

Séance pédagogique en milieu karstique

Aérologie de la zone de l'évent de Foussoubie, Bilan des différents débits d'un tube à vent complexe



L'Ardèche, le Cirque d'Estre et le Pont-d'Arc depuis le point de vue de l'évent supérieur de Foussoubie,
Photo de ROUSTAN Christian

Guillaume LEBRET

**Diplôme d'état de la Jeunesse,
de l'Éducation populaire et du Sport**
Option : Perfectionnement Sportif
Mention : Spéléologie
Session : 2020 / 2021



CREPS

Auvergne-Rhône-Alpes
— Vallon-Pont-d'Arc

Centre de Ressources,
d'Expertise et de
Performance Sportive

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION	- 3 -
CYCLE PEDAGOGIQUE EN MILIEU KARSTIQUE	- 4 -
1. PUBLIC CIBLE	- 4 -
2. DEROULEMENT DU CYCLE D'EDUCATION A L'ENVIRONNEMENT KARSTIQUE	- 4 -
PRESENTATION DE L'ÉVÈNT DE FOUSSOUBIE.....	- 5 -
1. PRESENTATION GENERALE DU RESEAU DE FOUSSOUBIE	- 5 -
1.1. <i>Cadre géologique et hydrologique</i>	- 5 -
1.2. <i>Organisation générale du réseau karstique</i>	- 6 -
2. FOCUS SUR LA ZONE DE L'ÉVÈNT DE FOUSSOUBIE	- 7 -
1.3. <i>Historique des explorations et topographie</i>	- 7 -
1.4. <i>Description spéléologique</i>	- 8 -
1.5. <i>Évènt de Foussoubie, un exemple de « tube à vent »</i>	- 9 -
SEANCE DE PREPARATION EN CLASSE.....	- 10 -
1. FICHE DE SEANCE RECAPITULATIVE.....	- 10 -
1. PRESENTATION DU RESEAU DE FOUSSOUBIE.....	- 11 -
2. COURANT D'AIR DANS LA CAVITE	- 12 -
3. PROTOCOLE EXPERIMENTAL DE CALCUL DE DEBIT	- 13 -
4. CONCLUSION DE CETTE SEANCE	- 15 -
SEANCE DE TERRAIN	- 17 -
1. DEROULEMENT DU SEJOUR SCOLAIRE.....	- 17 -
2. FICHE DE SEANCE RECAPITULATIVE.....	- 18 -
3. IDENTIFICATION DE LA ZONE DE MESURE	- 19 -
4. REALISATION DU PROTOCOLE DE MESURE	- 19 -
SEANCE BILAN EN CLASSE	- 22 -
1. FICHE DE SEANCE RECAPITULATIVE.....	- 22 -
2. CONFRONTATION DU MODELE AUX RESULTATS EXPERIMENTAUX :	- 22 -
3. COHERENCE DES RESULTATS EXPERIMENTAUX FACE AUX LOIS DE LA PHYSIQUE :	- 23 -
4. ÉVALUATION GENERALE DU CYCLE	- 25 -
CONCLUSION.....	- 28 -
REFERENCES	- 28 -

INTRODUCTION

Forte de ses 15 000 sites naturels de pratique d'activités sportives, et de son dynamisme, l'Ardèche prône un développement maîtrisé des sports de nature. Au sud de ce département, l'ensemble formé par le Pont d'Arc et les Gorges de l'Ardèche constitue l'un des sites naturels les plus remarquables de France. Il offre aux visiteurs un paysage grandiose et sauvage : gorges et plateaux calcaires recouverts de chênes verts, méandres, vallées sèches reculées, grottes et avens, riche d'un patrimoine géologique et archéologique exceptionnel. Sur cet espace naturel sensible, l'enjeu de préservation de la biodiversité est accordé avec la forte pression touristique, et donc économique.

Dans ce contexte, la pratique loisir de la spéléologie a démocratisé certaines cavités du bas Vivarais, qui sont devenues de véritables classiques. Ces cavités sont ainsi régulièrement visitées, aussi bien par les spéléologues amateurs, que par les professionnels de la spéléologie accompagnant leurs clients. Cependant, À côté de cette pratique touristique et de loisir, le spéléologue porte aussi un intérêt scientifique au monde souterrain. Il contribue de ce fait à la connaissance et à la protection du patrimoine souterrain et devient alors un véritable acteur du développement durable. Ce mémoire s'inscrit au cœur de cette dualité du professionnel de la spéléologie. Il propose en effet un cycle pédagogique en milieu karstique dans une cavité ultra-classique à proximité du Pont d'Arc, l'Évent de Foussoubie, mais sur un thème résolument scientifique, l'aérologie dans un tube à vent complexe.

J'ai choisi l'évent de Foussoubie pour toutes les raisons qui font de cette cavité une classique en encadrement. C'est-à-dire son accessibilité, la possibilité d'y réaliser des traversées ludiques et sportives n'impliquant aucune remontée sur corde, sa relative propreté, son équipement de qualité... Du côté scientifique, j'ai choisi le thème de l'aérologie, et précisément le calcul du débit des courants d'air, car c'est un sujet qui a toujours passionné les explorations spéléologiques. La réalisation de bilan de débits dans un réseau karstique peut en effet mener à l'identification de zones de pertes ou d'apports de débits, et donc à des orifices restant à découvrir. Dans l'optique de la réalisation d'un bilan de débits, la zone de l'évent de Foussoubie est particulièrement adaptée. En effet, de par sa topologie, elle est parcourue par un courant d'air très stable en fonction des saisons. De plus, elle est parfaitement connue et topographiée, et présente juste assez de galeries différentes pour permettre à une classe entière de se répartir sur chacune d'elles.

Sur ce thème, ce mémoire présente donc un cycle de trois séances, qui peuvent être proposées par un professionnel de la spéléologie à un enseignant de physique-chimie en première générale. Ainsi, après avoir précisé le cadre dans lequel ce cycle pourrait être mis en place, la cavité considérée sera succinctement décrite en se focalisant sur les informations pertinentes pour la réalisation de ce cycle. Enfin, chacune des trois séances proposées au cours de ce cycle sera développée en détail.

Dans le cadre de ce mémoire, j'ai décidé de présenter un cycle de trois séances sur le thème de l'aérodologie de la zone de l'évent de Foussoubie. Nous nous intéresserons spécifiquement à la problématique suivante :

« Réalisation d'un bilan des différents débits d'air rencontrés dans un tube à vent complexe »

1. Public ciblé

Ce cycle s'adresse à des élèves de première générale, et il est réalisé à destination de leur enseignant de physique-chimie.

Ce choix est basé sur le bulletin officiel de l'éducation nationale concernant le programme enseigné. En effet, le programme de physique-chimie de la classe de première s'inscrit dans la continuité de celui de la classe de seconde, en promouvant à la fois l'activité de modélisation, et la pratique expérimentale. Ce bulletin officiel invite ainsi clairement les professeurs de physique-chimie à privilégier la mise en activité des élèves autour d'une démarche scientifique, surtout si elle propose une approche contextualisée et concrète des concepts et phénomènes étudiés. Dans ce cadre, nous verrons tout au long de ce mémoire, que les compétences visées lors de ce cycle pédagogique en milieu karstique sont en parfaite adéquation avec celles autour desquelles les professeurs doivent structurer leur formation, c'est-à-dire :

S'approprier $\Rightarrow$ Analyser/Raisonner $\Rightarrow$ Réaliser $\Rightarrow$ Valider $\Rightarrow$ Communiquer

De plus, les concepts abordés lors de ce cycle vont de pair avec l'introduction à la mécanique des fluides inscrite au programme des premières générales.

2. Déroulement du cycle d'éducation à l'environnement karstique

Ce cycle s'articule autour d'un voyage scolaire de trois jours, transport exclu. Ce voyage est effectué en fin d'année scolaire par une seule classe de première générale, accompagnée au minimum de l'enseignant de physique-chimie. Ce choix a été effectué pour des raisons de faisabilité. En effet, de par son ouverture vers les sports de nature, l'Ardèche est une destination attrayante et courante pour les lycées désirant effectuer des classes vertes multi-activités. Ces séjours ont majoritairement lieu sur la fin de l'année scolaire, c'est-à-dire sur les mois de mai et juin, et durent classiquement de 3 à 5 jours.

Ce cycle s'articule autour des trois séances suivantes :

- Avant le voyage scolaire : Première séance de préparation en classe.
- Pendant le voyage scolaire : Séance de terrain dans l'évent de Foussoubie.
- Après le voyage scolaire : Dernière séance bilan.

Les thématiques de ces séances sont respectivement les suivantes :

- Introduction de la problématique globale et réalisation d'un protocole expérimental.
- Mise en œuvre de ce protocole expérimental en respectant les étapes et procédures.
- Validation critique des résultats obtenus.

PRESENTATION DE L'ÉVENT DE FOUSSOUBIE

1. Présentation générale du réseau de Foussoubie

Avec un peu plus d'une vingtaine de kilomètres de développement spéléologique, le réseau de Foussoubie constitue le deuxième plus grand ensemble karstique d'Ardèche. Il se situe en rive droite de l'Ardèche, juste en amont des gorges et du fameux pont d'arc. Ce réseau karstique est en réalité un système perte/résurgence du ruisseau éphémère de la Planche. Celui-ci, s'écoulant d'abord en surface libre, se perd au niveau de la Goule de Foussoubie vers 200m d'altitude. Il resurgit ensuite au niveau de l'Évent de Foussoubie, 7km plus au nord, et est situé lui, en bordure de l'Ardèche à une altitude de 88m (Figure 1).

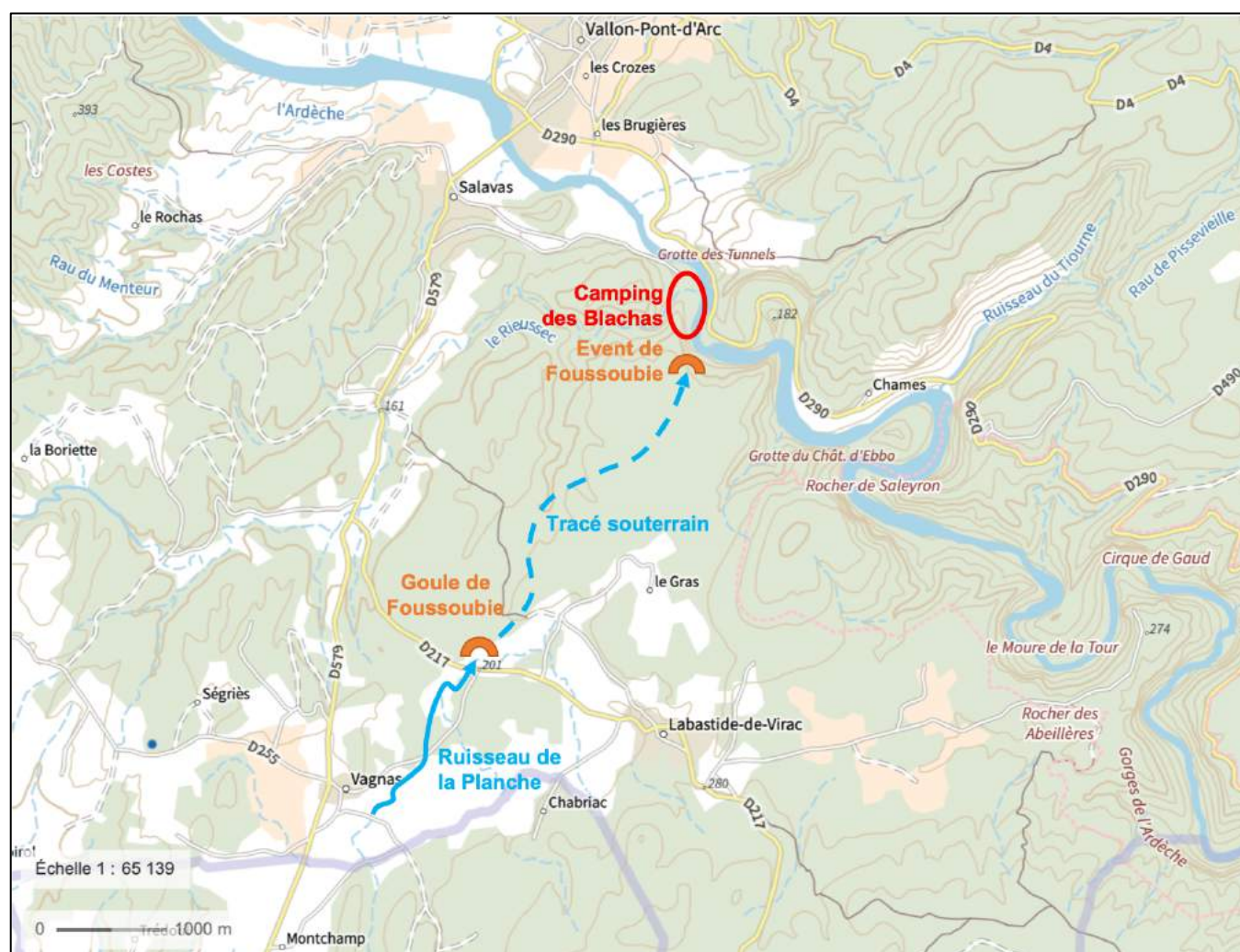


Figure 1 : Situation générale du réseau de Foussoubie

1.1. Cadre géologique et hydrologique

Le réseau karstique de Foussoubie se développe en totalité dans les calcaires crétacés à faciès Urgonien (calcaires blancs très purs, d'origine biochimique à rudistes et orbitolinidés, formés il y a environ 110 Ma). Cependant, le bassin versant de la goule se développe en grande partie sur les dépôts détritiques tertiaires imperméables de la dépression synclinale de Labastide-de-Virac. Une partie importante de ce bassin de 14km² est occupée par une surface plane vers 220m d'altitude, qui s'étend vers l'amont du bassin jusqu'à Vagnas et vers l'est jusqu'à Labastide-de-Virac. Les points les plus hauts du bassin culminent pour leur part à environ 360m au niveau de la surface du plateau de Ronze (Figure 2).

Sous le climat méditerranéen, le débit d'étiage, de l'ordre de quelques litres par seconde à l'exutoire, représente l'essentiel du fonctionnement hydrologique du réseau. Cependant, le réseau accuse régulièrement de spectaculaires épisodes de crue, qui par leur ampleur (plusieurs m³/s) et leur violence, ont déjà été à l'origine de quelques drames.

1.2. Organisation générale du réseau karstique

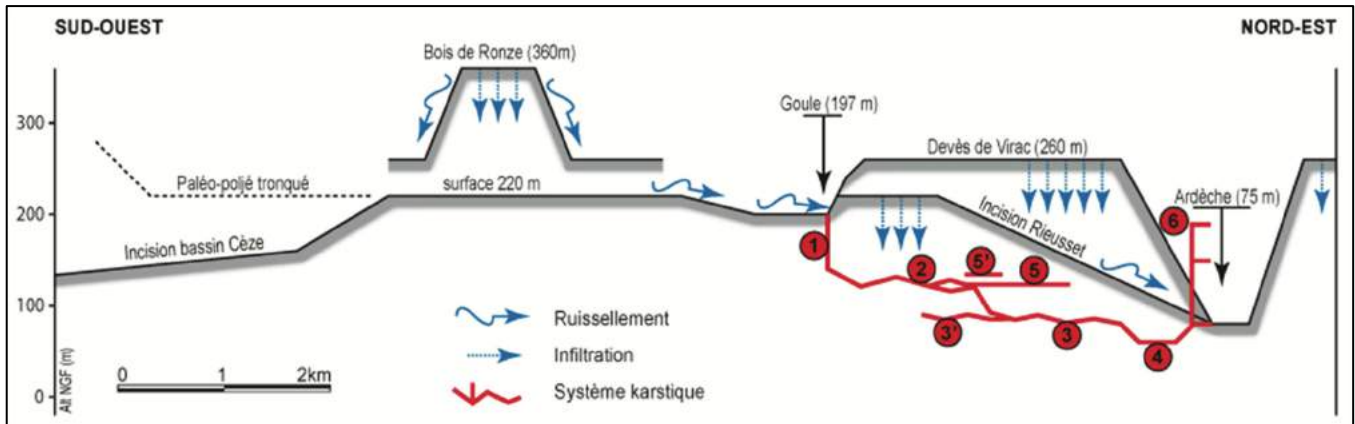


Figure 2 : Organisation longitudinale des conduits de Foussoubie (JAILLET, et al., 2014)

Il est possible de segmenter approximativement le réseau en quatre zones fonctionnelles (1-4) de l'amont vers l'aval (Figure 2). A ces quatre zones s'ajoutent des conduits fossiles (5-6).

Après une courte zone de puits (1) au niveau de l'entrée de la goule de Foussoubie, les galeries (2 et 3) sont des drains épihréatiques dont les altitudes oscillent entre 80 et 140m. L'ennoiement y est total en période de crue. La zone noyée du karst (4) est constituée principalement du siphon A de l'évent, à la cote de 78m. D'une longueur de 340m pour une profondeur de 20m, il s'enfonce plusieurs mètres sous le lit de l'Ardèche. Enfin, l'exutoire pérenne impénétrable est à peine perché à deux pas de l'Ardèche, tandis que l'exutoire de crue, l'évent de Foussoubie est situé une dizaine de mètres plus haut.

A l'aval de ce réseau, au droit de l'évent, une série de puits-cheminées (zone 6, Figure 2) pourraient correspondre à de paléo-exutoires ou du moins à des paléo-cheminées d'équilibre. On y retrouve notamment l'aven Cordier à une altitude de 145m et l'évent supérieur de Foussoubie à 191m (Figure 3). On notera de plus l'existence d'une sortie, non représentée ci-contre, en pleine paroi non loin de l'aven de Cordier, dite sortie diacalse.

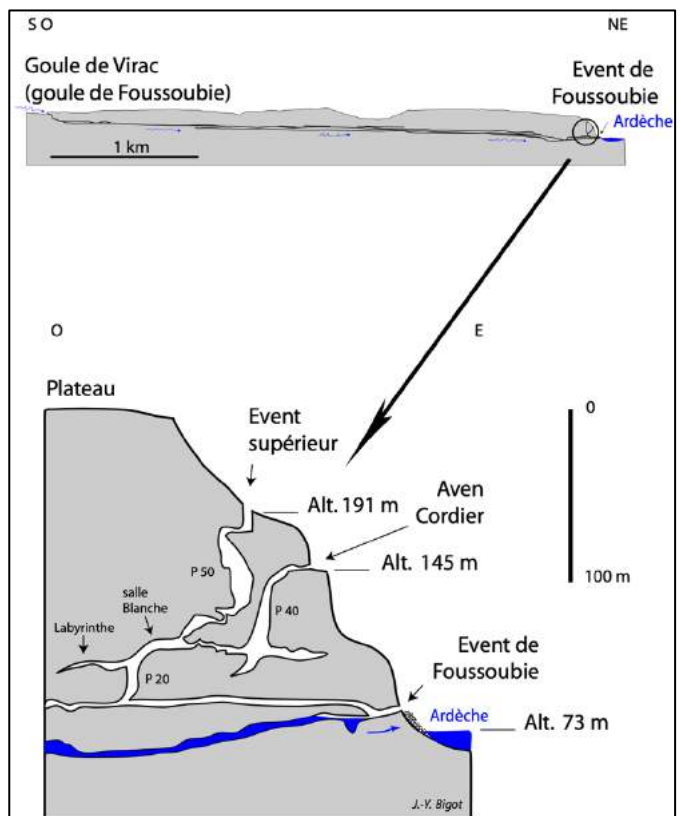


Figure 3 : Zoom sur l'organisation topographique de la zone 6, zone de l'évent de Foussoubie (JAILLET, et al., 2014)

Nous appellerons donc par la suite zone de l'évent de Foussoubie, cette zone exondée comprenant l'évent de Foussoubie, l'aven Cordier, la sortie diacalse et l'évent supérieur de Foussoubie.

1.4. Description spéléologique

Ces trois entrées interconnectées, toutes accessibles facilement à pied depuis le camping des Blachas sur la commune de Salavas (Figure 5), permettent de réaliser deux traversées spéléologiques, n'impliquant aucune remontée sur corde, et aujourd'hui équipées en rappelable :

- La traversée évent supérieur vers l'évent de Foussoubie.
- La traversée aven Cordier vers l'évent de Foussoubie.



Figure 5 : Accès aux différents orifices de la zone de l'évent de Foussoubie depuis le camping des Blachas

1.4.1. Traversée évent supérieur vers l'évent de Foussoubie

Pour accéder à l'évent supérieur depuis le camping des Blachas, il faut traverser le camping par sa route principale (Figure 5). Passer le pont submersible qui surplombe le Rieussec, et avant les terrains de tennis, prendre sur la droite un sentier sinueux qui monte sur le plateau surplombant le vallon du Rieussec (marquage rouge). Peu avant le plateau, prendre à gauche un sentier qui se dirige vers la falaise. Descendre enfin celle-ci sur une vingtaine de mètres pour rejoindre l'entrée qui se situe entre la falaise et un impressionnant pilier rocheux (Coordonnées UTM : X764,810 Y3233,415 Z191). Cet accès prend environ une trentaine de minutes. L'entrée offre d'ailleurs un joli point de vue sur le pont d'arc.

Pour réaliser la traversée, on accède, après la courte étroiture d'entrée, à une vaste plate-forme surplombant une série de puits totalisant une cinquantaine de mètres. Les volumes sont alors importants et le concrétionnement assez riche. Ce puits est fractionné aisément, avec de larges aires intermédiaires. Au fond du puits, on remonte alors sous l'arrivée de la corde, dans une diaclase étroite. Un puits de 5 m rejoint alors un autre passage étroit qui débouche au sommet d'une grande coulée dont la base forme une petite salle aux parois blanches. On poursuit par un passage bas à gauche, et on cherche ensuite dans la galerie la continuation à droite entre des concrétions. La galerie d'en face rejoint également le puits de la Rocade mais par un infâme ramping. On passe alors les "montagnes russes", qui conduisent par un plan incliné à la salle Blanche, ainsi nommée à cause des petites concrétions blanchâtres au plafond. C'est également dans cette salle que débouche la traversée depuis l'aven Cordier.

En aval de la salle, on contourne par une galerie à gauche la forte pente caillouteuse qui donne directement sur le puits de la Rocade. A cet endroit, arrive l'infâme ramping venant de l'évent supérieur, ainsi que la galerie menant à la sortie diaclase. On peut noter qu'au sommet de la Rocade, on peut accéder à des

galeries sableuses, et en traversant des zones labyrinthiques, aux siphons E et D. Au pied de la Rocade, magnifique puits de 20 m, on arrive dans la zone aquatique et active du réseau. A droite, c'est très rapidement le siphon qui barre l'accès du Réseau des Plongeurs. La sortie est à gauche et implique de franchir les reliques des siphons C1 et C2, désamorçés par de profondes tranchées. Enfin, après un passage glaiseux, on aperçoit la lumière du jour du porche de l'évent de Foussoubie. On peut encore faire un saut, à quelques mètres de là, au siphon A qui fait la jonction avec la Goule de Foussoubie (Figure 4). Cette traversée représente un dénivelé négatif de 103m pour un développement approximatif de 500m.

1.4.2. Traversée aven Cordier vers l'évent de Foussoubie

Pour accéder à l'aven de Cordier depuis le camping des Blachas, il suffit de traverser le camping par sa route principale (Figure 5). Au fond du camping démarre un sentier en bord de rivière. A l'embranchement, monter en direction de l'évent de Foussoubie. Avant de redescendre en direction du porche, prendre à droite le sentier qui grimpe sévèrement jusqu'au pied de la falaise. Utiliser alors la corde en place pour rejoindre la vire qui conduit à l'entrée de l'aven Cordier (Coordonnées UTM : X764,805 Y3233,445 Z145). Cet accès prend environ une quinzaine de minutes.

L'ouverture basse, au ras de la vire, se développe au travers d'une courte étroiture. Celle-ci débouche sur un plan incliné à 45°, qui conduit directement au sommet d'un puits de 40m. Au pied de ce puits, une vaste salle permet de patienter sous un plafond concrétionné. Au fond de la partie haute de cette salle, une étroiture double, dont le cheminement le plus aisé se situe légèrement perché sur la droite, permet de rejoindre la salle Blanche de l'évent (Figure 4). On peut alors terminer la traversée comme pour l'évent supérieur. Cette traversée représente un dénivelé négatif de 57m pour un développement approximatif de 500m.

1.5. Évent de Foussoubie, un exemple de « tube à vent »

Dans un réseau possédant au moins deux entrées, un courant d'air le traverse, entrant par un orifice pour en ressortir par un autre. Les « tubes à vent » sont des cavités possédant au moins deux entrées d'altitude différente, et présentant un courant d'air aux entrées les plus basses et les plus hautes qui change suivant les saisons.

En effet, une cavité souterraine a en général une température interne à peu près constante tout au long de l'année, égale à la température moyenne annuelle du site de la grotte. Dans le cas de l'évent de Foussoubie, cette température oscille autour de 13-14°C tout au long de l'année. De ce fait, l'air extérieur est en moyenne plus chaud que l'air interne de la cavité en été, et plus froid en hiver. En hiver, l'air froid extérieur entre par le bas (courant d'air aspirant) et s'échauffe au contact de l'air intérieur. La masse volumique de l'air chaud étant plus petite que celle de l'air froid, la poussée d'Archimède fait monter cet air chaud dans la cavité. L'air chaud s'échappe donc par le haut (courant d'air soufflant). L'été, le fonctionnement est inversé et l'air descend globalement dans la cavité. Le courant d'air est ainsi d'autant plus fort que l'écart entre température extérieure et température profonde de la cavité est grand, et que la différence d'altitude entre les entrées basse et haute est grande.

Il est important de noter ici que la zone de l'évent de Foussoubie est, d'un point de vue aérologique, indépendant du reste du réseau. Celui-ci n'y est en effet connecté que par des galeries noyées. On constate alors que la zone de l'évent de Foussoubie a bien un comportement de « tube à vent ».

Étant donnée la présence des deux entrées intermédiaires en terme d'altitude que sont l'aven Cordier et la sortie diacalse, cette zone du réseau est plus compliquée qu'un simple « tube à vent » à deux entrées. On retrouve bien cependant au porche de l'évent de Foussoubie, qui est le point bas de cette zone exondée du réseau, un courant d'air aspirant l'hiver et soufflant l'été. A l'inverse, au niveau de l'évent supérieur, qui est l'entrée la plus haute du réseau, on constate un courant d'air soufflant l'hiver et aspirant l'été. Du fait de l'étroitesse de l'entrée de l'évent supérieur, ce courant d'air y est d'ailleurs particulièrement sensible.

SEANCE DE PREPARATION EN CLASSE

Cette séance de préparation a lieu en classe entière, en présence du professeur de physique-chimie. Elle se déroule sur un créneau de 2h de cours.

1. Fiche de séance récapitulative

Thèmes de la séance	Introduction de la problématique globale : « Réalisation d'un bilan des différents débits d'air rencontrés dans un tube à vent complexe », et réalisation d'un protocole expérimental.
Compétences visées	- S'approprier une problématique. - Analyser à l'aide d'un modèle théorique. - Raisonner pour choisir, élaborer et justifier un protocole expérimental.
Objectifs opérationnels	1. Être capable de comprendre une topographie simplifiée en plan. 2. Être capable de faire des prévisions sur le sens du courant d'air à l'aide d'un modèle. 3. Être capable de formuler des hypothèses et proposer des stratégies de résolution pour mesurer la vitesse de l'air sur une section, ainsi que pour calculer la surface de cette section. 4. Être capable de choisir, élaborer et justifier un protocole expérimental de calcul de débits volumiques sur une section. 5. Être capable de choisir, en justifiant, des zones pertinentes de mise en application de ce protocole.
Prérequis théoriques	- Grandeurs macroscopiques de description d'un fluide au repos. - Notions de pression, actions exercées par un fluide sur une surface. - Loi fondamentale de la statique des fluides pour un fluide incompressible : $\Delta P = \rho g H$. - Loi des gaz parfaits.
Résumé du matériel nécessaire	- Une présentation PowerPoint succinct de la cavité. - Des topographies simplifiées en plan de la zone de l'évent de Foussoubie, imprimées en A4 (Une pour deux en fonction du nombre d'élèves). - Un tableau blanc avec des feutres.
Conduite de séance	
1. <u>Présentation de la cavité :</u> A partir de la présentation du réseau de Foussoubie, identification du cheminement des deux traversées sur les topographies simplifiées en plan de la zone de l'évent de Foussoubie. 2. <u>Courants d'air dans la cavité :</u> Rappel des grandeurs macroscopiques de description d'un fluide au repos. Introduction du modèle de « tube à vent ». Détermination, sur la topographie précédente et à partir de ce modèle, des sens des courants d'air à attendre dans le réseau au moment de la séance de terrain. 3. <u>Protocole expérimental de calcul de débit :</u> Introduction de la notion de débit. Brainstorming autour des méthodes de calcul de ce débit sur une section de galerie. Réalisation d'un protocole expérimental de calcul de ces débits. Concertation pour déterminer les zones les plus pertinentes de mesure de débit lors de la séance de terrain. Identification de ces zones sur la topographie précédente.	

Nous allons maintenant nous intéresser au détail de la mise en œuvre de chacune de ces trois étapes de notre conduite de séance.

1. Présentation du réseau de Foussoubie

Cette situation est réalisée par le professionnel de la spéléologie. Son objectif est que les élèves commencent à s'approprier la problématique en étant capables de situer, dans le réseau de Foussoubie, les traversées spéléologiques qui seront effectuées lors du séjour scolaire. Elle est organisée chronologiquement de la façon suivante :

Durée & Intervenant		Description
1	10 min DEJEPS	Présentation PowerPoint succincte du réseau de Foussoubie réalisée à partir de la deuxième partie de ce mémoire (Situation géographique, dimensions du réseau, cadre géologique et fonctionnement hydrologique, organisation générale du réseau).
2	5 min DEJEPS	- A partir de l'avant dernière planche du PowerPoint présentant une topographie simplifiée en coupe de la zone de l'évent de Foussoubie, présentation des différents orifices que comporte cette zone via un historique des explorations. - Le professionnel présente alors les deux traversées spéléologiques qu'il est possible d'y effectuer, et qui seront d'ailleurs effectuées lors du séjour scolaire.
3	15 min DEJEPS	- La dernière planche du PowerPoint présente une topographie simplifiée en plan de la zone de l'évent de Foussoubie pour permettre au professionnel de faire des explications collectives sur cette topographie. Elle est projetée sur un tableau blanc, ce qui permet de pouvoir l'annoter. - Les élèves sont alors répartis en binômes. - Une feuille contenant la même topographie que celle projetée est distribuée à chacun des binômes (Figure 6). <u>Consignes</u> : Par binôme, tracez avec deux stylos de couleur différente le cheminement des deux traversées présentées précédemment. <u>Critère de réussite</u> : 80% des binômes trouvent ces cheminements. <u>Régulations</u> : Le professionnel peut facilement simplifier l'exercice et donnant des indications supplémentaires sur la topographie projetée. <u>Correction</u> : Le professionnel (ou un élève choisi par le professionnel) réalise les deux tracés sur le tableau blanc sur lequel la topographie est projetée.

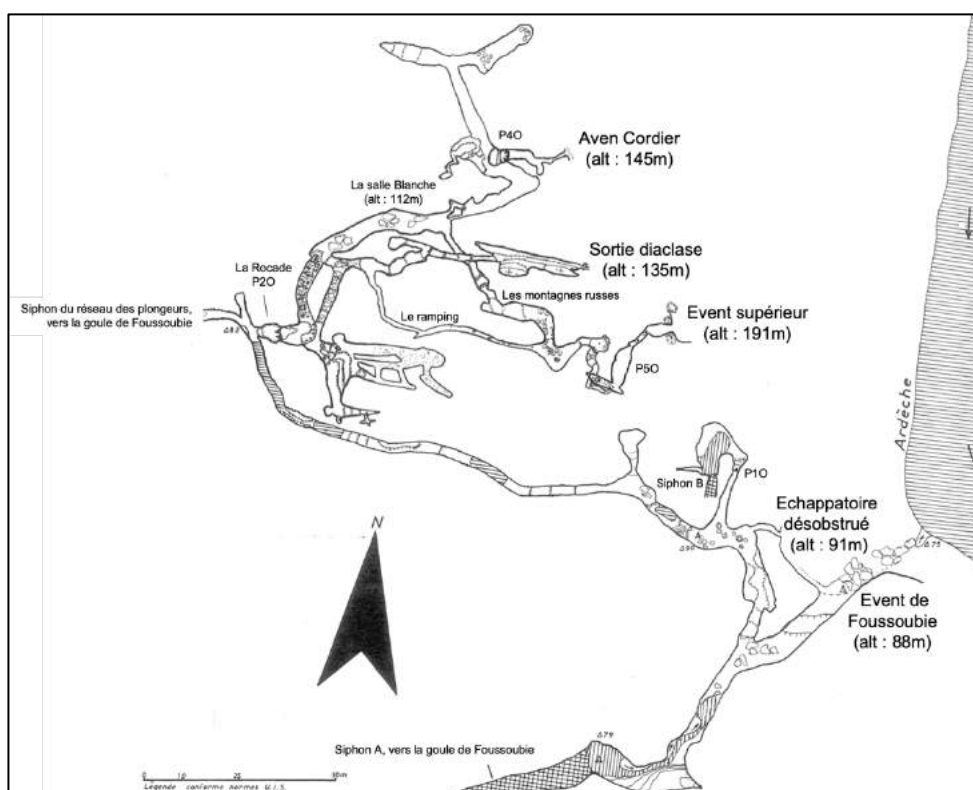


Figure 6 : Topographie simplifiée, en plan, de la zone de l'évent de Foussoubie

Les supports pédagogiques nécessaires à cette situation sont donc les suivants :

- Une présentation Powerpoint qui se compose des planches suivantes :
 - o Planche 1 : Figure 1 de ce mémoire.
 - o Planche 2 : Figure 2 de ce mémoire.
 - o Planche 3 : Figure 3 de ce mémoire, modifiée pour faire apparaître la sortie diacalse.
 - o Planche 4 : Figure 6 de ce mémoire.
- La Figure 6 imprimée au format A4, en assez d'exemplaires pour en avoir un par binôme.

2. Courant d'air dans la cavité

Cette situation est réalisée en partie par le professeur, en partie par le professionnel de la spéléologie. Son premier objectif est que les élèves raisonnent à l'aide d'un modèle théorique de tube à vent. Ils devront ainsi être capables dans un premier temps de déterminer le terme moteur du courant d'air s'établissant dans ce type de cavité. Et dans un deuxième temps, être capables d'anticiper les sens des courants d'air à attendre dans le réseau au moment de la séance de terrain. Le second objectif est qu'ils continuent de s'approprier la problématique. Pour se faire, ils devront être capables de situer sur la topographie précédente, les galeries où il n'est à priori pas possible de prévoir le sens du courant d'air simplement à partir de ce modèle. On introduit ainsi la notion de tube à vent complexe et l'intérêt de la séance de terrain, dans la résolution de la problématique du cycle.

Pour cette situation, les connaissances théoriques pré-requises sont les suivantes :

L'air est caractérisé par différentes grandeurs thermodynamiques :

- La masse volumique ρ (en kg.m^{-3}). Cette masse volumique dépend en premier lieu de la composition de l'air, notamment son taux d'humidité. De plus, l'air étant un fluide compressible, cette masse volumique varie aussi avec la pression et la température.
- La pression P exprimée en Pascale (Pa).
- La température T (en degré Kelvin sachant que $0 \text{ K} = -273,15 \text{ }^\circ\text{C}$).
- La vitesse U (en m.s^{-1}).

La relation entre la masse volumique ρ , la température T et la pression p est traduite par l'équation d'état. On peut, en négligeant l'humidité de l'air, utiliser en approximation simple la loi des gaz parfaits, c'est à dire :

$$\rho = \frac{P \cdot M}{R \cdot T}$$

Dans cette expression, R est la constante des gaz parfaits ($R = 8,3144621 \text{ J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$), M est la masse molaire ($M = 29.10^{-3} \text{ kg.mole}^{-1}$ pour l'air sec). On remarque ainsi que la masse volumique de l'air chaud est plus petite que celle de l'air froid.

Par ailleurs, dans un fluide incompressible en équilibre (pas de mouvement), l'équation fondamentale de la statique des fluides nous dit que la variation de pression entre deux plans horizontaux, distants d'une hauteur H , est égale au poids de la colonne de fluide entre ces deux plans, c'est-à-dire :

$$\Delta P = \rho \cdot g \cdot H$$

Où g est l'accélération de la pesanteur ($g = 9,81 \text{ m.s}^{-2}$).

Le support pédagogique utilisé dans cette situation est simplement le dessin ci-contre (Figure 7) :

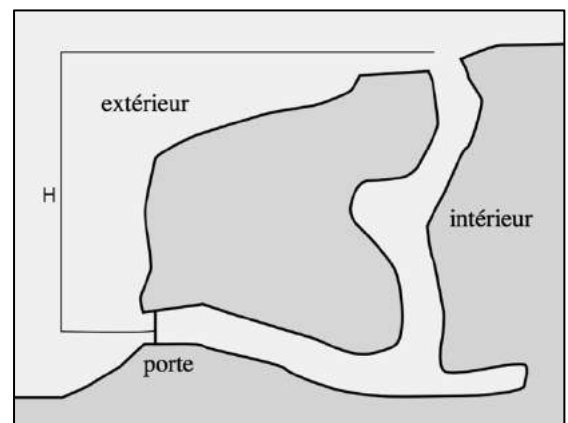


Figure 7 : Dessin de l'exercice de calcul de différence de pression

Cette situation est organisée chronologiquement de la façon suivante :

Durée & Intervenant	Description
1 15 min PROF	- Le professeur fait un bref rappel si nécessaire, des notions théoriques qui ont été vues durant l'année scolaire (grandeurs macroscopiques de description d'un fluide au repos, notion de pression, équation fondamentale de la statique des fluides, loi des gaz parfaits). - Pendant ce temps, le professionnel dessine la Figure 7 au tableau. <u>Consignes</u> : Individuellement et à partir de la Figure 7, déterminez l'expression des pressions exercées localement de part et d'autre de la porte par les colonnes d'air de hauteur H, à l'intérieur et à l'extérieur de la grotte. En considérant la différence de pression moyenne entre l'extérieur et l'intérieur de la grotte comme négligeable, qu'advient-il des pressions exercées localement de part et d'autre de la porte si la température moyenne extérieur T_{ext} est supérieure à celle T_{int} à l'intérieur de la grotte ? Et inversement ? <u>Critère de réussite</u> : 80% répondent $T_{ext} > T_{int} \Rightarrow P_{ext \rightarrow porte} < P_{int \rightarrow porte}$, et inversement. <u>Régulations</u> : Le professeur simplifie en donnant l'expression $\Delta P_{porte} = (\rho_{ext} - \rho_{int}) \cdot g \cdot H$ <u>Correction</u> : Le professeur (ou un élève choisi) explique le raisonnement en utilisant la loi des gaz parfaits pour montrer que $T_{ext} > T_{int} \Rightarrow \rho_{ext} < \rho_{int} \Rightarrow P_{ext \rightarrow porte} < P_{int \rightarrow porte}$. - Questionnement oral : Que se passe-t-il si on ouvre la porte ?
2 15 min DEJEPS	- Explication de la température quasi constante d'une cavité, correspondant à la température moyenne annuelle du site de la grotte. - Introduction de la notion de tube à vent. Le professionnel questionne oralement les élèves sur le sens du courant d'air dans les cavités possédant au moins deux entrées d'altitude différente, en hiver, et en été. Toujours par questionnement oral, que se passe-t-il si la cavité possède plus de deux entrées ? <u>Consignes</u> : Sur les topographies distribuées, chaque binôme doit placer, aux endroits où il le juge possible, le sens du courant d'air qu'on est susceptible de rencontrer lors de la séance de terrain. <u>Critère de réussite</u> : Tous les binômes placent au moins un courant d'air soufflant à l'évent et un courant d'air aspirant à l'évent supérieur. <u>Régulations</u> : Le professionnel peut simplifier l'exercice en ré-indiquant les orifices extrêmes, haut et bas, du réseau. <u>Correction</u> : Le professionnel (ou un élève choisi) place, sur le tableau blanc sur lequel la topographie est de nouveau projetée, les courants d'air que les élèves jugent prévisibles grâce à l'utilisation du modèle de tube à vent. Il souligne les zones où les élèves n'ont pas jugé possible de déterminer à l'avance le sens du courant d'air. - Le professionnel introduit de fait la notion de tube à vent complexe et la problématique générale du cycle. Il montre l'intérêt de la séance de terrain, consistant à mesurer les débits d'air dans les différentes galeries du réseau, dans la résolution de cette problématique.

3. Protocole expérimental de calcul de débit

Cette situation est de nouveau réalisée en partie par le professeur, en partie par le professionnel de la spéléologie. Son premier objectif est que les élèves raisonnent pour être capables de choisir, élaborer et justifier un protocole expérimental. Le second objectif est que les élèves finissent de s'approprier la problématique en étant capables de situer, dans le réseau de Foussoubie, les zones où il sera le plus pertinent de mettre en application ce protocole de mesure de débit précédemment élaboré.

Cette situation requière d'introduire les notions théoriques suivantes :

Dans une galerie où circule l'air, on appellera section de passage S (en m^2) la surface à travers laquelle s'écoule l'air. Le débit q est alors la quantité de matière qui passe à chaque unité de temps t (en s) à travers cette section. Cette quantité de matière est exprimée en masse m (en kg), on parle alors de débit massique q_m en $(kg.s^{-1})$, ou en volume V (en m^3), et on parle alors de débit volumique q_v (en $m^3.s^{-1}$) :

$$q_m = \frac{m}{t}$$

$$q_v = \frac{V}{t}$$

Il est commode de mesurer un débit volumique q_v en utilisant la vitesse moyenne de l'air U_{moy} sur une section de passage S :

$$q_v = U_{\text{moy}} \cdot S$$

Cette situation est organisée chronologiquement de la façon suivante :

Durée & Intervenant	Description
1 30 min PROF	- Le professeur introduit la notion de débit. - Il montre que pour calculer un débit volumique d'air sur une section de galerie, il suffit de mesurer la vitesse de l'air au niveau d'une section, et de mesurer l'aire de cette section. <u>Consignes</u> : En binôme, trouvez une méthode de détermination du sens du courant d'air, ainsi que deux méthodes possibles pour mesurer la vitesse de l'air au niveau d'une section de galerie. Faites de même pour des méthodes de mesure d'aire d'une section de galerie. <u>Critère de réussite</u> : Chaque binôme a trouvé au moins quatre méthodes différentes. <u>Régulations</u> : Le professeur simplifie en donnant des indices (appareils électroniques, utilisation de formes géométriques...). Il peut aussi complexifier en demandant de trouver plus de deux méthodes différentes pour chaque grandeur. <u>Synthèse</u> : - Chaque binôme expose ces méthodes à l'oral et le professeur note toutes les méthodes différentes au tableau. - En concertation avec les élèves, ces méthodes sont placées dans un graphique précision/faisabilité dessiné au tableau. - Pour la mesure de la vitesse de l'air, c'est finalement l'utilisation d'un anémomètre à fil chaud qui sera imposé pour des questions de précision et de faisabilité. Le protocole exact de mesure restera à déterminer. - Pour la détermination du sens du courant d'air et la mesure de l'aire de la section, on retiendra 3 méthodes pour chaque : Celles ayant le rapport précision/faisabilité le plus intéressant. <u>Par exemple pour la mesure de l'aire de la section</u> : 1. Assimilation de la section de galerie à une forme géométrique simple dont on connaît la formule de l'aire (exemple : assimilation à un disque dont l'aire $S = \pi.R^2$). 2. Division de la section en une somme approximative de rectangles. L'aire de la section est alors la somme des aires de ces rectangles. 3. Dessin approché, mais à l'échelle, de la section sur du papier millimétré. Calcul de l'aire par comptage du nombre de carreaux (pleins et fractionnés) présents à l'intérieur de cette section. Multiplication du nombre de carreaux par la surface réelle d'un carreau.
2 15 min PROF & DEJEPS	- Rédaction au tableau d'une ébauche de fiche protocolaire de mesure de débit sur une section de galerie. <u>Consignes</u> : Par binôme, proposez à tour de rôle, oralement, un point pertinent à faire apparaître sur cette fiche protocolaire. Le professeur complète alors l'ébauche, ou non, si le point est effectivement pertinent, ou non. <u>Critère de réussite</u> : Au bout d'une dizaine de minutes, la fiche protocolaire est complète. <u>Régulations</u> : Le professeur peut simplifier l'exercice en remplissant lui-même une partie de la fiche à partir de la situation précédente, ou en insistant sur les points clés devant apparaître sur cette fiche (conditions de mesures, méthode utilisée, mesures effectuées...). Il peut complexifier en demandant à chaque binôme de rédiger de son côté sa propre fiche, avant de faire une mise en commun.

3	15 min DEJEPS	- Le professionnel projette de nouveau, sur le tableau blanc, la topographie simplifiée en plan. Il annote de nouveau cette dernière avec les résultats des exercices précédents si ces annotations ont été effacées. - Il explique alors comment sera organisée la séance de terrain : Lors de cette séance de terrain, un groupe fera la traversée de l'évent supérieur vers l'évent de Foussoubie, à la journée. Et trois groupes feront la traversée depuis l'aven Cordier vers l'évent de Foussoubie, à la demie journée. Dans chacun de ces groupes, on constituera trois/quatre binômes/trinômes (suivant la taille des groupes) effectuant chacun une mesure de débit sur une section de galerie différente. <u>Consignes :</u> Par binôme, entourez sur les topographies distribuées en début de séance, les quatre zones les plus pertinentes où mettre en application le protocole expérimental précédemment élaboré. Ces zones doivent respecter les contraintes organisationnelles et d'intérêt suivantes : 1. Trois zones sur le cheminement de la traversée depuis l'aven Cordier 2. Une zone sur la partie indépendante du cheminement de la traversée depuis l'évent supérieur. 3. Chacune des zones doit présenter au moins, dans un rayon restreint, trois galeries différentes où effectuer la mesure de débit. 4. Les mesures entre les différentes zones doivent être réalisées au maximum sur des galeries différentes. Le but étant de réaliser un bilan des débits dans le réseau le plus complet possible. <u>Critère de réussite :</u> Chaque binôme a placé au moins trois zones respectant l'ensemble des contraintes. <u>Régulations :</u> Le professionnel peut simplifier en faisant une démonstration et en plaçant une de ces zones sur le plan projeté tout en justifiant oralement son choix. <u>Correction :</u> Le professionnel (ou un élève choisi) place, sur le tableau blanc sur lequel la topographie est projetée, les quatre zones répondant le mieux aux contraintes, tout en justifiant oralement ses choix. - Le professionnel indique alors que cette topographie simplifiée, annotée du cheminement des traversées, des courants d'air attendus lors de la séance de terrain, et des zones de mesure de débit, sera ajoutée à la fiche protocolaire. L'intérêt est de pouvoir facilement, lors de la séance de terrain, repérer la zone de mesure lors de la traversée. Il est aussi de pouvoir annoter la topographie en plaçant exactement, pour chaque mesure, la section de galerie où elle est effectuée, ainsi que le sens et l'intensité du courant d'air constaté.
---	------------------	---

Cette situation ne nécessite à priori aucun support pédagogique spécifique. Elle peut cependant, en régulation en fonction du timing, être rendue plus concrète par la présentation physique des différents types d'appareil de mesure des grandeurs thermodynamiques caractérisant l'air (baromètres, anémomètres à hélice, anémomètres à fil chaud...). Cette régulation sera alors faite au moment de la synthèse du premier exercice de cette situation.

4. Conclusion de cette séance

A l'issue de cette séance préparatoire en salle, le professeur ainsi que le professionnel de la spéléologie, se sont assurés que les élèves ont parfaitement assimilé la problématique générale du cycle de séances. De plus, cette séance aura permis aux élèves, grâce à un rappel des notions théoriques vues durant l'année scolaire, d'utiliser un modèle pour comprendre et prévoir le fonctionnement d'un phénomène concret. La nécessité de réaliser des mesures, pour compléter les résultats du modèle, aura enfin été soulignée. Pour finir, les élèves auront été acteurs de la démarche scientifique en élaborant une fiche protocolaire de mesure de débit sur une section de galerie.

Entre cette séance et la séance de terrain, le professeur et/ou le professionnel de la spéléologie prendra/ont alors soin de mettre au propre la fiche protocolaire réalisée sur le tableau, en y ajoutant la topographie simplifiée et annotée. La fiche obtenue devrait ressembler à la fiche suivant (Figure 8) :

Fiche protocolaire de mesure de débit sur une section de galerie		
Nom des membres du groupe : 1. 2. 3.	Date :	Cavité :
Entrée : Horaire : Température : Pression atmosphérique : Courant d'air constaté (sens & intensité) :	Sortie : Horaire : Température : Pression atmosphérique : Courant d'air constaté (sens & intensité) :	
Topographie : Repérez la section de galerie où est effectuée la mesure. Indiquez le sens et l'intensité du courant d'air constaté (Cf. légende).		
Légende : → Cheminement de la traversée depuis l'évent supérieur → Cheminement de la traversée depuis l'aven Cordier → Cheminement commun aux deux traversées → Courants d'air faibles → Courants d'air forts → Courants d'air violents Zones de mesures expérimentales		
Méthode utilisée pour déterminer le sens du courant d'air au niveau de la section de galerie : ☐ Doigt humidifié ☐ Visage placé face au courant d'air soufflant ☐ Fumées et odeurs de combustion d'un papier d'Arménie		
Dessin à l'échelle de la section de galerie :	Échelle (1cm =)	
	Mesures des dimensions de la galerie : Reportez toutes les mesures effectuées sur le dessin.	
	Calcul de l'aire de la section : Méthode utilisée : ☐ Assimilation à une forme géométrique simple ☐ Somme de surfaces rectangulaires ☐ Comptage du nombre de carreaux Calcul détaillé suivant la méthode utilisée : S =(m ²)	
	Mesures locales de la vitesse de l'air au niveau de la section : Placez l'emplacement des mesures réalisées sur le dessin. U ₁ =(m.s ⁻¹) U ₂ =(m.s ⁻¹) U ₃ =(m.s ⁻¹) U ₄ =(m.s ⁻¹) U ₅ =(m.s ⁻¹)	
	Mesure de la température et de la pression de l'air au niveau de la section : T =(°C), P =(Pa)	
	Calcul de la vitesse moyenne de l'air sur la section : U _{moy} = 0,8.U _{max} =(m.s ⁻¹)	
	Calcul du débit volumique d'air au niveau de la section : q _v = U _{moy} .S =(m ³ .s ⁻¹)	

Figure 8 : Exemple de fiche protocolaire expérimentale finale réalisée par les élèves, mise au propre

1. Déroulement du séjour scolaire

Il a été ici choisi d'organiser un séjour scolaire multisports, se déroulant sur trois jours, transport exclu. Ce séjour est destiné à une classe entière (24 à 32 élèves) accompagnée au minimum de l'enseignant de physique-chimie. La classe est alors divisée en quatre groupes de 6 à 8 élèves (suivant l'effectif de la classe). Ces groupes ont chacun une dominante sportive (spéléologie, et par exemple escalade, canoë et randonnée), et les élèves peuvent choisir, dans la mesure du possible, la dominante qu'ils désirent (Figure 9).

Groupes à dominante		Spéléologie	Escalade	Canoë	Randonnée	
Effectifs		6 à 8 élèves + 1 enseignant	6 à 8 élèves + 1 enseignant	6 à 8 élèves + 1 enseignant	6 à 8 élèves + 1 enseignant	
Activités	Jour 1	Matin (Départ 8h00)	Escalade	Course d'orientation	Canoë - mini 7km	Spéléo - Cordier
		Après midi (Départ 13h30)	Spéléo - 2 avens	Escalade	Course d'orientation	Canoë - mini 7km
	Jour 2	Matin (Départ 8h00)	Canoë - mini 7km	Spéléo - Cordier	Escalade	Course d'orientation
		Après midi (Départ 13h30)	Course d'orientation	Canoë - mini 7km	Spéléo - Cordier	Escalade
	Jour 3	Matin (Départ 9h00)	Traversée événement supérieur - événement de Foussoubie	Escalade journée	Canoë journée - 24km	Randonnée à la journée
		Après midi				

Figure 9 : Exemple de planning organisationnel du séjour multisport proposé

Grâce à cette organisation, chacun des quatre groupes pratique, les quatre sports proposés. Lors des deux premiers jours du séjour, ils tournent chaque demi-journée sur ces quatre sports. Le troisième jour il est proposé, pour chaque groupe, une journée entière de pratique dans sa dominante respective. Par exemple pour l'activité spéléologie qui nous concerne, le groupe dont c'est la dominante effectue d'abord, le temps d'une demi-journée, une séance de familiarisation avec l'équipement et les techniques de déplacement sur agrès utilisées en spéléologie. Cette séance est réalisée par exemple dans la grotte des 2 Aven. Dans le même temps, les trois groupes dont ce n'est pas la dominante effectuent, le temps d'une demi-journée, la traversée depuis l'aven Cordier. Le troisième jour, le groupe à dominante spéléologie effectue alors, à la journée, la traversée plus exigeante techniquement depuis l'évent supérieur de Foussoubie.

Cette organisation permet donc aux élèves, d'effectuer un séjour multisport complet, tout en mettant l'accent sportif sur la discipline qu'ils ont choisie. Et elle permet donc bien, de notre côté, de répartir tous les élèves de la classe sur les différentes zones d'application du protocole de mesure. Elle présente enfin l'intérêt, tout en conservant des tailles de groupe adaptées, de ne solliciter qu'un seul professionnel par sport proposé. Il est donc envisageable de mettre en place ce séjour au sein d'un bureau de moniteur proposant ces quatre sports, et que chacun des autres professionnels propose des séances pédagogiques similaires en collaboration avec les professeurs des autres matières de la classe (SVT, mathématiques, histoire/géographie...).

Par commodité organisationnelle, l'hébergement de ce séjour scolaire est effectué par le camping des Blachas, sur la commune de Salavas. En effet, ce camping dispose de toutes les infrastructures, ainsi que du savoir-faire, nécessaires au bon déroulement de ce type de séjour. Toutes les activités proposées sont accessibles directement depuis le camping, il n'est donc à priori pas nécessaire de prévoir du transport pour se rendre sur les lieux de pratique. Il convient juste de noter que le dernier jour, le repas de midi ne sera pas pris sur place mais qu'un pique-nique adapté à prévoir. Celui-ci sera emmené par les élèves sur les lieux activités.

2. Fiche de séance récapitulative

Cette séance se déroule donc en petits groupes de 6 à 8 élèves, soit sur une demie journée (créneau de 4h), soit sur une journée entière (créneau de 7h environ). Lors de ces sorties spéléologiques, les élèves du groupe sont à chaque fois accompagnés du professeur de physique-chimie.

Thème de la séance	Mise en œuvre du protocole expérimental en respectant les étapes et procédures.
Compétences visées	- Raisonner à l'aide d'un modèle théorique. - Analyser pour adapter un protocole expérimental. - Réaliser un protocole expérimental.
Objectifs opérationnels	1. Être capable de se repérer sur topographie simplifiée en plan. 2. Être capable d'utiliser un modèle théorique pour choisir une section précise de galerie où mettre en œuvre un protocole expérimental. 3. Être capable d'adapter la méthode de mesure, en justifiant, aux réalités du terrain. 4. Être capable de mesurer une vitesse, une pression et une température de l'air au niveau d'une section de galerie. 5. Être capable de réaliser des mesures pour calculer la surface de cette section. 6. Être capable de calculer le débit volumique d'air sur cette section.
Prérequis théoriques	- Notion de lignes de courant et de courants de recirculation. - Notion de profil de vitesses dans une galerie.
Résumé du matériel nécessaire (En fonction du protocole réalisé par les élèves) Le matériel de mesure doit être conditionné dans un kit	- L'ensemble du matériel de spéléologie adapté à cette sortie, fourni par le professionnel. - Une topographie simplifiée en plan de la zone de l'évent de Foussoubie, sur laquelle ont été reportés au propre les éléments de la séance précédente, imprimées en A4 et plastifiées. - Du papier d'Arménie et un briquet. - Un anémomètre thermoélectrique à fil chaud (3/4 si possible serait plus confortable). - Un baromètre électronique (ou par défaut un altimètre). - Un thermomètre électronique précis (fonction normalement assurée par l'anémomètre). - Un télémètre laser pour les grandes sections, ou les plafonds hors d'atteinte. - Un petit tableau blanc avec des feutres. - Une feuille de protocole expérimental réalisée lors de la séance précédente pour chaque binôme/trinôme (3 ou 4, mais on peut en prévoir plus au cas où on aurait le temps de faire une autre mesure). - 3/4 supports et stylos. - 3/4 mètres ruban à enrouleur et/ou décimètre. - 3/4 calculatrices. - Un appareil photo (celui du téléphone du professeur est suffisant).
Conduite de séance	
1. <u>Prise en main, équipement, marche d'approche, briefing et didactique de progression sur agrès simples.</u> 2. <u>Progression dans la traversée jusqu'à la zone de mesure choisie :</u> Rappel, au départ de la traversée et grâce à la topographie réalisée lors de la première séance, de la zone de mesure choisie pour le groupe. Identification de cette zone par le groupe lorsqu'elle est atteinte. 3. <u>Réalisation du protocole de mesure :</u> Introduction brève des notions de lignes de courant et de courants de recirculation. Introduction de la notion de profil de vitesses dans une galerie. Choix adapté, en fonction de ces connaissances, de la section sur laquelle sera mesurée le débit d'air. Choix des méthodes de mesure en fonction de la section. Réalisation des observations, mesures et calculs prévus dans le protocole. 4. <u>Fin de la traversée, retour au camping, déséquipement et bilan de la sortie.</u>	

Nous allons maintenant nous intéresser au détail de la mise en œuvre de chacune des étapes de notre conduite de séance. Pour ne pas surcharger ce mémoire, les étapes concernant uniquement le déroulement d'une séance classique d'encadrement en spéléologie ne seront pas détaillées. Ainsi, nous nous focaliserons ici uniquement sur les deux étapes centrales de notre conduite de séance.

3. Identification de la zone de mesure

Cette situation est assurée par le professionnel de la spéléologie. Son objectif pour les élèves est qu'ils se remémorent la problématique en étant capable, tout de long de la traversée, de se situer par rapport à la topographie en plan simplifiée étudiée lors de la séance précédente. Cette situation est organisée chronologiquement de la façon suivante :

Durée & Intervenant		Description
1	5 min DEJEPS	- Juste avant de rentrer dans la cavité, le professionnel place les élèves assis, face à lui. - Il sort la topographie simplifiée en plan de la zone de l'évent de Foussoubie, sur laquelle ont été reportés au propre les éléments de la séance précédente, imprimée en A4 et plastifiée. - Il rappelle, sur cette topographie, les conclusions de la séance précédente. C'est-à-dire le cheminement des traversées, les sens des courants d'air anticipés par les élèves, et enfin les zones de mesure de débit sélectionnées. Il rappelle brièvement pourquoi ces zones ont été choisies, et celles sur laquelle ce groupe s'arrêtera pour effectuer ses mesures. <u>Consignes</u> : Mémorisez grossièrement cette topographie. Tout au long de la traversée, soyez attentifs à votre environnement pour être à même d'identifier les différentes zones quand on y arrivera. <u>Critère de réussite</u> : La majorité des élèves identifient les différentes zones rencontrées durant la traversée. <u>Régulations</u> : Le professionnel peut ressortir plusieurs fois la topographie tout du long de la traversée, pour que les élèves puissent régulièrement se resituer dans le parcours.

Cette situation nécessite donc comme support pédagogique la topographie simplifiée en plan de la zone de l'évent de Foussoubie, sur laquelle ont été reportés au propre les éléments de la séance précédente, imprimée en A4 et plastifiée.

Attention, avant d'entrer dans la cavité, le professeur ne doit pas oublier de réaliser une mesure de température, de pression et de noter l'horaire. Celui-ci peut par exemple faire une photo des relevés du thermomètre et du baromètre, et faire une capture écran de son portable pour y figer l'horaire de mesure. Ces relevés seront donnés aux élèves lorsqu'ils réaliseront les mesures similaires en sortie de cavité. Les élèves sont, dans le même temps, invités à observer rapidement si le courant d'air à leur entrée est soufflant ou aspirant, et son intensité.

Du point de vu des horaires, le professionnel de la spéléologie connaît le temps d'activité nécessaire pour arriver, suivant les groupes, sur les différentes zones de mesure. Il faut compter en effet :

- 3h environ pour atteindre la zone 1. Une fois arrivé sur cette zone, le groupe effectuant la traversée à la journée prendra donc son repas, avant de réaliser le protocole de mesure.
- 1h45 environ pour atteindre les zones 2 et 3.
- 2h30 environ pour atteindre la zone 4.

4. Réalisation du protocole de mesure

Cette situation est réalisée conjointement entre le professeur et le professionnel de la spéléologie. Son premier objectif est que les élèves raisonnent à partir de modèles de circulation d'air dans une galerie, pour être capables de choisir la section de mesure qui donnera les résultats les plus satisfaisants. De même, ils sont amenés à analyser les réalités du terrain pour être capables de choisir la méthode de mesure la plus adaptée aux spécificités de leur section. Son second objectif est que les élèves réalisent leur protocole expérimental en étant capables de calculer l'aire d'une section, de calculer une vitesse moyenne d'écoulement, et d'en déduire un débit volumique sur cette section.

Cette situation nécessite d'abord les apports théoriques suivants. Les figures, utilisées en étant dessinées, servent de support pédagogique lors de cette situation (Figure 10 et Figure 11) :

Une ligne de courant est une courbe de l'espace décrivant le mouvement d'un fluide. En pratique, le mouvement d'une poussière (de masse volumique égale à celle du fluide) emportée par cet écoulement trace une ligne de courant.

Au niveau des élargissements brusques de la galerie, comme au niveau des virages, le courant d'air se décolle de la paroi et un tourbillon prend naissance au niveau de la paroi. Cet effet est lié aux forces d'inertie sur l'écoulement qui a tendance à aller tout droit. Localement, le sens du courant d'air peut donc être inversé, impliquant de grosses erreurs de mesure de débit. Le choix de la section de mesure est donc particulièrement important (Figure 10).

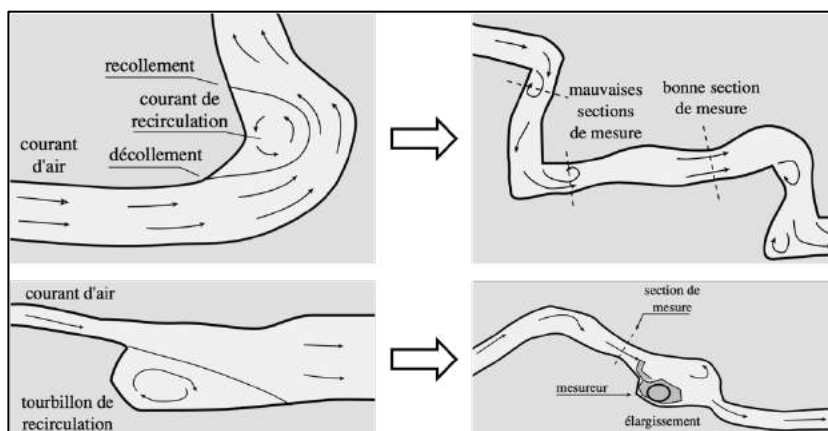


Figure 10 : Tourbillons de recirculation et choix de la section de mesure

Enfin, il faut se souvenir que la chaleur du corps du spéléologue, ainsi que son souffle, amorcent un léger courant d'air ascendant. Afin de ne pas perturber notre mesure, on prendra donc soin de mesurer un courant d'air sur une section de galerie la plus horizontale possible.

La répartition transversale des vitesses de l'air (dit profil des vitesses) n'est simple que si la galerie est assez rectiligne. Sinon on a vu précédemment qu'il peut y avoir décollements, tourbillons et recirculations. Elle sera encore plus simple si la section d'observation succède à une diminution de la section. Dans ce cas, la vitesse moyenne est assez uniforme dans toute la section, sauf au voisinage des parois où les frottements visqueux freinent les couches fluides voisines des parois (couches limites, cf. Figure 11).

Comme la vitesse est ici mesurée a priori au milieu de la galerie, à l'endroit où elle est la plus grande, on a intérêt à appliquer un facteur de réduction pour calculer la vitesse moyenne. On pourra alors prendre 0,7 ou 0,8 (0,7 si la paroi est très compliquée, 0,8 si la paroi est plus régulière). On obtient donc :

$$U_{\text{moy}} \approx 0,8 \cdot U_{\text{max}}$$

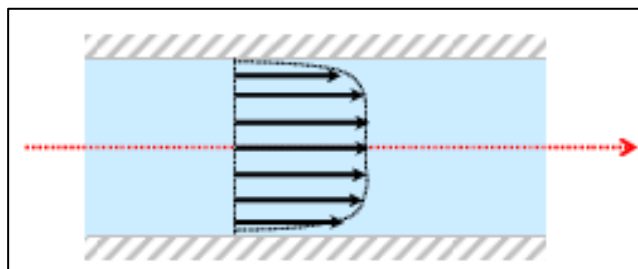


Figure 11 : Profil de vitesse du courant d'air dans une galerie

Cette situation est organisée chronologiquement de la façon suivante :

Durée & Intervenant		Description
1	25 min	- L'intervenant place les élèves assis, face à lui, et éteint sa lampe frontale. - En utilisant le petit tableau blanc, sur lequel il dessine la Figure 10, il fait une introduction brève des notions de lignes de courant et de courant de recirculation. - Il souligne l'importance du choix d'une section la plus horizontale possible de galerie. - Il introduit de même brièvement, en utilisant la Figure 11, la notion de profil de vitesses dans une galerie. Il donne ainsi la relation permettant de calculer, à partir des mesures, la vitesse moyenne de l'air sur la section. - Il présente enfin les différents appareils de mesure et de leur fonctionnement respectif. - Il constitue alors trois ou quatre binômes/trinômes en fonction de l'effectif du groupe et du matériel disponible.
	PROF et/ou DEJEPS	

1	25 min PROF et/ou DEJEPS	<u>Consignes :</u> Par binôme/trinôme, en vous répartissant les différentes galeries de la zone, déterminez précisément l'emplacement de votre section de mesure. Cette section doit rester dans un rayon d'une dizaine de mètre du centre de la zone, et doit surtout permettre une mesure de débit satisfaisante au vu des notions abordées à l'instant. <u>Critère de réussite :</u> Chaque binôme/trinôme trouve une section satisfaisante. Le matériel nécessaire à la mesure, ainsi qu'une fiche protocolaire lui est alors distribuée par un encadrant. <u>Régulations :</u> L'encadrant rappelle d'abord au binôme les critères de sélection d'une section satisfaisante. Il peut ensuite simplifier en jouant à chaud-froid avec ce binôme pour lui faire trouver une section préalablement repérée.
2	20 min PROF & DEJEPS	<u>Consignes :</u> Appliquez, sur votre section, le protocole de mesure préparé lors de la séance en salle. Vous prendrez soin d'adapter les méthodes utilisées aux spécificités de votre section. - Pendant l'exercice, les encadrants font tourner l'anémomètre, le thermomètre et le baromètre entre les groupes au cas où il n'y en ait pas un par groupe. - Le professeur en profite pour réaliser une photo de chaque section, en contre-jour, en y faisant apparaître l'échelle. Cette photo pourra servir, éventuellement, à évaluer la qualité du travail réalisé par les binômes pour calculer l'aire de leur section. <u>Critère de réussite :</u> Tous les binômes ont intégralement rempli leur fiche protocolaire. <u>Régulations :</u> Si un binôme/trinôme fini largement avant les autres, il est possible de lui donner une autre fiche protocolaire. Ce binôme/trinôme peut ainsi faire une autre mesure sur une autre section de la même galerie (ou sur une autre galerie, mais sans gêner les autres groupes). Il est possible de simplifier en réexpliquant les différentes méthodes de mesure utilisables, et dans quel cas les utiliser. L'encadrant peut aussi directement indiquer au binôme/trinôme quelle est la méthode de mesure la plus adaptée dans son cas. (Par exemple, utiliser du papier d'Arménie si le courant d'air est difficilement sensible). - Les encadrants récupèrent le matériel de mesure, ainsi que les fiches protocolaires complétées. - Le groupe reprend la traversée spéléologique en direction de la sortie

Depuis les différentes zones de mesure, le professionnel de la spéléologie connaît le temps d'activité qu'il lui reste jusqu'à la fin de la séance. Il faut en effet compter :

- 1h45 depuis la zone 1.
- 1h30 depuis la zone 2 et 3.
- 45 minutes depuis la zone 4.

Il peut donc, à la fin de cette situation et s'il estime être en avance sur l'horaire, proposer en régulation de refaire une mesure. Cette nouvelle mesure peut être faite soit sur une autre zone, soit sur la même zone mais en faisant tourner les groupes. Le groupe effectuant la traversée depuis l'évent supérieur, à la journée, aura sûrement le temps d'effectuer une nouvelle mesure (par exemple sur les zones 2 ou 3).

Une fois sorti de la cavité, une nouvelle observation est faite par les élèves, à l'aide du thermomètre et du baromètre. Les fiches protocolaires sont redistribuées, et les élèves y rapportent l'horaire, la température ambiante, la pression atmosphérique et le courant d'air constaté (sens & intensité) en sortie de cavité. Le professeur leur donne enfin les valeurs qu'il a relevées à l'entrée de la cavité, pour qu'ils puissent finir de compléter leur fiche protocolaire.

Les fiches de protocole expérimental complétées sont alors toutes récupérées par le professeur. Celui-ci pourra ainsi prendre le temps, d'ici la séance suivante, de les examiner pour évaluer la qualité du travail effectué par les élèves lors de cette séance de terrain.

SEANCE BILAN EN CLASSE

Cette séance bilan a lieu en classe entière, en présence du professeur de physique-chimie. Elle se déroule sur un créneau de 1h de cours.

1. Fiche de séance récapitulative

Thème de la séance	Validation critique des mesures réalisées et des débits obtenus.
Compétences visées	Valider les conclusions issues d'un modèle avec des résultats expérimentaux, et les résultats expérimentaux avec les lois de la physique.
Objectifs opérationnels	1. Être capable de collecter toutes les données obtenues à la suite d'une expérimentation. 2. Être capable de confronter les conclusions issues d'un modèle aux résultats expérimentaux. 3. Être capable de procéder à des tests de vraisemblance des résultats expérimentaux. 4. Être capable d'identifier des sources d'erreur. 5. Être capable de proposer d'éventuelles améliorations de la démarche.
Prérequis théoriques	- Méthode de calcul du débit massique à partir du débit volumique - Notion de conservation de débit massique dans une galerie. - Loi des nœuds dans un réseau complexe de galeries.
Résumé du matériel nécessaire	- Planche PowerPoint contenant la topographie simplifiée et annotée réalisée lors de la séance de préparation. - L'ensemble des feuilles de protocole expérimental complétées lors de la séance de terrain. - Une calculatrice par binôme. - Tableau blanc et feutres. - Une fiche d'évaluation de fin de cycle par élève.
Conduite de séance	
1. <u>Confrontation du modèle aux résultats expérimentaux</u> : Mise en commun du sens et des intensités des courants d'air observés. Ces courants d'air sont-ils cohérents vis-à-vis des courants d'air attendus dans ce tube à vent complexe ? 2. <u>Cohérence des résultats expérimentaux vis-à-vis des lois de conservation</u> : Introduction de la notion de conservation de débit massique dans une galerie. Introduction de la loi des nœuds dans un réseau complexe de galeries. Détermination de la méthode de calcul des débits massiques à partir des débits volumiques. Mise en commun des débits massiques obtenus et report des résultats sur la topographie simplifiée. Les résultats mesurés sont-ils en accord avec ces deux lois ? 3. <u>Évaluation générale du cycle</u>.	

Nous allons maintenant nous intéresser au détail de la mise en œuvre de chacune des trois étapes de notre conduite de séance.

2. Confrontation du modèle aux résultats expérimentaux :

Cette situation est réalisée par le professionnel de la spéléologie. Son objectif est que les élèves valident les résultats issus d'un modèle avec l'expérimentation réalisée. Ils doivent en effet être capables de confronter les différents sens de courants d'air déduits du modèle de tube à vent lors de la première séance, avec les sens des courants d'air observés lors de la séance de terrain.

Cette situation est organisée chronologiquement de la façon suivante :

Durée & Intervenant	Description
1 15 min DEJEPS	- Les binômes/trinômes constitués lors de la séance de terrain sont constitués de nouveau. - Le professeur de physique-chimie leur redistribue à chacun leur fiche protocolaire complétée respective. - Le professionnel projette, sur le tableau blanc, la topographie en plan simplifiée et mise au propre avec les annotations de la première séance. - Un élève rapporteur par binôme/trinôme note, sur la topographie projetée, le courant d'air observé (sens et intensité) au niveau de sa section de mesure. <u>Consignes</u> : Par binôme/trinôme, validez ou non la cohérence de chacun des sens des courants d'air observés avec les courants d'air anticipés lors de la première séance. Validez ensuite la cohérence entre tous les différents courants d'air observés lors de la séance de terrain. En cas d'incohérence, estimez s'il s'agit d'une erreur de mesure, ou d'une erreur liée au modèle. <u>Critère de réussite</u> : Tous les groupes relèvent toutes les incohérences éventuelles. <u>Complexifications</u> : Le professeur peut complexifier en demandant d'en déduire quels auraient été les débits observés sur le terrain, si la séance avait été réalisée en plein hiver. Il peut simplifier en indiquant les zones éventuelles où les sens des courants d'air ne sont pas cohérents. <u>Correction</u> : Le professeur (ou un élève choisi) corrige les éventuelles erreurs de prévision de sens de débit liées à une mauvaise utilisation du modèle théorique de tube à vent. Il entoure ensuite les éventuelles contradictions relevées par les élèves entre les différentes observations réalisées sur le terrain. Ces contradictions sont sûrement liées à une erreur de mesure.

Cette situation utilise comme seul support pédagogique un planche PowerPoint contenant la topographie simplifiée et annotée réalisée lors de la séance de préparation.

3. Cohérence des résultats expérimentaux face aux lois de la physique :

Cette situation est réalisée majoritairement par le professeur de physique-chimie. Son premier objectif est que les élèves raisonnent autour de la notion de débit en étant capables de trouver la relation entre débit volumique et débit massique. L'objectif suivant est de valider la cohérence des résultats expérimentaux en étant capable de les confronter aux lois de conservation.

Cette situation requière d'introduire les notions théoriques suivantes. Les Figure 12 et Figure 13 seront de nouveau utilisées comme support pédagogique en étant dessinées au tableau par le professeur :

Dans le cas de l'air en écoulement dans une galerie (Figure 12), le principe de conservation de la matière se traduit par la conservation de la masse, et donc du débit massique. Le débit massique est en effet constant en toutes sections de la galerie. Ainsi, entre deux sections de passage S_1 et S_2 , on peut écrire l'égalité suivante :

$$q_{m1} = q_{m2}$$

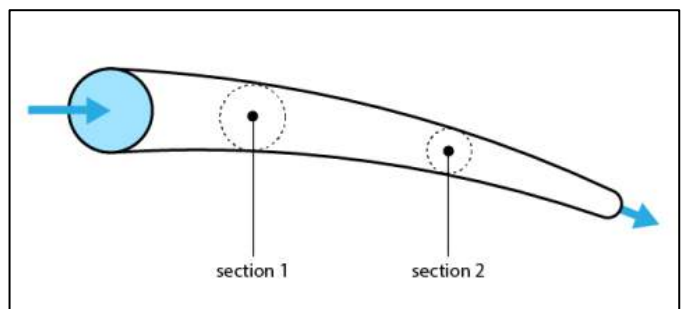


Figure 12 : Écoulement d'air dans une galerie

Enfin, dans le cas d'un réseau complexe de galeries (Figure 13), on peut appliquer la loi des nœuds. Cette loi traduit simplement le fait qu'à un embranchement donné du réseau, la somme des débits massiques d'air arrivant au nœud est égale à la somme des débits massiques d'air quittant le nœud. On obtient ainsi, dans le cas de la figure ci-contre :

$$q_{m1} + q_{m2} + q_{m3} = q_{m4} + q_{m5}$$

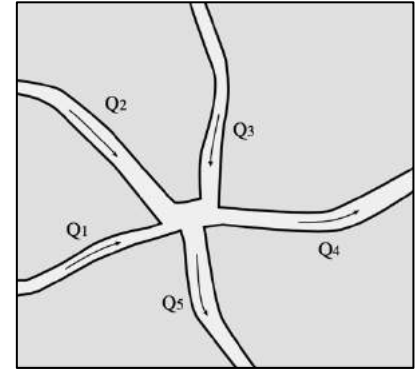


Figure 13 : Loi des nœuds à un carrefour de galeries

En utilisant la masse volumique de l'air, on obtient simplement la relation entre débit massique et débit volumique :

$$q_m = q_v \cdot \rho$$

Ainsi, dans le cas où la pression et la température restent constantes dans la galerie, on obtient que la masse volumique reste aussi constante et donc :

$$q_{v1} = q_{v2}$$

Attention cependant, dans le cas contraire, la masse volumique n'est plus constante, et on n'a donc plus conservation du débit volumique. Si l'on veut calculer le débit volumique de la section S_2 à partir de celui de la section S_1 , il faut alors connaître la masse volumique de l'air au niveau de ces deux sections. Comme vu précédemment, il est alors possible d'utiliser la loi des gaz parfaits pour déterminer la masse volumique à la température et la pression de chacune des sections.

Cette situation est organisée chronologiquement de la façon suivante :

Durée & Intervenant		Description
1	10 min PROF	- Le professeur introduit la notion de conservation de débit massique dans une galerie en dessinant la Figure 12 au tableau. - Il introduit ensuite la loi des nœuds, applicable aux débits massiques des réseaux complexes de galeries, en dessinant la Figure 13 au tableau. <u>Consignes</u> : Individuellement, écrivez la relation qui permet de passer d'un débit volumique d'air à un débit massique. <u>Critère de réussite</u> : 80% des élèves trouvent la relation. <u>Régulations</u> : Le professeur peut simplifier indiquant qu'il faut faire intervenir la masse volumique de l'air. <u>Correction</u> : Le professeur (ou un élève choisi) explique le raisonnement et donne la relation attendue : $q_m = q_v \cdot \rho$
2	10 min PROF	- Le professeur questionne alors oralement les élèves : Les deux lois introduites précédemment sont-elles applicables aux débits volumiques si la température et la pression sont constantes dans le réseau de galerie ? Il rappelle ainsi la possibilité d'utiliser la loi des gaz parfaits. - Un élève rapporteur par binôme/trinôme note, sur la topographie projetée, les pressions et températures relevées au niveau de leur section de mesure. <u>Consignes</u> : Par binôme/trinôme, évaluez à partir des mesures effectuées pendant la séance de terrain, l'impact des variations de pression et de température sur la masse volumique de l'air à l'intérieur de la cavité. <u>Critère de réussite</u> : 80% des binômes/trinômes arrivent à déterminer la section de la cavité où la masse volumique locale est la plus élevée, et celle où elle est la plus faible. <u>Régulations</u> : Le professionnel peut simplifier l'exercice en demandant à chaque binôme de calculer la masse volumique locale de l'air sur sa section respective de la cavité. <u>Correction</u> : Le professeur (ou un élève choisi) calcule les valeurs extrêmes de masse volumique locale d'air rencontrées dans notre réseau. Cette différence est-elle significative ? Si oui, chaque binôme/trinôme convertira sa mesure de débit volumique en débit massique. Sinon ce n'est pas la peine.

3	15 min PROF & DEJEPS	- Un élève rapporteur par binôme/trinôme note, sur la topographie projetée, à côté de sa flèche indiquant le sens du courant d'air, la valeur du débit finalement obtenue. <u>Consignes :</u> Par binôme/trinôme, et en utilisant la loi de conservation des débits et la loi des nœuds, validez la cohérence entre elles des mesures de débit effectuées sur le terrain. On prendra soin de se méfier des orientations des débits des courants d'air précédemment entourés ! <u>Critère de réussite :</u> Les groupes retrouvent tous au moins les équations de conservation de débits que l'on devrait retrouver. C'est-à-dire que : 1. La somme des débits sortants de la cavité doit être égale à la somme des débits entrants. 2. Les débits mesurés sur des sections différentes d'une même galerie doivent être égaux. 3. A chaque intersection, la somme des débits sortants doit être égale à la somme des débits entrants. <u>Régulations :</u> Il est plus simple de raisonner d'abord sur les équations, puis de passer à l'application numérique, pour en déduire si les mesures effectuées valident ou non les égalités recherchées. <u>Correction :</u> Le professeur donne les écritures littéraires des équations de conservation de débits que l'on devrait retrouver. En passant à l'application numérique il montre que si l'on peut, dans un premier temps, corriger le sens des courants d'air précédemment entourés. Il montre ensuite si l'on peut valider ou non l'ensemble des mesures réalisées. Il en déduit enfin, quelles sont les mesures cohérentes, et celles qui présentent une trop grande erreur pour être exploitables. - Le professeur peut alors conclure en montrant que ces équations permettent d'estimer l'ordre de grandeur des erreurs de mesure globalement réalisées lors de la séance de terrain.
---	----------------------------	---

Ainsi, à la fin de cette situation, le professeur peut assez simplement finir d'évaluer la qualité du travail réalisé par chaque binôme/trinôme lors de la séance de terrain. Il lui suffit par exemple de prendre une photo du tableau blanc en fin de séance. Sur ce tableau sont maintenant clairement identifiées les sections de mesure où le débit calculé a été validé, et celles où il ne l'a pas été. En récupérant toutes les fiches protocolaires, il en déduit les binômes/trinômes qui ont travaillé soigneusement, et ceux qui ont été moins soigneux.

Il est important de noter que cette situation ne fonctionne vraiment bien que si la météo était assez stable durant les trois jours du séjour. Dans tous les cas, comme les conditions atmosphériques ont été à chaque fois relevées, le professeur pourra les utiliser pour réaliser une autre séance. Celle-ci pourra par exemple être axée autour de l'identification des sources d'erreur et de l'estimation des incertitudes, deux compétences figurant au programme officiel des premières.

4. Évaluation générale du cycle.

Cette situation d'évaluation vient conclure le cycle et présente un double objectif :

Dans un premier temps, l'objectif est que chaque élève autoévalue les compétences qu'il a acquises au cours de ce cycle. Cette autoévaluation reprend donc l'ensemble des objectifs opérationnels du cycle. Elle est primordiale pour l'enseignant de physique-chimie. Elle lui permet en effet de savoir simplement si, pour chaque élève, les compétences à travailler durant l'année scolaire dans le cadre de la démarche scientifique (s'approprier, analyser/raisonner, réaliser, valider, communiquer) sont acquises en cette fin d'année. Pour le professionnel, elle lui permet indirectement de juger de la pertinence des situations d'apprentissage proposées, et du bon déroulé de leur mise en œuvre.

Dans un second temps, l'objectif est que chaque élève donne directement son avis sur l'intérêt et la pertinence des situations pédagogiques qui ont été proposées au cours de ce cycle. Pour se faire, les situations proposées au cours du cycle sont donc évaluées une par une par les élèves. En plus de ça, il me paraît intéressant de demander aux élèves leur ressenti général sur chacune des trois séances du cycle.

Pour se faire, une fiche d'évaluation est distribuée à chaque élève. Ils disposent alors d'une dizaine de minutes pour la compléter. Ces fiches ont été préalablement préparées conjointement entre le professionnel et le professeur. Un exemple détaillé de cette fiche d'évaluation est présenté en fin ci-après (Figure 14 et Figure 15).

Nom, prénom :		Fiche d'évaluation de fin de cycle :		
1 - Autoévaluation				
Si on refait l'exercice dans un cavité similaire, je serai capable de :	Non	Oui, mais avec l'aide de qqun	Oui	Remarques :
Comprendre une topographie simplifiée en plan.				
Faire des prévisions sur le sens du courant d'air.				
Proposer un protocole expérimental de mesure de débits volumiques sur une section.				
Déterminer les zones les plus pertinentes de mise en application de ce protocole.				
Me repérer sur une topographie lors de la visite de la cavité.				
Choisir judicieusement une section précise de galerie où mettre en œuvre le protocole expérimental.				
D'adapter ce protocole expérimental aux réalités du terrain.				
Mesurer une vitesse, une pression et une température de l'air au niveau d'une section de galerie.				
Réaliser des mesures pour calculer l'aire d'une section de galerie.				
Calculer le débit volumique d'air sur cette section.				
Synthétiser toutes les données obtenues à la suite d'une expérimentation.				
Confronter les prévisions du modèle aux résultats expérimentaux.				
Procéder à des tests de vraisemblance des résultats expérimentaux.				
<u>Pour aller plus loin sur cette démarche scientifique :</u>				
Identifiez au moins deux sources des erreurs constatées en fin de démarche.		En fonction de ces erreurs, proposez des améliorations de la démarche :		

Figure 14 : Exemple détaillé de fiche d'évaluation de fin de séance - Recto

2 - Évaluation du cycle				
Situations pédagogiques :	★	★★	★★★	Détails & Suggestions :
Présentation de la cavité et identification du cheminement des deux traversées sur la topographie.				
Propositions, à partir d'un modèle, des sens des courants d'air dans ce tube à vent complexe.				
Élaboration du protocole expérimental et choix des zones de mise en application.				
Progression spéléologique (Équipement, marche d'approche, briefing, progression sur agrès, déséquipement...)				
Identification de la zone de mesure choisie.				
Réalisation du protocole de mesure.				
Confrontation des propositions issues du modèle aux résultats expérimentaux.				
Vérification de la cohérence des résultats expérimentaux vis à vis des lois de conservation.				
<u>Donnez, en quelques phrases votre ressenti général sur chacune des trois séances du cycle :</u>				
Séance de préparation en salle :				
Séance de terrain :				
Séance bilan en classe :				

Figure 15 : Exemple détaillé de fiche d'évaluation de fin de séance - Verso

CONCLUSION

Ce mémoire propose d'utiliser les compétences d'un professionnel de la spéléologie pour réaliser un cycle pédagogique en milieu karstique, à destination des enseignants de physique-chimie de première générale. Pour cela il s'appuie sur le bulletin officiel, invitant clairement les professeurs de physique-chimie à privilégier une pédagogie active construite autour d'une démarche scientifique. Au travers de ce cycle, les élèves sont ainsi amenés à réaliser un bilan complet des différents débits d'air rencontrés dans un tube à vent complexe. Cette problématique présente le triple intérêt de coupler la réalisation d'une démarche scientifique complète, avec des sorties spéléologiques concrètes en milieu karstique, tout en abordant des notions théoriques inscrites au programme des premières générales.

Ce cycle se compose de trois séances distinctes articulées autour d'un voyage scolaire. Avant le voyage scolaire, une première séance de préparation en classe permet d'abord aux élèves de s'approprier cette problématique globale. Elle propose ensuite un travail d'analyse depuis un modèle de tube à vent, afin d'émettre des prévisions sur les sens des courants d'air qu'on sera susceptible de rencontrer dans la cavité lors de la séance de terrain. Cette séance se conclue par un travail de raisonnement lors duquel les élèves élaborent leur propre protocole expérimental. Pendant le voyage scolaire, une seconde séance est réalisée, cette fois-ci en milieu karstique, au cours de laquelle les élèves mettent en œuvre concrètement leur protocole expérimental. Enfin, après le voyage scolaire, une dernière séance est proposée. Lors de celle-ci, les élèves sont amenés dans un premier temps à confronter les conclusions de la première séance, issues du modèle de tube à vent, avec leurs résultats expérimentaux. Puis, dans un second temps, à valider leurs résultats expérimentaux avec les lois de conservations de la physique.

Enfin, à la fin de ce cycle, une ouverture est faite sur les notions d'erreur et d'estimation d'incertitudes. Le professeur peut donc facilement s'appuyer sur le travail effectué lors de ce cycle pour proposer de nouvelles séances autour de ces notions. Les compétences liées aux erreurs et incertitudes ne sont à acquérir qu'en toute fin du programme de physique-chimie des premières. Ce cycle pédagogique, proposé peu avant la fin d'année scolaire, peut donc en être une parfaite introduction.

REFERENCES

- AUDRA, P., MOCOCHAIN, L., & BIGOT, J.-Y. (2009). Spéléogenèse per ascensum par remontée du niveau de base. Interprétation des réseaux ennoyés, dénoyés, des sources vaclusiennes et des puits-cheminées. *Karstologia Mémoires n° 17*, 164-175.
- JAILLET, S., BOCHE, E., CAILHOL, D., GAUCHON, C., SADIÉ, B., & THOMAS, M. (2014, N°28). Les conduits épinoyés du système karstique de Foussoubie. *Tubes N°28*, 58-66.
- LE ROUX, P. (s.d.). Foussoubie.fr : <https://www.foussoubie.fr>
- LISMONDE, B. (2002). *Climatologie du monde souterrain Tome 1 - Vent des ténèbres*. Edition du Comité Départemental de Spéléologie de l'Isère.
- LISMONDE, B. (2002). *Climatologie du monde souterrain Tome 2 - Aérologie des systèmes karstiques*. Edition du Comité Départemental de Spéléologie de l'Isère.
- Ministère de l'Éducation nationale et de la Jeunesse. (s.d.). *Bulletin officiel de l'éducation nationale - Programme de physique chimie de première générale*. Récupéré sur education.gouv.fr :