause de :

- non régularité du déversoir
- difficulté à fixer le laser à l'horizontal

Le résultat obtenu est de l'ordre du débit observé, mais avec un facteur 2. C'est donc une méthode très approximative et qui est peu efficace lorsque le terrain n'est pas adapté (déversoir non idéal).

Flotteurs

Objectif : identifier la méthode optimale pour mesurer les débits avec des flotteurs et déterminer le coefficient de frottements

Méthode : on a utilisé la méthode des flotteurs pour deux tailles de flotteurs différents vides et remplis d'eau (donc flottant à la surface ou sous la surface de l'eau) pour un échantillon de 20 mesures par type. La section étudiée est quasiment constante et d'une longueur de 3,90m. Les flotteurs ont été lancés un mètre en amont du point de départ et tout au long de la section afin d'avoir un champ de vitesse global.



Figure 48 : localisation de la station de mesure aux flotteurs, rivière à la base des puits (équipe 3)

Résultats : La section de la rivière est la suivante :

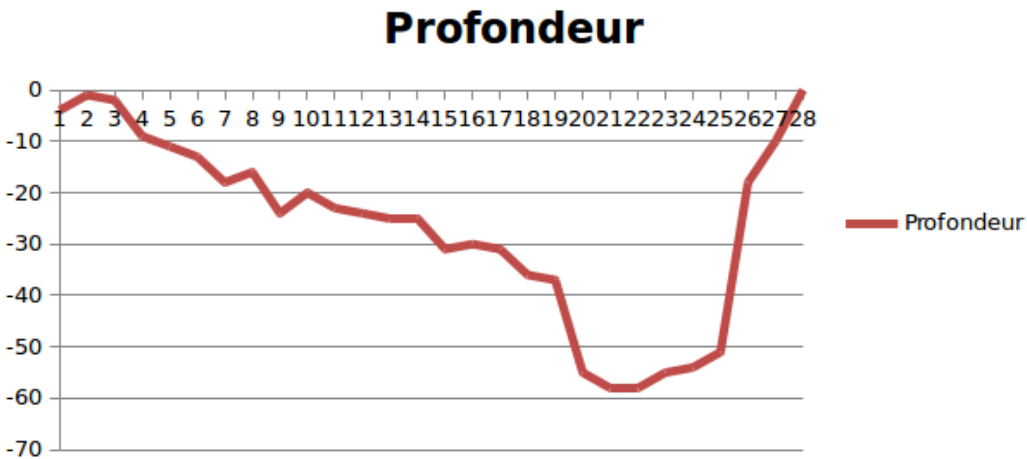


Figure 49 : section de la rivière pour la mesure de débit aux flotteurs, rivière à la base des puits (équipe 3)

Pour calculer la section, on a testé plusieurs méthodes :

- modélisation par formes simples : ici un triangle et un rectangle (Figure 50) → 1,07 m²
- approximation par la méthode des rectangles, inférieurs et supérieurs → 0,739 et 0,735 m²
- approximation par la méthode des trapèzes → 0,737 m²

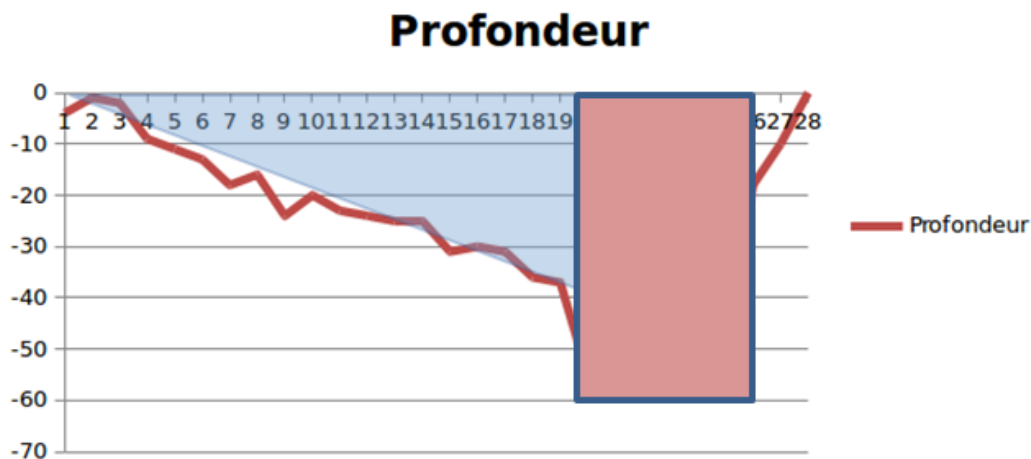


Figure 50 : calcul de la section par modélisation en formes simples, pour la mesure de débit aux flotteurs, rivière à la base des puits (équipe 3)

Les vitesses observées avec les différentes formes de flotteurs sont similaires, de l'ordre de 0,23 m/s. En considérant la surface obtenue via la méthode des trapèzes (plus précise), on obtient un coefficient de frottement de 0,8 en se basant sur le débit au sel obtenu par une autre équipe dans cette zone.

Remarques : Le choix du flotteur (taille et poids) n'a pas d'influence significative sur les mesures de vitesse. A noter cependant qu'un petit flotteur sous la surface de l'eau a plus tendance à se coincer que les autres. Il est donc préférable de prendre des flotteurs vides.

Le coefficient de frottement obtenu pour cette section est supérieur à celui obtenu dans la zone de la rivière Ben. Ceci s'explique par la forme du fond qui était beaucoup plus égale lors de cette mesure, et l'eau qui était moins agitée (il y a donc moins de pertes par frottement).

3. Conclusion

Lors de ce stage, nous avons testé de nombreuses méthodes pour calculer des débits d'eau actuels et passés. Certaines méthodes sont plus ou moins fiables, et faciles à mettre en œuvre. La question la plus importante à laquelle il faut répondre avant de faire une quelconque mesure est que-est ce qu'on veut mesurer, et avec quelle précision. De plus certaines méthodes ne sont pas applicables partout, et nécessitent qu'un certain nombre de conditions soient respectées. Par exemple, pour utiliser la méthode hydraulique, il faut un déversoir, ou pour les flotteurs une section constante avec un écoulement relativement laminaire.

En ce qui concerne le calcul de débits passés, les mesures sous terre sont faciles, mais les méthodes sont très approximatives et nécessitent une bonne lecture du terrain afin d'estimer la section passée du cours d'eau via des indices géologiques.

On remercie tous les encadrants de ce stage et nos co-stagiaires pour la bonne humeur et l'implication.

IV. MODES OPERATOIRES

A. Jaugeage estimatif (Vincent Schneider)

Avant tout jaugeage par des méthodes éprouvées, il est nécessaire d'estimer le débit du cours d'eau, sans utiliser de moyen de mesure étalonné. Cela permet de s'exercer à cette estimation, pour les nombreuses fois où les matériels de mesure ne sont pas utilisables. Il faut tout de même un minimum d'informations semi-quantitatives, qui permettront notamment d'estimer : la largeur du cours d'eau, sa profondeur moyenne, la vitesse moyenne.

Pour les plus frileux(es) ces estimations seront rendues difficiles sans se mouiller un peu et « sentir » le cours d'eau. Alors en dernier recours, si les conseils ci-dessus ne sont pas couronnés de succès, ou pour maîtriser davantage cette méthode, l'opérateur est invité à se référer à la norme UNM 00-001 de l'AFNOR « Système d'unités pifométriques ». Il y trouvera quelques unités de mesure, et au pire, un peu de réconfort : « *Le pifomètre, instrument personnel comme il a été précisé, n'est en vente nulle part, bien entendu. Il est d'une remarquable justesse et d'une sensibilité inégalable : jamais personne n'a eu besoin d'un pifomètre à vernier, encore moins d'un pifomètre à vis micrométrique. L'instrument de base issu de la pifogénèse suffit en toute occasion.* ».

Cette science, ô combien inexacte, revêt tout de même quelques principes :

« Premier principe : Le pifomètre est strictement personnel, inaliénable, consubstantiel à l'individu et inutilisable par autrui. EXEMPLE : La notion de pétaouchnock évoque, selon le cas, le hameau voisin pour l'autochtone rural, une ville du Nord pour le juge méridional, ou une capitale africaine pour le normalisateur parisien.

Deuxième principe : Deux pifômes de sens contraire ne s'annulent pas. EXEMPLE : Les deux expressions "Ça fait une plombe que je t'ai dit de me remettre ton rapport !" et "Ça ne fait pas une plombe que tu m'as remis ton rapport !" indiquent de façon identique qu'un subordonné va bientôt se faire remonter les bretelles par son chef pour peu que celui-ci prenne le temps de jeter un œil sur son rapport bâclé.

Troisième principe : Il n'y a rien d'intéressant à tirer d'une moyenne pifométrique. EXEMPLE : La moyenne entre le bon bout de chemin et le sacré bout de chemin est calculée comme étant le sacré bon bout de chemin, ce qui n'apporte aucune information supplémentaire quant à la longueur réelle du chemin. ».

Il est tout à fait compréhensible que l'opérateur pourrait être dérouté par tant de termes et de règles alors que les activités du présent stage ne méritent de regarder que quelques paragraphes :

- 4.1 - Unités de quantité (ex : palanquée, flopée, bézef, ...)
- 4.2 - Unités de valeur (ex : la roupie de sansonnet)
- 4.3 - Unités d'estimation et d'ajustage (ex : au pif, à vue de nez, ...)
- 4.4 - Unités de longueur et de distance (ex : le bout de chemin, pétaouchnok)
- 4.5 - Unités de temps (ex : le bout de temps, le bail, ...)
- 4.6 - Unités de vitesse (ex : de ces vitesses)
- 4.9 - Unités diverses (ex : giclée)

Attention pour le débit une légère complexité est à introduire puisqu'il faut multiplier une unité de quantité par une unité de temps. Exemple : « il y a eu une sacrée flopée de flotte qui a mis un bail à passer. »

B. Jaugeage capacitif (Vincent Schneider)

1. Conditions d'utilisation

Ce type de jaugeage est plutôt destiné à des débits faibles, de l'ordre de 1 à 2 litres par seconde au maximum. Il faut que la source d'eau à jauger soit de préférence non ruisselante pour pouvoir la dévier aisément et en totalité dans le récipient de mesure

2. Matériel

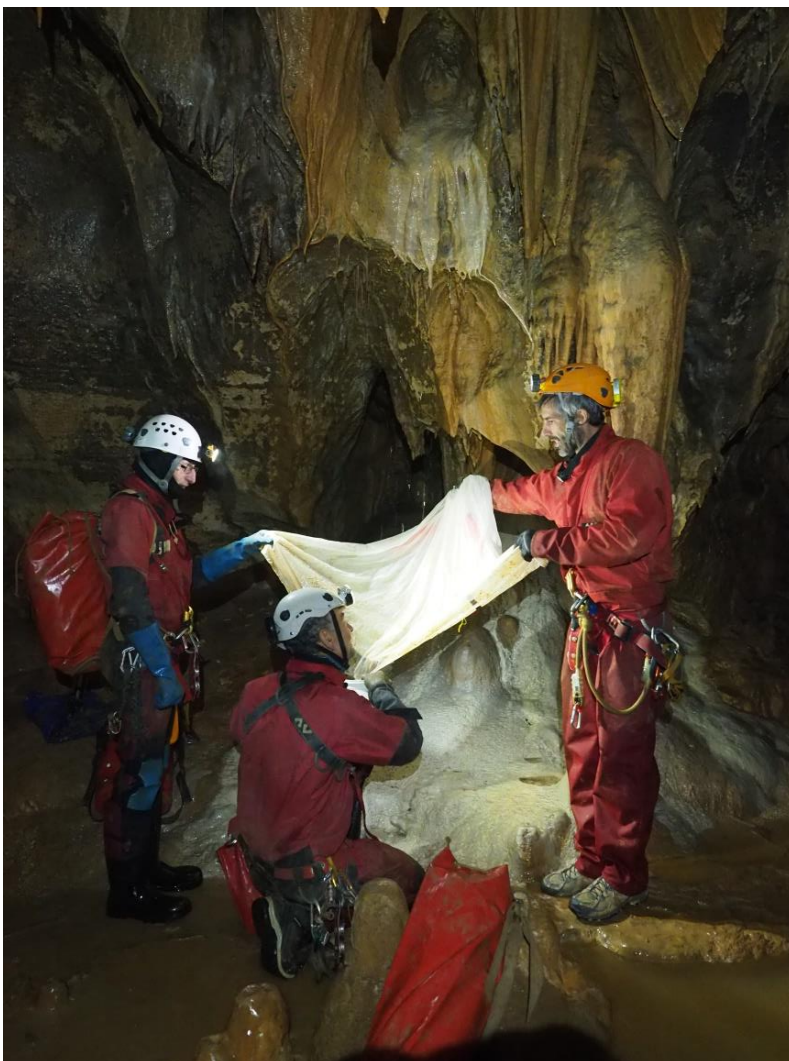
- Contenant de volume connu (peut être déterminé a posteriori)
- Chronomètre
- Eventuellement dispositif de collecte ou de rassemblement du flux

3. Protocole

- Canaliser la source d'eau
- Préparer le contenant et le chronomètre
- Démarrer le chronomètre au moment précis de l'insertion du contenant sous la source d'eau canalisée
- Arrêter le chronomètre lorsque le contenant est plein ou atteint le repère défini.

4. Précautions

- Bien conserver le contenant horizontal
- Ne pas hésiter à répéter la mesure plusieurs fois pour couvrir la gamme des erreurs possibles.



C. Jaugeage aux flotteurs (Clément Le Disquay, Céline Milaszewicz, Lucie Richier)

1. Conditions d'utilisation

- zone possédant une section relativement constante
- peu de remous
- vitesse significative (visible à l'œil)

2. Matériel

Flotteurs, chronomètre, ficelle, 2 décimètres (dont 1 rigide)

3. Protocole

a) Sélectionner la zone de travail

En vérifiant les conditions précédemment établies et identifier le point de départ et d'arrivée à l'aide d'une ficelle tendue à une dizaine de centimètres à la surface de l'eau (attention la ficelle ne doit pas toucher l'eau)

b) Mesurer la section

Choisir la section la plus significative et positionner l'un des décimètres à l'horizontal. À l'aide du décimètre rigide, mesurer la hauteur d'eau tous les 10 cm.

c) Mesurer la longueur

Entre les points de départ et d'arrivée (notée par la suite d)

d) Mesurer la vitesse des flotteurs

Jeter les flotteurs en amont de la ligne de départ (à environ 1m) de manière homogène (tout le long de la section) et chronométrer le temps mis par chaque flotteur entre le départ et l'arrivée. Répéter cette mesure un nombre significatif de fois (20 fois par exemple).



4. Exploiter les résultats

a) Calcul de la section

Plusieurs méthodes possibles à partir des données obtenues.

Méthode approximative

Repérer des formes géométriques simples (rectangles / triangles) pour calculer facilement la surface de la section

Méthode des trapèzes

On utilise sur chaque section (mesure) la formule suivante : $S = h (b+B) / 2$ où h est la distance entre deux mesures (ici 10cm), b est la hauteur de la mesure précédente, et B est la hauteur de la mesure actuelle. On somme l'ensemble pour obtenir la surface de la section totale S_{tot} .

- calcul des vitesses : pour chaque bouchon, $v = d/t_{mesuré}$, moyenner les valeurs
- calcul du débit : $D = k \cdot v \cdot S_{tot}$ où k est le coefficient de frottement pris entre 0,5 et 0,8 selon l'irrégularité du fond du cours d'eau (0,5 pour un fond très irrégulier)

b) Remarques

- Le choix du flotteur n'influe pas sur la mesure, il est cependant recommandé d'en prendre un qui flotte au-dessus de l'eau car il risque moins de se coincer.
- Il est plus pratique d'être trois personnes : une qui lance les flotteurs, la deuxième qui les récupère et la troisième qui note les temps.



D. Jaugeage hydraulique (Clément Le Disquay, Céline Milaszewicz, Lucie Richier)

1. Conditions d'utilisation

- déversoir régulier couvrant toute la largeur de la section
- zone pour positionner le laser

2. Matériel

Un laser qui fait l'horizontale (ou éventuellement un niveau à bulle), 2 décamètres (dont 1 rigide)

3. Protocole

Déterminer la zone

En accord avec les conditions précédemment établies

Fixer le laser

De telle sorte qu'il effleure l'eau à la surface (tout en étant horizontal)

Mesurer la hauteur h par rapport à l'horizontale

Tout le long du déversoir avec un espacement b de 10 cm. Le pointeur laser indique le « zéro ».

4. Calcul du débit

On utilise la formule suivante simplifiée : $D = 1,7 * b * h^{1,5}$ pour chaque section. Le débit du déversoir est égal à la somme sur l'ensemble des sections.

5. Remarques

Cette méthode est peu applicable sur le terrain, à cause de :

- non régularité du déversoir
- difficulté à fixer le laser à l'horizontal

Pour un résultat plus précis lorsque les conditions s'y prêtent, voir le guide technique de la police de l'eau pour le contrôle des débits réglementaires, section formules pour déversoirs.

Si vous n'avez qu'un niveau à bulle, il faut repérer l'horizontal de l'eau, puis mesurer la hauteur par rapport au niveau.

E. Jaugeage au sel (François Masson, Sébastien Durand, Jean-François Balacey)

Ce mode opératoire est applicable à tout jaugeage par traceur, y compris la fluorescéine.

1. Principe

On injecte une quantité connue de sel dans la rivière, puis on mesure en aval la conductimétrie de l'eau.

Sachant que la masse de sel reste constante, et égale à la concentration moyenne dans la rivière multipliée par le volume d'eau, on peut en déduire que $V = M/C$ ou V est le volume d'eau testé, M la masse de sel injectée et C la concentration moyenne de sel.

2. Matériel nécessaire

- Sel de cuisine
- Récipient souple pour préparer la solution
- Gant montant jusqu'au coude pour brasser (risque pour la peau)
- Conductimètre avec élastique pour fixer la sonde sous l'eau
- Fluorescéine (facultative)
- Chronomètre
- Carnet étanche si le relevé est manuel

3. Protocole

- Estimer à l'œil le débit, afin d'ajuster la quantité de sel à injecter. On comptera au moins 1 kg de sel par tranche de 100 l/s.
- Déterminer le point d'injection et le point de mesure : la distance entre les deux doit être suffisante pour assurer un brassage optimum. Un premier test à la fluorescéine peut permettre de vérifier qu'il n'existe pas de zones où le brassage ne se fait pas (zones mortes).
- Préparer la solution saline, en brassant (avec le gant) dans un récipient l'eau de la rivière avec le sel. On pourra ajouter une petite quantité de fluorescéine (environ 1 g pour 100 l/s) afin de visualiser le déplacement de l'injection.
- Positionner la sonde du conductimètre et la caler sous l'eau au milieu du cours d'eau. Relever la valeur du bruit de fond, et lancer l'acquisition.
- Verser rapidement la solution préparée dans l'eau et rincer immédiatement le récipient.
- Dans le cas d'une mesure automatique, enregistrer le pic, puis attendre que la valeur revienne à celle du bruit de fond (la fin de la mesure peut être longue).
- Dans le cas d'une mesure manuelle, noter régulièrement les valeurs obtenues en ajustant le pas de mesure : toutes les 5 secondes lors du passage du nuage de sel, et à intervalles plus longs avant et après le passage. Dans ce cas 3 équipiers sont nécessaires.

4. Analyse des résultats

Le conductimètre devra être étalonné avant ou après l'acquisition afin de convertir la mesure en concentration de sel.

Tracer un graphe représentant la concentration en sel en fonction du temps.

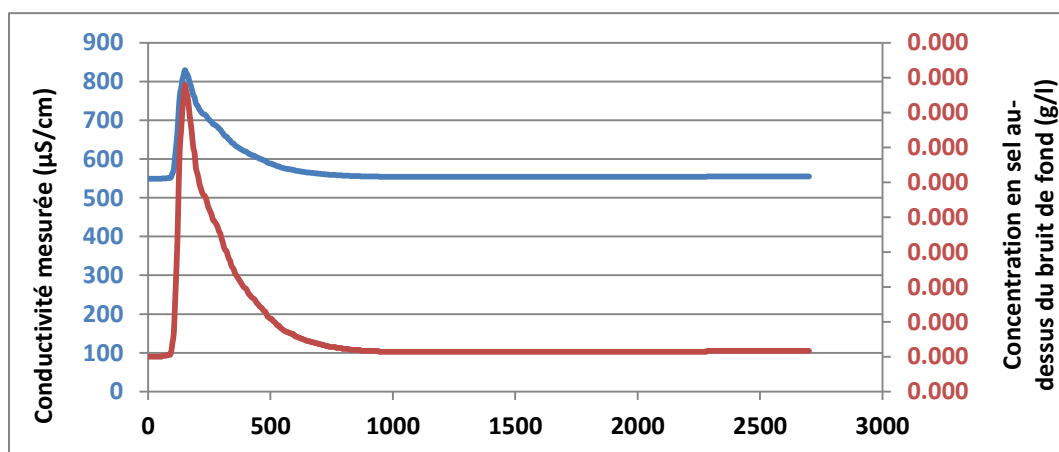
Déterminer graphiquement ou sous tableur la valeur moyenne de la concentration.

Déduire par la formule $V=M/C$ le volume d'eau testé, et calculer le débit en divisant cette valeur par le temps de mesure.

Exemple de fiche de relevé toutes les 5 secondes

Minute 1		Minute 2		Minute 3		Minute 4	
Seconde	Valeur	Seconde	Valeur	Seconde	Valeur	Seconde	Valeur
0		0		0		0	
5		5		5		5	
10		10		10		10	
15		15		15		15	
20		20		20		20	
25		25		25		25	
30		30		30		30	
35		35		35		35	
40		40		40		40	
45		45		45		45	
50		50		50		50	
55		55		55		55	

Exemple de résultat obtenu (Combe aux prêtres, 31 octobre 2016)



F. Jaugeage à la fluorescéine (Véronique Hautin, Christophe Babé, Régine Le Gad)

1. Objet

Mesure le débit d'un cours d'eau. Nota : faire une première estimation 'visuelle' du débit du cours d'eau permet de définir la dose de fluorescéine à injecter.

2. Appareil de mesure

Fluorimètre.

3. Principe

- Choisir un point d'injection qui soit suffisamment éloigné du point de mesure afin de respecter la distance de 'bon mélange' (au moins 20 fois la largeur de la galerie).
- Choisir un point de mesure suffisamment confortable (aussi pour les humains !) pour pouvoir faire des mesures durant plusieurs heures.
- Installer les sondes loin des perturbations (bords, zone morte etc.)
- Au point de mesure, étalonner le 0 de l'appareil en mesurant le niveau de bruit de fond (respecter la procédure fournie avec l'appareil).
- Noter le niveau de bruit au point d'enregistrement.
- Préparer l'injection en utilisant au moins 1g de Fluo par tranche de 100l/s de débit.
- Configurer le pas de mesure de l'appareil en fonction de la durée d'enregistrement souhaitée.
- Démarrer les mesures de fluorescence
- Injecter le produit au lieu prévu
- Continuer les mesures jusqu'à atteindre le niveau de bruit de fond. Une feuille Excel permettra de recouper le résultat de la mesure.



G. Estimation des vitesses à partir des coups de gouge (François Masson, Sébastien Durand, Jean-François Balacey)

1. Principe

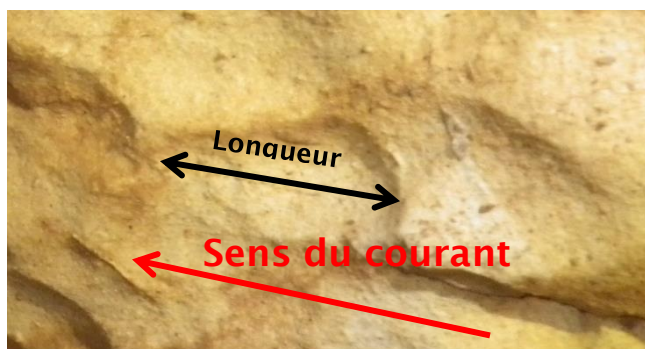
Le courant d'un cours d'eau lors de son passage sur les parois entraîne à la longue une cupule d'érosion prenant la forme d'un coup de gouge. La taille de cette dernière est inversement proportionnelle à la vitesse du courant. Ainsi, plus la taille du coup de gouge est petite, plus le courant était rapide. L'abaque de Curl (joint en annexe) permet d'obtenir la vitesse du courant correspondant à la longueur de la cellule d'érosion.

2. Matériel nécessaire

- Un décimètre ;
- Une fiche de terrain (pour noter les longueurs) ;
- Une perche pour guider la prise de mesure.

3. Protocole

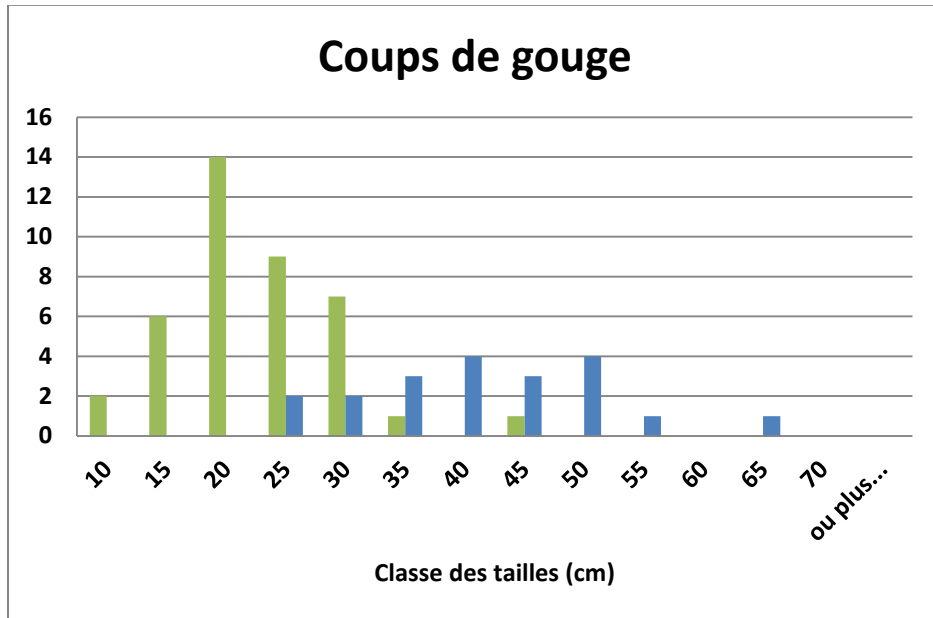
- Repérer un banc sur lequel on peut dénombrer au moins une cinquantaine de coups de gouge mesurables ;
- Planter la perche verticalement comme ligne de départ des mesures ;
- Mesurer la grande longueur (comme indiqué sur le schéma suivant) ;
- Réaliser les mesures de proche en proche le long de la perche ;
- Puis déplacer la perche pour recommencer les mesures sur une autre verticale.



A noter que le sens du courant se matérialise par la dissymétrie du coup de gouge, la partie la plus creuse étant à l'amont.

4. Analyse des résultats

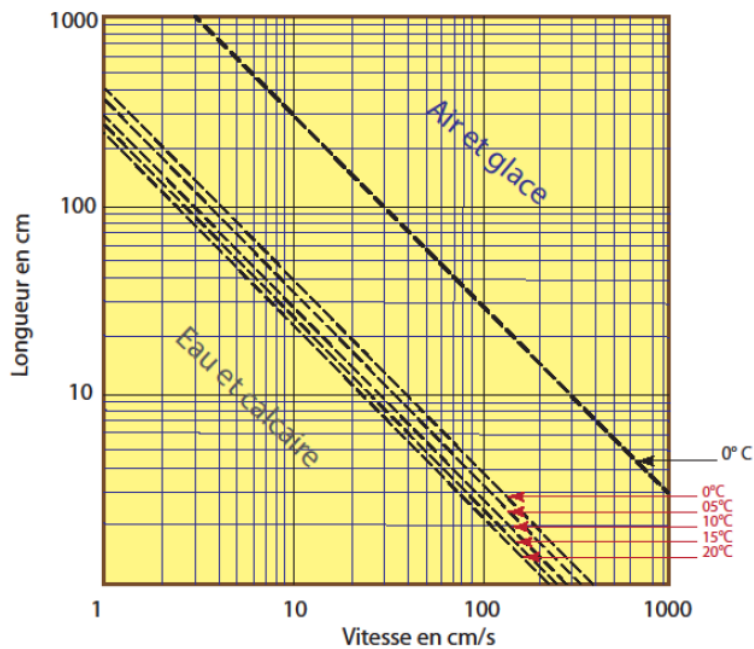
Reporter l'ensemble des valeurs sur un tableur Excel et construire un histogramme de répartition (selon une classe de taille). L'allure du graphique permet de classer les courants. Dans l'exemple ci-dessous, deux classes de courants sont mis en évidence.



Calculer la longueur moyenne des coups de gouges pour chacune des populations, reporter cette valeur sur l'axe verticale de l'abaque de Curl et lire la vitesse correspondante.

On considèrera une température unique pour l'ensemble des coups de gouges d'une valeur de 10° dans les cavités en France.

Abaque de Curl



H. Estimation des vitesses à partir des éléments transportés – galets **(Véronique Hautin, Christophe Babé, Régine Le Gad)**

1. Objet

Mesurer le débit passé qui a amené au déplacement puis dépôt des galets sur les parois d'une galerie

2. Choix de l'endroit de mesure

Repérage d'une paroi où à l'œil nu, il est possible d'identifier des éléments plutôt arrondis sans arrête saillante (ils ont été transportés par l'eau et non broyés comme au bas d'une faille par exemple) et avec une forme ovoïde marquée et une taille permettant la mesure.

Il faut relever de façon systématique la dimension des galets dans la zone choisie. Suivant les cas on pourra noter les 3 dimensions, ou uniquement les dimensions mesurables.

3. Mesure

À l'aide d'un mètre, gradué au dixième de centimètre, mesurer les côtés visibles (choix d'une méthode non destructive, garantissant la conservation de la disposition des galets observés et mesurés).

Ensuite, calculer la moyenne des mesures que l'on reportera sur l'abaque de Hjulström pour obtenir la vitesse de courant passé.



V. SYNTHÈSE

A. Débits actuels

1. Conditions hydrologiques

Ce stage s'est déroulé dans des conditions hydrologiques particulièrement sécuritaires, puisqu'un étiage important est marqué depuis plusieurs semaines et approche le 10^{ème} du module interannuel. A l'exception d'une crue brève et de faible amplitude la semaine précédente, les débits sont très stables.

Le 29 octobre 2016 vers 13h (heure d'été), le niveau d'eau à l'échelle est à la cote 9cm, alors que le 30 octobre 2016 à 10h48 (heure d'hiver), le niveau d'eau à l'échelle est à la cote 8cm.

2. Difficultés rencontrées

Les recommandations minimales de 1kg de sel par 100L/s et 1g de fluorescéine par 1m³/s sont valables pour des milieux turbulents très bien brassés, dans lesquels la distance de bon mélange est très courte (quelques mètres à quelques dizaines de mètres). A priori, pour avoir un résultat de qualité, le bruit de fond doit être augmenté d'au moins 200 µS/cm.

Toutefois ces conditions ne sont pas toujours réunies et nécessitent des distances de mélange plus longues, comme cela a pu être constaté dans la rivière des gours.

Il convient donc de revoir ces quantités, en les majorant par exemple d'un facteur 10 par tranche de 100m de distance entre l'injection et la mesure. Cela pourrait être testé en réalisant des mesures à différentes distances du point d'injection.

3. Comparaison des mesures de débits actuels

Les débits de la rivière sont comparés dans le Tableau 10 et la Figure 51. Les débits aux flotteurs ne sont pas représentés car ont été corrigés d'un coefficient de frottement, déterminé à partir des débits aux traceurs.

A la base des puits les mesures au sel et à la fluorescéine sont très peu dispersées. La similitude est également forte avec la mesure de débit par la méthode hydraulique effectuée par l'équipe 1. Compte tenu des difficultés rencontrées par l'équipe 3 (cf. § III.C.2.d)) la mesure hydraulique peut être écartée. Pour ce secteur on peut retenir un débit moyen d'environ 136L/s (écart type faible, 7L/s).

Dans la rivière des gours, visuellement, le débit semble plus faible. Deux jaugeages au sel et à la fluorescéine ont été réalisés : l'équipe 1 n'a vraisemblablement pas employé de quantités suffisantes de traceur pour permettre d'obtenir un résultat robuste (cf. § III.A.2). Par contre, forte de cette expérience, l'équipe 2, le lendemain, a mis des quantités de traceurs bien plus importantes, rendant les restitutions très peu sensibles aux variations du bruit de fond (cf. § III.B.8)). Le débit est quasiment identique entre les deux méthodes, environ 90L/s. ce débit est bien plus faible que le débit à la base des puits (environ -34%).

Tableau 10 : synthèse des mesures des débits actuels (L/s) de la rivière principale.

Zone / équipe	Visuel	Hydraulique	Fluo	Sel
Base Puits CAP				
1		133		137
2	197			148
3		309		
Rivière des gours				
1	120		161	135
2			89	90
Siphon Ben				
3	180		199	170

Au siphon Ben deux jaugeages au sel et à la fluorescéine ont été réalisés. Le passage du nuage au point de mesure a été très rapide et n'a pas permis d'obtenir suffisamment de mesures avec le fluorimètre au pas de temps minute (cf. § III.C.2.a)), par contre la mesure de conductivité au pas de temps seconde a été suffisante. Elle permet d'estimer le débit à environ 170L/s. L'écart avec le débit à la base des puits semble être significatif (+25%), et est près du double du débit mesuré dans la rivière des gours (+89%).

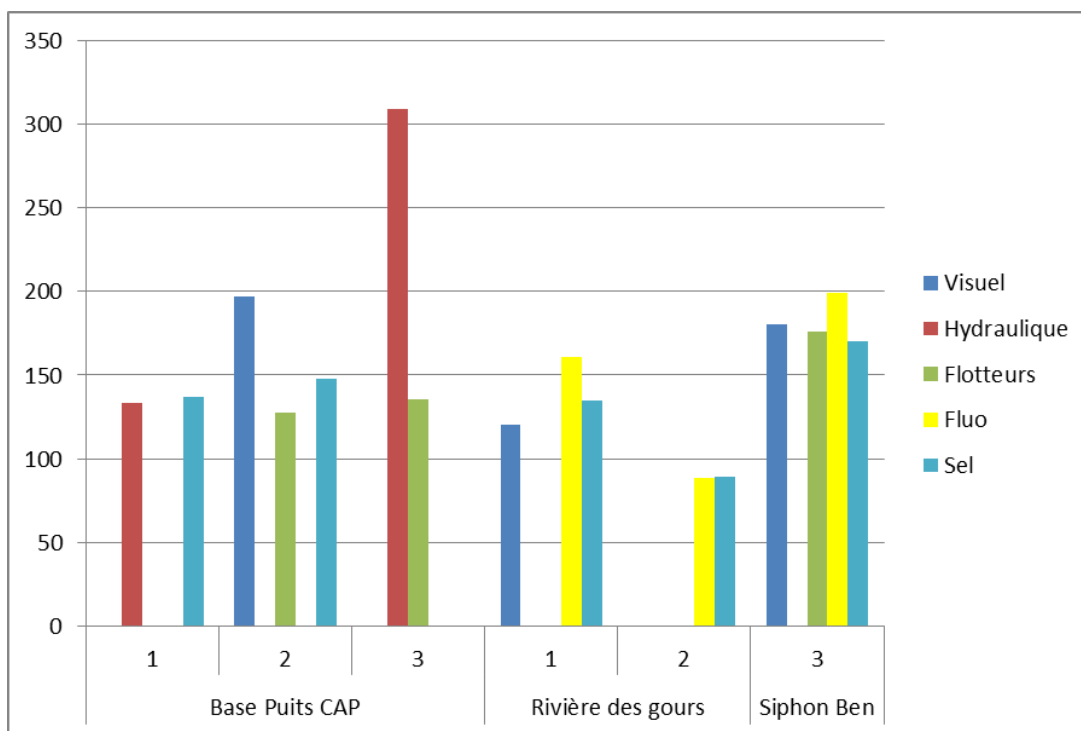


Figure 51 : synthèse des mesures des débits actuels (L/s) de la rivière principale

Ces mesures permettent de faire les hypothèses que (1) des arrivées d'eau existent entre la base des puits et le siphon Ben, (2) une partie du débit observé à la base des puits rejoint le siphon Ben par un autre conduit que la rivière des gours.

4. Estimation des coefficients de frottement pour la méthode aux flotteurs

Le Tableau 11 présente la synthèse des débits mesurés par la méthode des flotteurs, comparés aux débits mesurés par la méthode au sel et coefficients de frottements. Il s'agit ici de bénéficier de ces doubles mesures pour pouvoir déterminer par station les coefficients de frottement adaptés.

A la base des puits, le fond est constitué de blocs décimétriques jusqu'à des rochers de taille métrique. Selon les essais réalisés le coefficient semble être compris entre 0,6 et 0,8 ; il serait à préciser au travers de mesures complémentaires.

Dans la rivière des gours, où le débit est plus faible, le fond est constitué de sables de taille millimétrique à des galets centimétriques, et donc ralentissent a priori peu le débit. Cela est observé au travers du coefficient calculé qui a été estimé à 0,9.

Pour ce qui est du siphon Ben, le débit y est le plus important, le fond est constitué de nombreuses petites marmites et dépourvu de blocs ou de galets. Les frottements semblent y être importants puisque le coefficient a été estimé à 0,5 environ.

Tableau 11 : Synthèse des débits mesurés par la méthode des flotteurs, comparaison à la méthode au sel et coefficients de frottements

Zone	Equipe	Débit flotteur (L/s)	Débit brut (L/s)	Débit au sel (L/s)	Coefficient calculé	Coefficient retenu
Base Puits CAP	1			137	0,81	0,80
	3	136	170			
	2	128	255	148	0,58	0,50
Rivière des gours	1		150	135	0,90	
Siphon Ben	3	176	320	170	0,53	0,55

Malgré ces résultats aux différences significatives, l'extrapolation de ces coefficients à des débits de quelques centaines de litres par seconde semble possible, mais nécessiterait d'être vérifiée pour des débits plus importants, s'approchant de 1 m³/s et au-delà.

B. Vitesses passées

1. Difficultés rencontrées

L'extrapolation de ces vitesses à des débits n'a pas été réalisée car nécessitait de prendre des hypothèses fortes sur la section découlement, et de faire des relevés topographiques qui demandaient un temps non disponible.

2. Comparaison des vitesses mesurées

Cet exercice a tout d'abord permis de mieux comprendre la formation des coups de gouge (et le sens du courant) et les mécanismes d'érosion-transport des galets.

La comparaison de ces vitesses par zone ou station n'a que peu d'intérêt au niveau de l'étude du réseau, tant que les sections ne sont pas levées en chaque station. En effet une grande variabilité est observée que ce soit latéralement, d'un point du réseau à un autre, qu'au niveau d'une même station (Tableau 12).

Pour autant, aussi bien avec les galets qu'avec les coups de gouge, il a pu être remarqué des variations verticales de vitesses (ex : réseau Nord, équipe 3 ; Salle de la Vire, équipe 2), témoins de l'évolution des conditions hydrauliques dans le réseau. Il a également été observé des différences significatives entre rive droite et rive gauche (ex : galerie des merveilles, équipe 1).

Par ailleurs, sans se consulter, des équipes différentes ont effectué des mesures aux mêmes endroits, et ont conclu à des résultats très similaires (Salle des deux piliers, équipe 1 et 2) : 54 et 55cm/s (cf. § III.A.1.b) et III.B.3.c)), témoignant de la bonne reproductibilité des résultats.

Tableau 12 : Synthèse des vitesses (cm/s) mesurées par la méthode des coups de gouge et des galets

Zone	Equipe	Station	Coups de gouge (cm/s)	Galets (cm/s)
Galerie des merveilles	1	Amont chatière ouest (diverticule)	6	
	1	virage rive droite	6	
	1	virage rive gauche	12	
Réseau nord	2	Entrée trémie nord	45	
	3	Amont R2, bande inférieure	70	
	3	Amont R2, bande supérieure	100	
Salle de la vire	2	ouest, bande inférieure		90
	2	ouest, bande supérieure		70
Salle des deux piliers	1	Ouest salle rive gauche		54
	2	-		55
Siphon pont de singe	3	aval		10,4

VI. CONCLUSIONS & PERSPECTIVES

Pour la première fois ce stage s'est déroulé sur 4 jours, s'éloignant ainsi de la formule sur un weekend¹, très rapide, et s'approchant de la formule sur une semaine que connaissait le module scientifique. Les 4 jours permettent sereinement de présenter le massif et les méthodes, et que les stagiaires s'immergent progressivement en étant accompagnés. L'objectif était d'avoir une vision et une pratique des méthodes qui peuvent être mises en œuvre. Malgré le manque de certains matériels (fluorimètres GGUN de la commission scientifique, micromoulinet) les méthodes présentées permettent aux stagiaires de se lancer dans ce type de mesure ou de programme scientifique, même à petite échelle.

Les nombreuses mesures réalisées ont permis de contribuer au projet, en ayant notamment une vision instantanée des débits en différents points du réseau.

Les retours d'expérience de ce stage mettent en évidence le besoin de passer le temps nécessaire à présenter les matériels et les méthodes en parallèle, le premier jour, la maîtrise venant les jours suivants. Mais cela se réalise forcément au détriment du temps passé à présenter le massif.

D'autre part, le programme était relativement (mais suffisamment) chargé, ce qui n'a pas rendu possible la présentation du projet en soirée. Pour ceux qui le souhaitent il est toujours possible d'aller consulter :

- Spéléo IDF n°76 (2013) <http://lists.cosif.fr/pipermail/cosif-federes/attachments/20131223/f44f76c6/attachment.pdf>
- Journées Sciences et exploration du CoSIF 2015 : <http://cgs93.free.fr/files/20150315---Combe-aux-pretres.pdf>

Cette formule a donc rencontré un grand succès, et ne demande qu'à être renouvelée, sur ce réseau ou un autre, pourquoi pas ...

A toutes fins utiles, 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 m³/s), les initiations sont déconseillées dans le réseau.
- A partir de 3,5 m³/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 MétéoFrance ou MétéoCiel qui donnent les précipitations tri horaires sur Dijon : <http://www.meteociel.fr/previsions/6180/dijon.htm>.

¹ Cf. stages de 2013 et 2014 :

- <http://www.cosif.fr/wp-content/uploads/2012/03/CR-Karsto-2013-d-taill-d-finitif.pdf>
- http://www.cosif.fr/wp-content/uploads/2012/03/CR_Karsto_2014_FINAL.pdf

VII. PARTENAIRES

La réalisation de ce projet en général, et de ce stage en particulier, n'aurait pu se faire sans ce niveau de qualité sans la participation de nombreux partenaires :

- Le **CoSIF** pour l'organisation du stage et l'investissement initial dans le projet, la mise à disposition de matériel (sondes Reefnet) ;
- Le **Comité Départemental de Spéléologie de Seine Saint Denis** (CDS 93) pour l'investissement initial dans le projet, la mise à disposition de matériel (sondes Reefnet, tablette durcie) ;
- Le **Comité Départemental de Spéléologie de Côte d'or** (CDS 21), pour avoir accepté d'accueillir ce projet et avoir systématiquement répondu favorablement à nos demandes d'instrumentation ;
- La **Commission Scientifique de la Fédération Française de Spéléologie**, pour la prise en charge des cadres sur ce stage ;
- Le **Spéléo Club Rosnéen**, pour l'investissement humain initial dans le projet ;
- Le **Spéléo Club Auboïs**, pour l'investissement humain initial dans le projet et pour le prêt de matériel (conductimètre WTW 3410) ;
- La société **SDEC France**, pour leur partenariat depuis quelques années en nous prêtant gracieusement le fluorimètre AM-200 et sa sonde fluorescéine AP-Lite ;
- La société **Andra**, pour la fourniture d'échelles géologiques, de crayons, de stylos, et de livres sur l'argile ;
- Le **Gîte de la clairière à Francheville**, pour son accueil et ses bons repas, la mise à disposition de salle, et nous avoir autorisé à accrocher les topographies ?

Une mention spéciale de remerciements à tous les piliers de l'ombre, ceux qui nous ont aidés sans le savoir, pour la fourniture de colliers de fixation, de feutres, de sacs poubelle, de gants manchette,



VIII. ANNEXES (DOCUMENTS DE TERRAIN)

A. Topographie de la Combe aux Prêtres

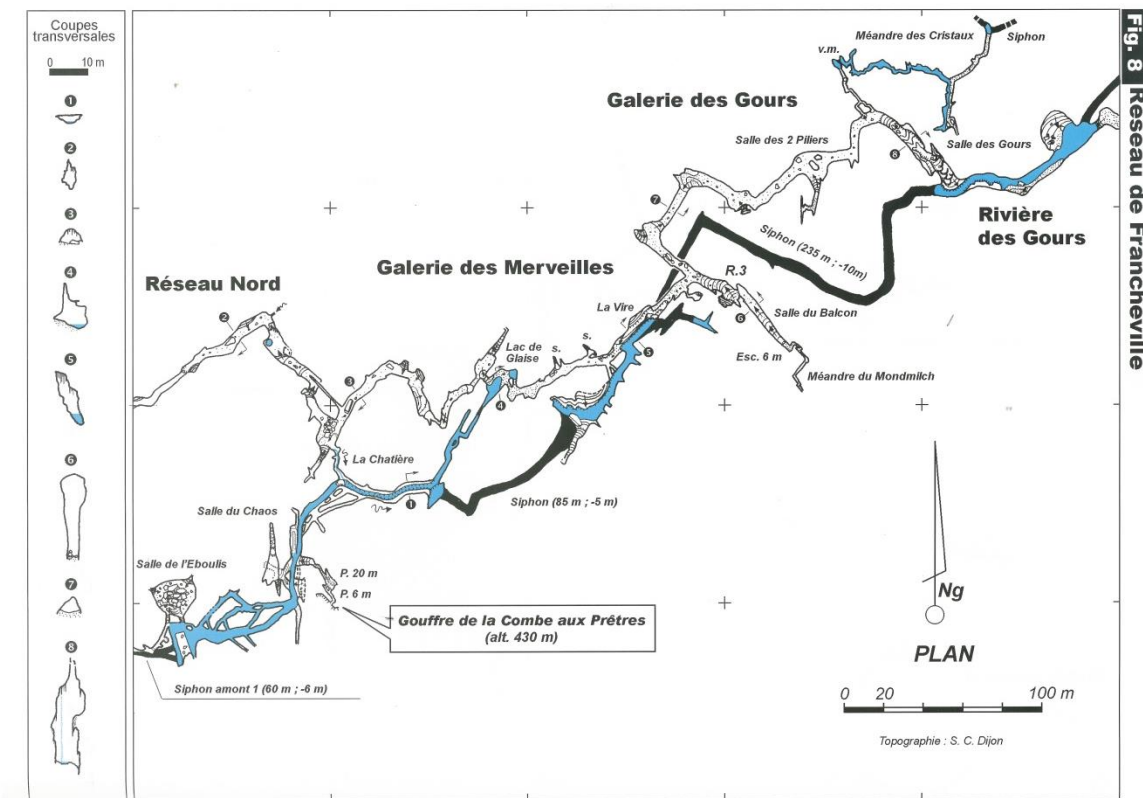
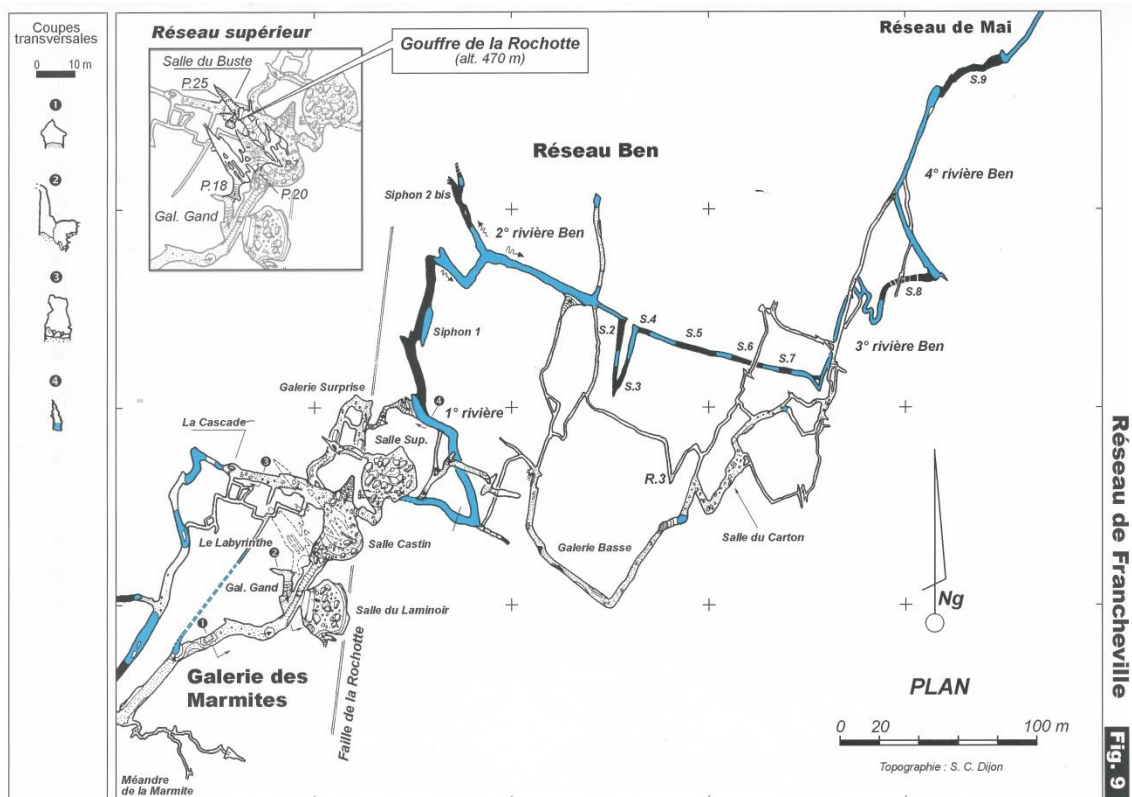
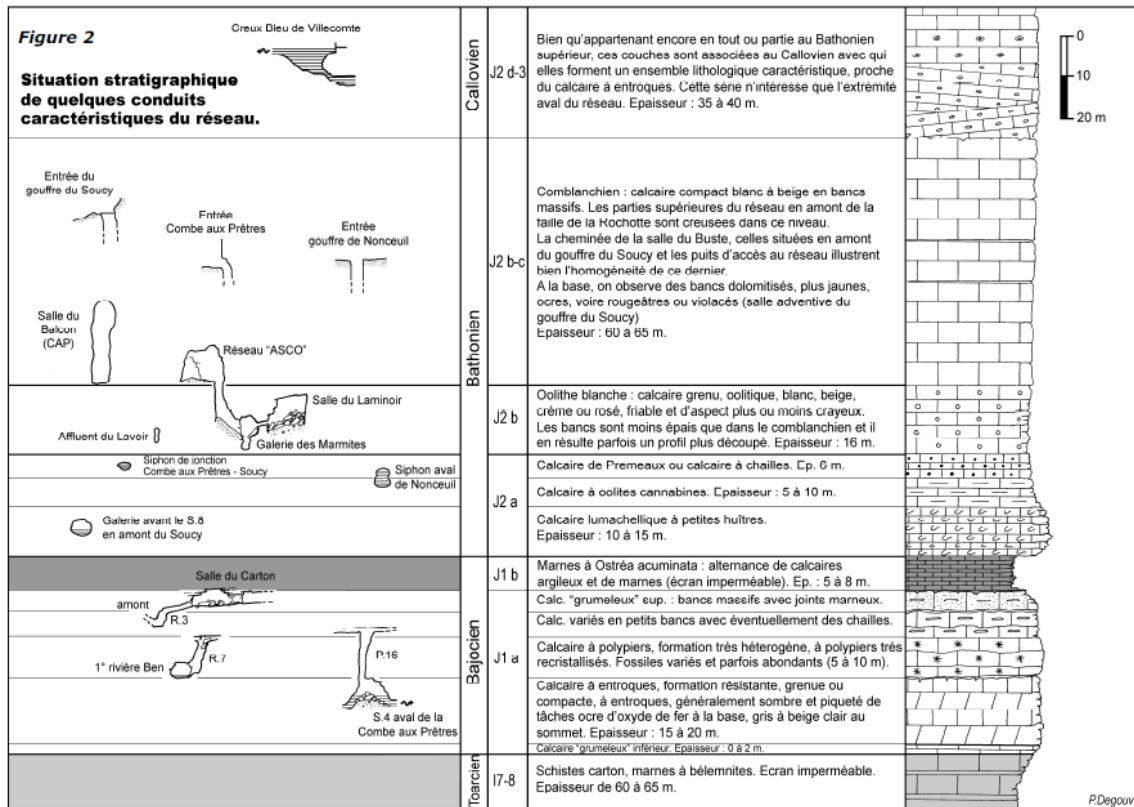


Fig. 8 Réseau de Francheville



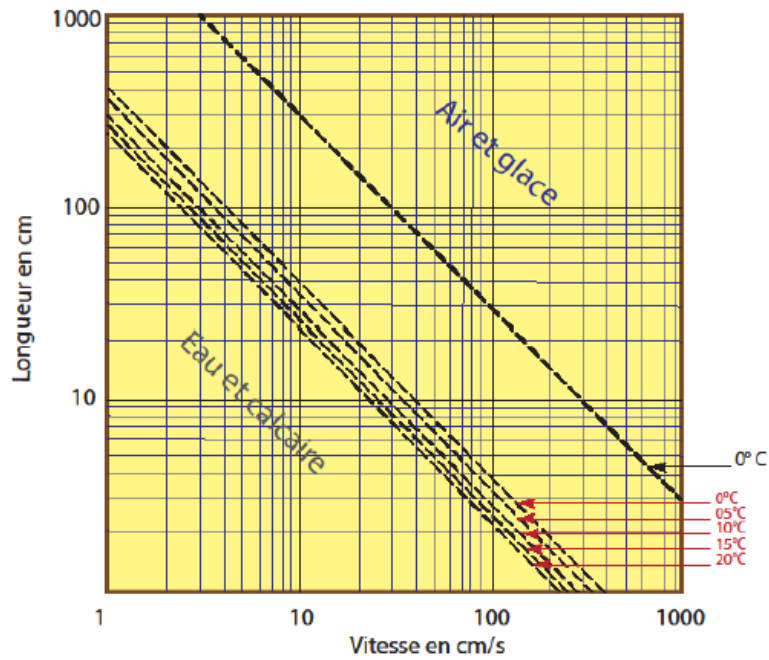
Réseau de Francheville Fig. 9

B. Les couches géologiques du massif du réseau de Francheville

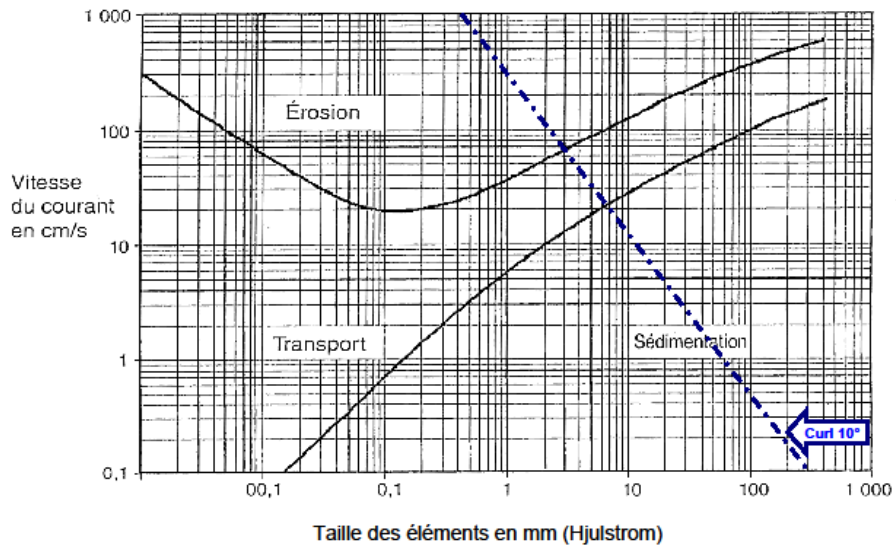


C. Abaques de Curl et de Hjulström

Abaque de Curl



Longueur des cupules en cm (Curl)



Diagrammes de Hjulstrom et Curl

CUPULES D'EROSION - VITESSES - DEBITS

Vitesse du courant = formule de Curi

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 > D mm		Débit m³/s									
	cm/s	m/s	0.1	1	E	Section	Section	Section	Section	Section	Section	Section	Section	
						1 m²	2 m²	3 m²	4 m²	5 m²	10 m²	15 m²	20 m²	? m²
1	250	2.50			E	2.5	5.0	7.5	10.0	12.5	25.0	37.5	50.0	
2	125	1.25			Erosion	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			Transport	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			Erosion	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			Transport	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			Erosion	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			Transport	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			Erosion	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			Transport	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			Erosion	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			Transport	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			Erosion	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			Transport	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			Erosion	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			Transport	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			Erosion	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			Transport	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			Erosion	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			Transport	0.0	0.1	0.1	0.1	0.2	0.3	0.5	0.6	
						0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.3	0.5	0.6

D. 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 :

$$(8) Cond_{25} (\mu S/cm) = Cond_t \cdot 1,161 / (0,023t + 0,586)$$

Avec : $Cond_{25}$ = 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 $\mu S/cm$).

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

• 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 ($850 \mu\text{S} / \text{cm}$) 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. mesurée (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)

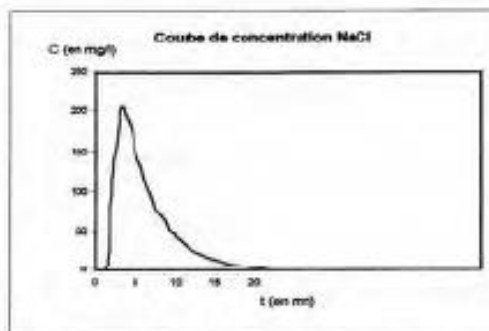


Figure 6 – Courbe de concentration obtenue lors du passage du nuage de sel (ruisseau de la Foux, Tourettes, Var – mars 2001)

- **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).

E. Mesure du débit par la méthode de jaugeage au bouchon

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 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 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 :

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

IX. SOMMAIRE

I.	Introduction	2
II.	Organisation du stage.....	4
A.	Programme prévisionnel.....	4
B.	Matériel	5
1.	Matériel mis à disposition	5
2.	Matériel à prévoir.....	5
C.	Participants	6
D.	Equipes et travaux réalisés.....	6
III.	Comptes rendus des équipes	8
A.	Equipe 1 (François Masson, Sébastien Durand, Jean-François Balacey)	8
1.	Méthodes d'évaluation des débits passés	8
2.	Méthodes d'évaluation des débits actuels.....	12
3.	Conclusion	16
4.	Annexe : comparaison des méthodes d'évaluation des débits	17
5.	Restitution des résultats	18
B.	Equipe 2 (Véronique Hautin, Christophe Babé, Régine Le Gad)	27
1.	Programme.....	27
2.	Estimation du débit (base des puits)	28
3.	Débit passé, mesures de la taille des galets charriés	28
4.	Débit passé, méthode des coups de gouge (galerie nord)	32
5.	Mesure de débit de petit cours d'eau, réseau nord (R2), par la méthode capacitive.....	32
6.	Mesure de débit au bouchon (base des puits)	35
7.	Mesure du débit au sel, bas des puits	36
8.	Mesure du débit avec sel et fluorescéine simultanément, rivière des gours.....	37
9.	Restitution des résultats	41
C.	Equipe 3 (Clément Le Disquay, Céline Milaszewicz, Lucie Richier)	45
1.	Introduction	45
2.	Expérimentations.....	46
3.	Conclusion	54
IV.	Modes opératoires	55
A.	Jaugeage estimatif (Vincent Schneider)	55
B.	Jaugeage capacitif (Vincent Schneider).....	56
1.	Conditions d'utilisation	56
2.	Matériel	56
3.	Protocole	56
4.	Précautions.....	56
C.	Jaugeage aux flotteurs (Clément Le Disquay, Céline Milaszewicz, Lucie Richier).....	57

1.	Conditions d'utilisation	57
2.	Matériel	57
3.	Protocole	57
4.	Exploiter les résultats	58
D.	Jaugeage hydraulique (Clément Le Disquay, Céline Milaszewicz, Lucie Richier)	59
1.	Conditions d'utilisation	59
2.	Matériel	59
3.	Protocole	59
4.	Calcul du débit.....	59
5.	Remarques	59
E.	Jaugeage au sel (François Masson, Sébastien Durand, Jean-François Balacey)	60
1.	Principe.....	60
2.	Matériel nécessaire	60
3.	Protocole	60
4.	Analyse des résultats.....	60
F.	Jaugeage à la fluorescéine (Véronique Hautin, Christophe Babé, Régine Le Gad)	62
1.	Objet.....	62
2.	Appareil de mesure	62
3.	Principe.....	62
G.	Estimation des vitesses à partir des coups de gouge (François Masson, Sébastien Durand, Jean-François Balacey)	63
1.	Principe.....	63
2.	Matériel nécessaire	63
3.	Protocole	63
4.	Analyse des résultats.....	63
H.	Estimation des vitesses à partir des éléments transportés – galets (Véronique Hautin, Christophe Babé, Régine Le Gad)	65
1.	Objet.....	65
2.	Choix de l'endroit de mesure	65
3.	Mesure.....	65
V.	Synthèse	66
A.	Débits actuels	66
1.	Conditions hydrologiques	66
2.	Difficultés rencontrées	66
3.	Comparaison des mesures de débits actuels.....	66
4.	Estimation des coefficients de frottement pour la méthode aux flotteurs	68
B.	Vitesses passées.....	69
1.	Difficultés rencontrées	69
2.	Comparaison des vitesses mesurées	69
VI.	Conclusions & perspectives	70

VII.	Partenaires	71
VIII.	Annexes (documents de terrain)	72
	A. Topographie de la Combe aux Prêtres	72
	B. Les couches géologiques du massif du réseau de Francheville	73
	C. Abaques de Curl et de Hjulström.....	74
	D. Mesure du débit par le sel	76
	E. Mesure du débit par la méthode de jaugeage au bouchon	79
IX.	Sommaire	80
X.	Illustrations	82

X. ILLUSTRATIONS

Figure 1 : préparation de la mesure de débit au sel et fluorescéine, rivière Ben.....	3
Tableau 1 : Programme prévisionnel	4
Tableau 2 : Participants	6
Tableau 3 : Constitution des équipes	6
Figure 2 : installation des enregistreurs de conductivité et fluorescéine, rivière des gours	6
Tableau 4 : Programme des équipes	7
Figure 3 : mesure des coups de gouge (équipe 1)	8
Figure 4 : Localisation des sites étudiés par la méthode des coups de gouge (équipe 1).....	8
Figure 5 : histogramme de répartition des longueurs de coups de gouge au niveau du diverticule (équipe 1)	9
Figure 6 : histogramme de répartition des longueurs de coups de gouge sur les deux rives de l'étranglement (équipe 1).....	9
Figure 7 : Localisation des sites étudiés par la méthode des galets (équipe 1).....	10
Figure 8 : Galets empilés montrant le sens du paléocourant (équipe 1)	10
Figure 9 : Histogramme de répartition des longueurs des différents axes (équipe 1).....	11
Figure 10 : répartition des tailles de galets sur la rive gauche (équipe 1)	11
Figure 11 : répartition des tailles de galets sur la rive droite (équipe 1)	11
Figure 12 : Localisation des sites de mesures dans la rivière des gours (équipe 1).....	12
Figure 13 : Localisation des sites de mesures à la base des puits (équipe 1).....	12
Figure 14 : Conductivité et concentration en sel en fonction du temps à la rivière des gours (équipe 1)	13
Figure 15 : Conductivité et concentration en sel en fonction du temps, base des puits (équipe 1).....	13
Figure 16 : Concentration en fluorescéine en fonction du temps, base des puits (équipe 1)	14
Tableau 5 : Tableau de vitesse des flotteurs (équipe 1)	14
Tableau 6 : Tableau de calcul de la surface d'eau (équipe 1)	15

Tableau 7 : Comparaison des débits obtenus avec différentes méthodes (équipe 1)	15
Tableau 8 : Tableau d'évaluation du débit par méthode capacitive, galerie des merveilles (équipe 1)	15
Tableau 9 : paramètres de mesure du débit par la méthode hydraulique (équipe 1, base des puits).....	16
Figure 17 : mesure débit au sel et à la fluorescéine, rivière des gours	26
Figure 18 : localisation des points d'injection de sel et de mesure de la conductivité + estimation du débit aux bouchons	27
Figure 19 : localisation des points d'injection (sel et fluorescéine) et de restitution	28
Figure 20 : localisation des mesures de taille des galets, équipe 2	29
Figure 21 : schéma du panneau de galets observé à la salle de la vire (équipe 2)	30
Figure 22 : Photographie du panneau de galets observé à la salle de la vire (équipe 2).....	30
Figure 23 : histogrammes des tailles des galets, Salle de la Vire, bande supérieure (équipe 2)	31
Figure 24 : histogrammes des tailles des galets, Salle de la Vire, bande inférieure (équipe 2)	31
Figure 25 : histogrammes des tailles de galets, Salle des deux piliers (équipe 2)	32
Figure 26 : panneau de coups de gouge, réseau Nord (équipe 2)	33
Figure 27 : histogramme des tailles de coups de gouge, réseau Nord (équipe 2)	33
Figure 28 : localisation des mesures des coups de gouge (flèche rouge) et de l'affluent mesuré par la méthode capacitive (rectangle noir et Figure 28), équipe 2	34
Figure 29 : schéma de localisation des mesures de conductivité dans le réseau nord (équipe 2)	34
Figure 30 : profil de la rivière à la base des puits pour la mesure de débit aux flotteurs (équipe 2).....	35
Figure 31 : mesure de conductivité lors du jaugeage au sel, rivière au départ de la chatière (équipe 2).....	36
Figure 32 : évolution de la conductivité lors du jaugeage au sel à la base des puits	37
Figure 33 : préparation de la solution de sel et de fluorescéine, rivière des gours (équipe 2)	38
Figure 34 : avant l'injection de la solution de sel et de fluorescéine dans la rivière, à la base de la galerie des gours (équipe 2).....	38
Figure 35 : après l'injection de la solution de sel et de fluorescéine dans la rivière, à la base de la galerie des gours (équipe 2).....	39
Figure 36 : évolution de la conductivité lors du jaugeage au sel dans la rivière des gours	39
Figure 37 : évolution de teneur en fluorescéine lors du jaugeage au sel à la base des puits.....	40
Figure 38 : collecte des mesures lors des jaugeages au sel et à la fluorescéine, rivière des gours, au pont de singe.....	40
Figure 39 : plan du réseau de Francheville (partie pénétrable) et localisation des points de mesure de l'équipe 3.....	45

Figure 40 : Localisation des points d'injection (sel et fluorescéine) et restitution dans le réseau Ben (équipe 3).....	46
Figure 41 : restitution de sel lors du jaugeage dans le réseau Ben (équipe 3)	47
Figure 42 : section pour la mesure du débit aux flotteurs, réseau Ben (équipe 3).....	47
Figure 43 : localisation des points de mesure dans le réseau Nord (équipe 3)	48
Figure 44 : mesure de débit capacitive, réseau Nord (équipe 3).....	49
Figure 45 : mesure de la longueur des coups de gouge, réseau Nord (équipe 3)	50
Figure 46 : mesures de conductivités dans des points d'eau du réseau Nord (équipe 3).....	50
Figure 47 : localisation et photographie du déversoir utilisé pour la méthode hydraulique, rivière à la base des puits (équipe 3)	51
Figure 48 : localisation de la station de mesure aux flotteurs, rivière à la base des puits (équipe 3).....	52
Figure 49 : section de la rivière pour la mesure de débit aux flotteurs, rivière à la base des puits (équipe 3).....	53
Figure 50 : calcul de la section par modélisation en formes simples, pour la mesure de débit aux flotteurs, rivière à la base des puits (équipe 3)	53
Tableau 10 : synthèse des mesures des débits actuels (L/s) de la rivière principale.	67
Figure 51 : synthèse des mesures des débits actuels (L/s) de la rivière principale	67
Tableau 11 : Synthèse des débits mesurés par la méthode des flotteurs, comparaison à la méthode au sel et coefficients de frottements.....	68
Tableau 12 : Synthèse des vitesses (cm/s) mesurées par la méthode des coups de gouge et des galets	69