

2013

Etude hydrogéologique des écoulements sous le plateau de Haye



Professeurs encadrants:
V. Merrien-Soukatchof
Michel Jauzein

Nollet Jean Meyniel Clémentine



Table des matières

Résumé.....	2
Abstract	2
1. Présentation du spéléodrome.....	4
1.1. Présentation historique.....	4
1.2. Présentation géographique et géologique de la galerie	5
1.3. Mécanisme d'infiltration et de transport des eaux souterraines	7
2. Nos connaissances actuelles	8
2.1. Etude du bassin versant	8
2.2. La galerie supérieure	10
2.3. Galerie inférieure	11
3. Notre travail d'approfondissement au sein de la galerie.....	13
3.1. Le traçage : une nouvelle méthode d'estimation du débit	13
3.2. Exploitation des résultats	17
3.2.1. Estimation de la précision de la méthode :	17
3.2.2. Evaluation des débits de la galerie supérieure et inférieure	18
3.2.3. Comparaison des débits après quelques jours secs ou pluvieux	19
3.2.4. Estimation des apports d'eau latéraux et dus aux forages	20
.....	20
3.3. De nouveaux dispositifs de mesure.....	22
4. Etude du terrain autour de la galerie	26
4.1. Elaboration d'une nouvelle coupe géologique.....	26
4.2 Calcul de la résistivité des terrains (quadripôle Schlumberger).....	28
4.2.1Explication de la méthode.....	28
4.2.2. Mise en place du dispositif sur le terrain	29
4.2.3. Exploitation des mesures	30
Conclusion	36
Remerciements :	37

Résumé

La délimitation de la zone drainée qui alimente les deux galeries situées sous le plateau de Haye a été le centre de notre projet. Afin de répondre à cette question nous avons dans un premier temps analysé les données récoltées et interprétées par nos prédécesseurs sur ce projet.

Puis nous avons mis en place un dispositif de mesure in situ, pour effectuer une série de calculs de débit le long de la galerie. Cette méthode de détermination des débits consiste en la dilution puis l'injection de sel dans la galerie. On mesure ensuite la conductivité de l'eau alors porteuse de sel dans la galerie ce qui nous permet d'évaluer le débit. Nous avons pu évaluer les incertitudes et la fiabilité liées à cette technique de calcul par le biais de la répétabilité de la mesure. Les mesures de débits dans la galerie supérieure restent assez difficiles à déterminer alors que ceux effectués dans la galerie inférieure sont plus précisément obtenus grâce à cette méthode de traceur.

Nous avons ensuite cherché à déterminer le positionnement de la nappe à partir de la surface en utilisant un quadripôle électrique de Schlumberger. Ce quadripôle nous a permis de mesurer la résistivité des sols et donc d'interpréter l'existence d'une nappe ou non (jusqu'à une profondeur d'investigation de l'ordre de 17m). Ce dispositif a également révélé une roche calcaire plus abondante en eau à 13m de profondeur. Ceci confirme que l'alimentation en eau de la galerie supérieure se fait par un réseau de fractures et non par une nappe, les résistivités à cette profondeur ne permettant pas d'expliquer une assez grande quantité d'eau dans ce réservoir.

Une variation de débits due aux conditions extérieures peut également être mise en évidence. La pluviométrie a un rôle moteur et fluctuant dans les écoulements sous le plateau de Haye. En effet l'eau s'écoule d'une part par un réseau de fracture dans la galerie supérieure alors qu'elle semble provenir d'une nappe située aux alentours de 30m de profondeur pour la galerie inférieure. Le délai entre les mesures pluviométriques et les écoulements dans les galeries met en évidence ce phénomène par l'observation d'un délai largement supérieur dans la galerie haute. Nous avons pour mettre en relief ce phénomène collecté une série de mesures de débits lors de période de pluie et ensuite lors de pluie quasi nulle voire nulle pour mettre en évidence ce phénomène.

Abstract

This report aims to interpret the behaviour of the ground of the Plateau de Haye and more specifically the behaviour of the groundwater which supplies the gallery located under this plateau. This place was chosen in the 20th century in order to supply in water the population of Nancy.

Since the end of the nineties, this place is used as a speleodrome. Some potholers are currently trying to determine the behaviour of the gallery itself and of the ground around it. In order to help to the understanding of the speleodrome, we carried out measurements of throughputs in the gallery and of resistivity of the topsoil. Then we interpreted these measurements to answer the following question: how the soil provide the gallery in water.

Introduction

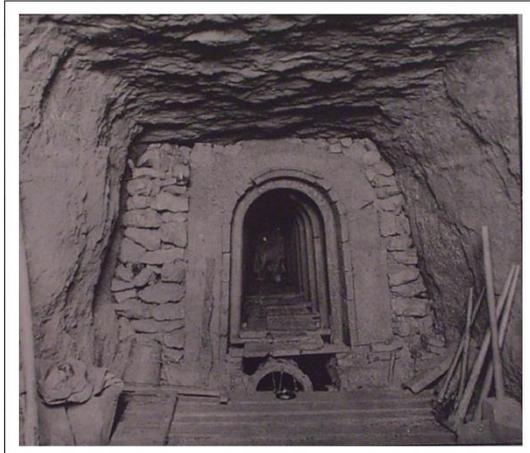
Une galerie souterraine a été construite dans le milieu des années 1800 sous le Plateau de Haye à l'Ouest de Nancy. Cette galerie a été creusée pour alimenter la pollution nancéenne grandissante en eau. Cet ouvrage possédant un débit de sortie trop faible, la galerie a été abandonnée en tant que source en eaux potables et sert à l'heure actuelle de spéléodrome.

Plusieurs spéléologues se sont penchés sur l'étude de cette galerie et de son alimentation en eau. Nous avons pour participer à cette réflexion, à travers ce projet voulu nous interroger sur la connaissance des débits le long de la galerie ainsi qu'aux formations géologiques situées au-dessus de la galerie et potentiellement porteuses d'une nappe. L'intitulé de ce projet étant « Etude hydrogéologique des écoulements sous le plateau de Haye ». Celui-ci nous laissait un large choix d'interprétation du sujet que nous avons choisi d'axer autour d'une meilleure compréhension de l'étude amorcée par le projet réalisé il y a deux ans.

1. Présentation du spéléodrome

1.1. Présentation historique

Les différentes questions que l'on est amené à se poser quand on aborde les galeries souterraines en dessous du plateau de Haye et de savoir à quoi servaient ces galeries, à quelle époque étaient-elles utilisées et comment sont-elles alimentées en eau ?



Dans cette première partie nous aborderons la question de l'utilité de ces galeries par rapport à la ville de Nancy.

Cette galerie a été anciennement utilisée pour alimenter Nancy en eau potable. Suite à la guerre 1871 à 1891 Nancy a fait face à une augmentation de 64% de sa population. N'ayant pas les ressources en eau nécessaire pour alimenter toute cette population en eaux il a été nécessaire de trouver de nouvelles solutions. Edouard Imbeaux qui avait perdu deux de ses enfants de la fièvre typhoïde probablement

transmises par la faible qualité de l'eau alimentant la population nancéenne à l'époque décida de prendre en charge le projet. La construction de cette galerie (prenant en exemple l'alimentation en eau de la ville de Liège) eu lieu de 1898 à 1906 et fit appelle à nombreuses prouesses techniques pour l'époque. Une des raisons de ces difficultés est que cette galerie est en partie creusée dans du minerai de fer, matériau extrêmement ductile. De plus des forages verticaux ont aussi été réalisés dans cette même structure pour atteindre la nappe phréatique et ainsi provoquer un écoulement en eau dans la galerie sou jacente. Ce projet fut dirigé par l'ingénieur Edouard Imbeaux et employa plus de 100 mineurs travaillant dans des conditions extrêmement difficiles. Ces hommes ont creusés 6 642 m de galeries et extrait 16 000 m³ de roche.

Cet ouvrage long de 4873 m et qui couta à la ville de Nancy 1.9 MF fut malheureusement abandonné en 1932 car son débit n'était pas suffisant pour alimenter en eau potable toute la population nancéenne. Le budget alloué à ce projet fut deux fois plus élevé que le budget initialement prévu pour un faible mais essentiel débit d'environ 10L/s. Cette galerie aura fonctionné 26 ans pour 6 ans de travaux.

Depuis le 1^{er} décembre 1991 cette galerie peut enfin être après de nombreux travaux utilisée en tant que spéléodrome. Bien que cette galerie soit artificielle on peut observer à l'intérieur des phénomènes naturels géologiques comme des concrétions ou des perles de caverne ; mais aussi différents fossiles comme des ammonites ou encore des microorganismes sensibles à la lumière du jour et que l'on ne trouve donc pas en surface comme des *Caecosphaeroma* ou des *Niphargus* d'une taille de l'ordre du millimètre.

1.2. Présentation géographique et géologique de la galerie

La galerie est située sous la Plateau de Haye, voilà une présentation cartographique plus précise de la localisation de la galerie qui s'étend du sud de Clairlieu à Villers les Nancy où on peut observer l'œil de la galerie. Cette installation est composée de 5 puits d'une profondeur allant de 34 à 65 mètres. Elle s'étend sur plus de 6600 mètres de long.

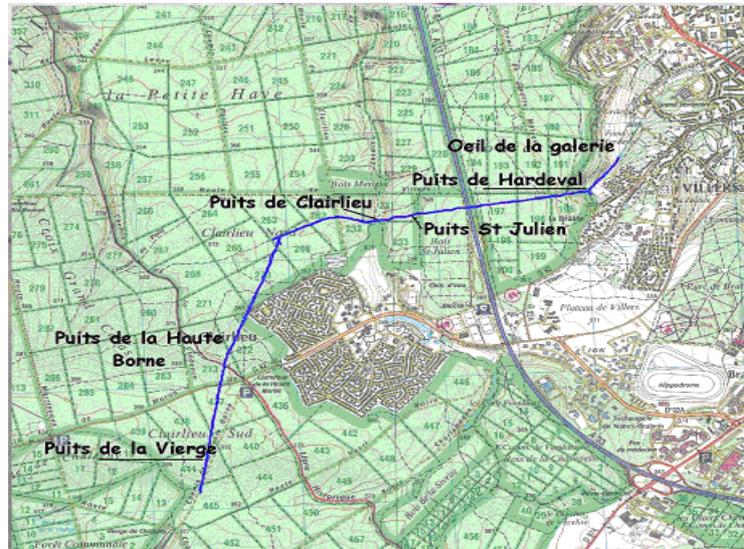


Figure 1 : Carte IGN faisant apparaître la galerie en bleu 1 carré = 1km²

La géologie varie peu au niveau du Plateau de Haye, différentes coupes géologiques ont été dessinés depuis la création de la galerie. Sur certaines de ces coupes on voit apparaître le positionnement de la galerie au sein de ces couches. La galerie étant située entre le minerai de fer et les marnes sableuses. Il faut ajouter à cette coupe géologique une probable faille située entre Chavigny et Vandœuvre, comme on peut le voir sur le schéma suivant.

Géologie du Plateau de Haye coupe schématique

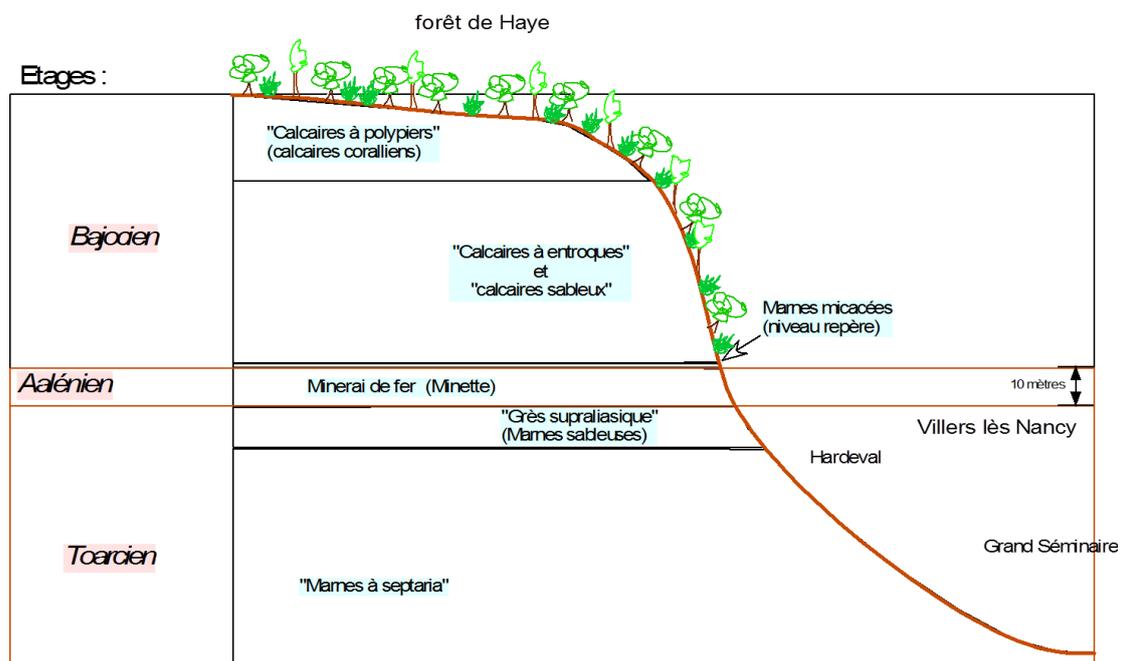




Figure 2 : Carte géologique de la zone faisant apparaître la faille de Chavigny-Vandeouvre

Cette carte géologique obtenue à l'aide de Géoportail s'explique par le présent log stratigraphique suivant :

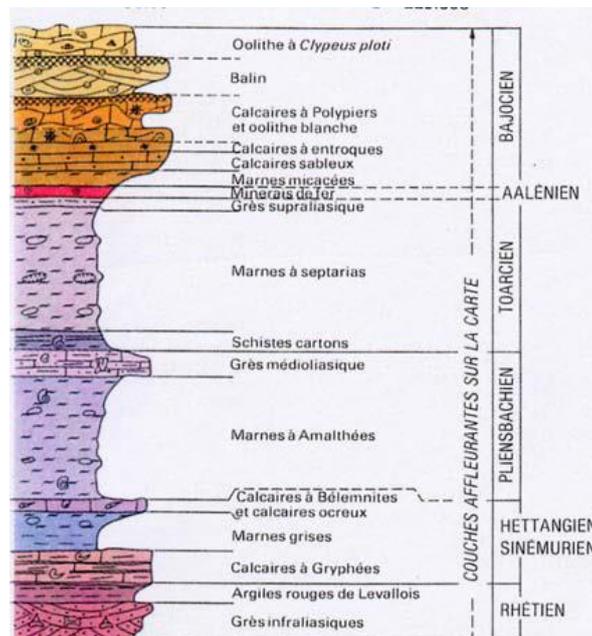


Figure 3 : Log Stratigraphique

1.3. Mécanisme d'infiltration et de transport des eaux souterraines

L'alimentation de l'eau dans les sols provient de l'infiltration de l'eau provenant des précipitations en surface. Une partie des précipitations ne s'infiltrer pas car une partie retourne à l'atmosphère par le phénomène d'évapotranspiration ou de ruissellement. La seule eau qui s'infiltrer dans le sol est appelée eau efficace c'est elle qui alimentera les nappes d'eau souterraines. Ce schéma décrit le mécanisme d'infiltration appliqué aux couches sous le Plateau Haye et alimentant donc la galerie sous-jacente. La végétation riche, la galerie étant sous le Plateau de Haye facilite le phénomène d'évapotranspiration, la quantité d'eau s'infiltrant dans le sol est de ce fait amoindrie.

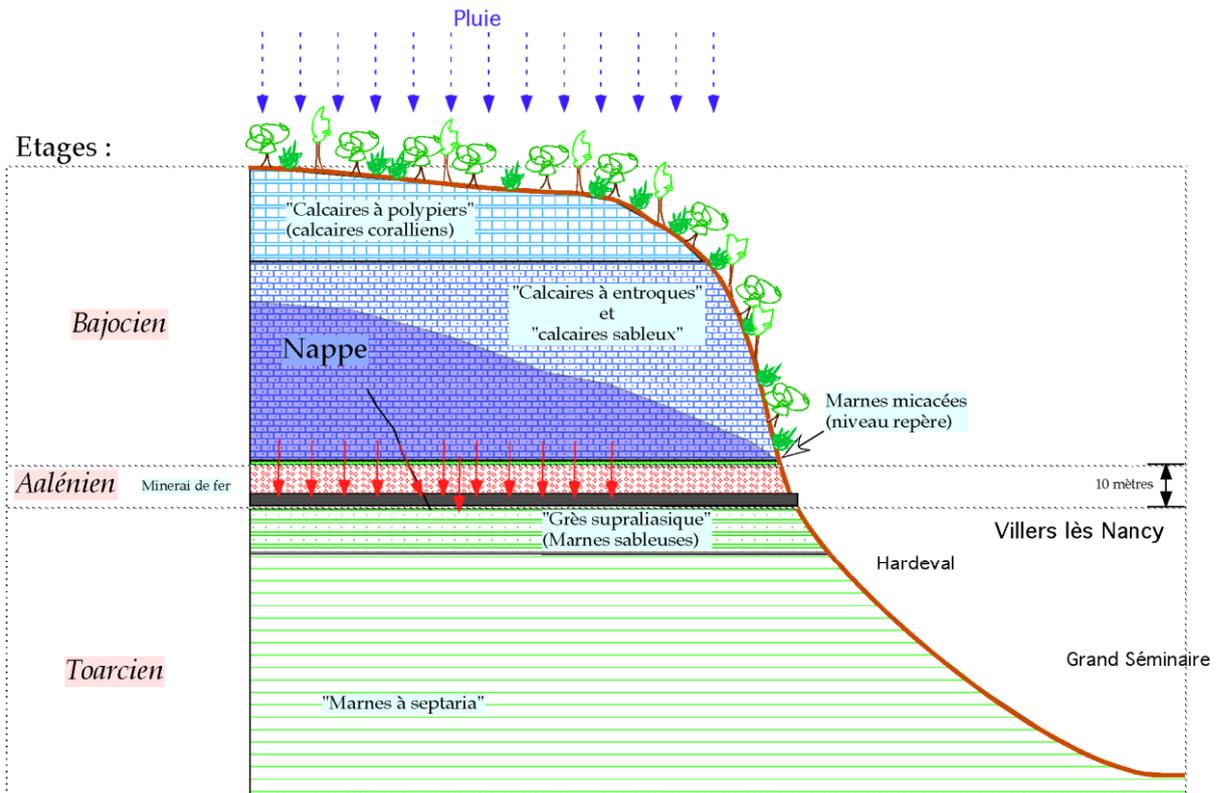


Figure 4 : Mécanisme d'infiltration des précipitations en Plateau de Haye



La galerie est alimentée en eaux par des forages verticaux localisés dans le minerai de fer au-dessus de la galerie. Voici ci-dessus un exemple de forage vertical alimentant la galerie. Les apports de ces forages verticaux varient de 0L/s à environ 1L/s. La majorité des forages apportant une contribution au débit total d'approximativement 0.03L/s, ce qui représente un apport assez faible.

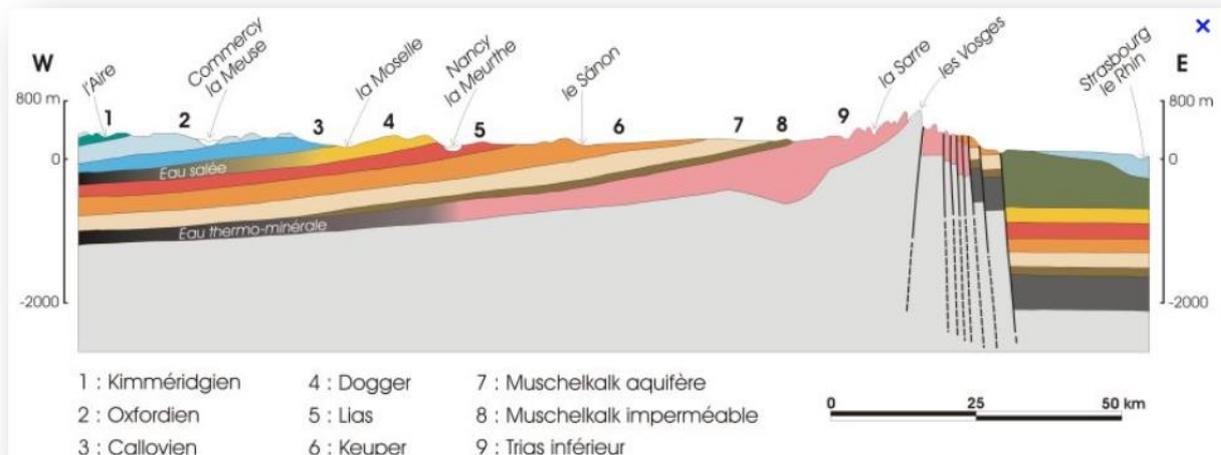
Nous allons maintenant après avoir présenté de façon concise le spéléodrome d'écrire son fonctionnement et son mode d'alimentation à travers trois axes différents : le bassin versant, la galerie inférieure et la galerie supérieure. Pour cela nous avons utilisé le rapport d'il y a deux ans ils avaient amorcé une étude de la galerie et de ses débits en différents lieux que nous avons tenté d'approfondir.

2. Nos connaissances actuelles

2.1. Etude du bassin versant

Cette partie sera consacrée à une étude approfondie du bassin versant drainé par le spéléodrome. Tout d'abord en étudiant une coupe géologique de la Lorraine on s'aperçoit que le plateau de Haye est constitué d'une couche appelée Dogger.

Figure 6 : coupe géologique de L'Alsace-Lorraine



Ainsi la nappe drainée est une des trois nappes du Dogger. Il s'agit plus précisément de nappe du Bajocien moyen et inférieur, située principalement dans les Calcaires à Polypiers, qui est donc alimentée en grande partie par les nappes sus-jacentes. Ici, suite aux conclusions tirées des résultats du quadripôle Schlumberger, il s'agit de la première nappe.

Il existe une anticlinale de Pont-à-Mousson séparant le gisement de fer entre les bassins de Briey et celui de Nancy. A l'ouest de Nancy on trouve un synclinal évasé dit synclinal de Haye.

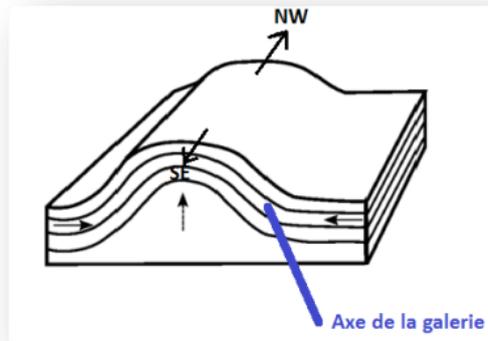


Figure 7 : Schéma simplificateur de la situation

Ainsi la spéléodrome est implanté dans une géologie régionale assez compliquée avec de nombreux plis. De manière plus précise pour le spéléodrome, la partie supérieure du bassin est composée de Bajociens et d'Aalénien perméables (qui constituent donc la roche réservoir de la nappe) reposant sur une couche du Toarcien, beaucoup moins perméable.

Cette structure d'ensemble présente une forme anticlinal d'axe approximatif NW-Se, ce qui explique notamment la fait que dans la galerie les écoulements ne se font que d'un côté. Cela a pour conséquence que le bassin versant topographique sera différent du bassin versant hydrogéologique.

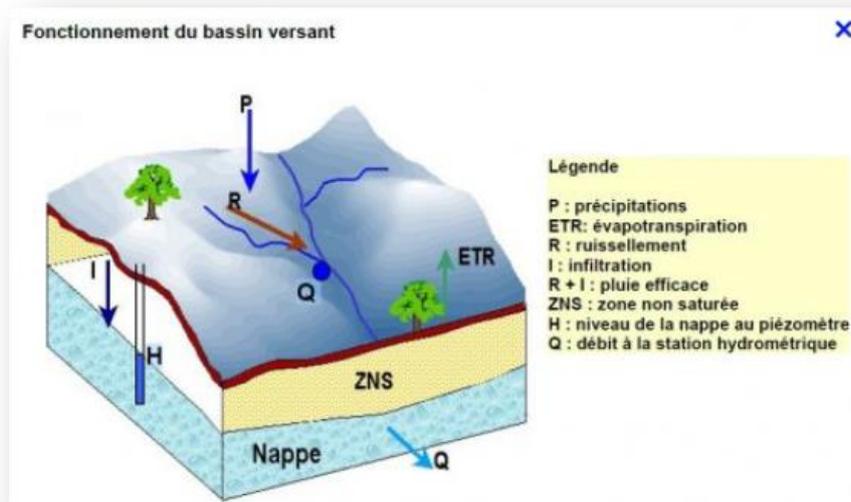


Figure 8 : fonctionnement d'un bassin versant

Maintenant que nous possédons quelques informations sur la nappe du pont de vue régional, il est intéressant de réfléchir à la surface drainée par les galeries du spéléodrome.

Remarque préliminaire : la forêt de Haye comporte de très nombreuses galeries de mines. En effet au début du siècle dernier la couche ferrifère a été beaucoup exploitée. Ainsi la surface que nous obtiendrons sera sans doute sous-estimée puisque toutes les galeries de fer drainent également la nappe en question.

Rappelons d'abord en quelques lignes le fonctionnement d'un bassin versant :

Parmi les précipitations annuelles sur le plateau de Haye, seule une petite partie va alimenter la nappe du plateau de Haye en eau. En effet l'eau va se répartir entre :

- R : le ruissellement. Une partie de l'eau, notamment lors des fortes précipitations, va ruisseler soit dans des rivières, soit sur les chemins, jusqu'à un cours d'eau plus important ou un plan d'eau.
- ETR : l'évapotranspiration. Cela correspond à l'eau qui s'évapore du sol, soit directement avec les températures et l'ensoleillement, soit indirectement avec la végétation.
- I : l'infiltration. Elle correspond à l'eau qui pénètre dans le sol pour circuler dans des ruisseaux souterrains ou pour remplir la nappe qui dans notre cas sera drainée par la galerie.
- P : les précipitations. Correspond à la quantité de pluie tombée (981mm en 2012)

2.2. La galerie supérieure

La galerie supérieure est la partie la plus largement étudiée dans le rapport précédent. Ces études ont été menées grâce aux limnigraphes T et SE mesurant respectivement les débits de la galerie supérieure et inférieure. Le limnigraphe T a mesuré des débits largement corrélés aux précipitations en surface. Ils en sont donc venus à la conclusion que le réservoir situé au-dessus de la galerie supérieure a un pouvoir faiblement régulateur.

« Le minimum de débit calculé à la sortie de la galerie supérieure est de 0,6l/s et le maximum de 32l/s ». Le facteur entre ces deux extrêmes est de l'ordre de 53 donc le débit varie significativement dans cette galerie en fonction des conditions extérieures.

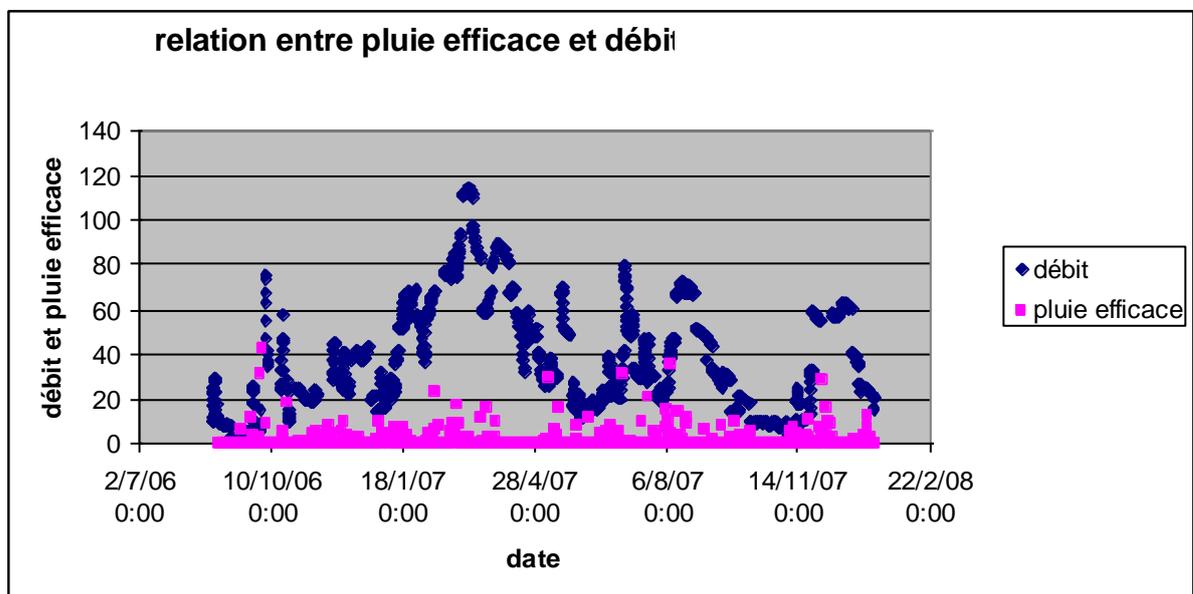


Figure 9 - Relation pluie efficace et débit dans la galerie inférieure

Le modèle choisi pour modéliser l'alimentation de la galerie supérieure est le suivant : « système à trois réservoirs : le sol *S*, le réservoir de la roche poreuse inférieure *I* et la porosité de fissuration *F*. La pluie qui tombe remplit le réservoir supérieur *S*. L'eau dans *S* peut soit repartir dans l'atmosphère par évapotranspiration, soit s'infiltrer dans le réservoir poreux *I*, soit s'infiltrer directement dans le réservoir noté *F* correspondant à la fracturation. L'eau dans le réservoir poreux *I* peut s'échapper dans les fissures *F* puis dans la galerie supérieure directement». Il semble que les arrivées d'eau dans la galerie supérieure se font principalement par les fractures.

Ces réservoirs communiquent les uns avec les autres, se déversent les uns dans les autres selon une certaine loi de tarissement caractérisée par un certain délai.

2.3. Galerie inférieure

Le groupe qui nous a précédés sur cette étude du spéléodrome s'est beaucoup moins attardé sur les données relatives à la galerie inférieure. Il ressort cependant de leur étude de données que la corrélation entre précipitation à la surface et écoulement dans cette galerie est beaucoup moins évidente. Il semble qu'il y ait en premier lieu accumulation d'eau dans les couches réservoirs sur jacente puis écoulement dans les couches inférieures. L'écoulement de l'eau de pluie n'est pas instantané comme dans la galerie supérieure.

La saison hivernale joue un rôle important dans les réserves contenues dans le calcaire. En effet après la saison hivernale la quantité d'eau imbibé dans les sols est suffisante pour permettre un écoulement d'un débit variable en fonction des précipitations tout le reste de l'année.

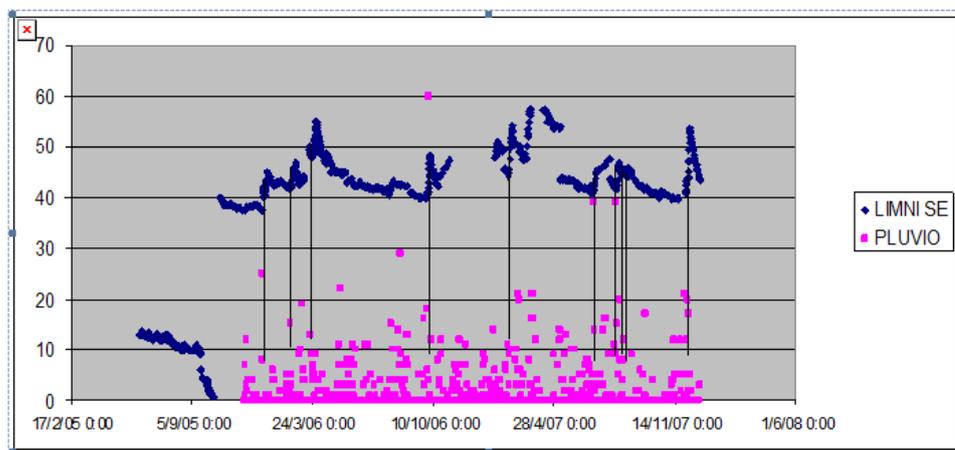


Figure 10 - Représentation corrélation pluviométrie-débit galerie inférieure

On peut voir grâce à cette courbe qu'il faut 3 jours à une semaine pour que la pluviométrie ait une réelle influence sur le débit dans la galerie supérieure. Il aurait pu être envisageable d'analyser les données pour la galerie inférieure et ainsi obtenir la loi de tarissement pour cette galerie comme ils l'ont fait pour la galerie inférieure.

A partir de cette étude des débits nous avons réalisé des mesures en différents lieux des galeries pour essayer dans un premier temps de quantifier les apports le long de la galerie. Notre étude s'est différenciée de la leur majoritairement en deux points :

- ❖ Les données préexistantes ayant déjà été analysées pour la plus part nous avons essayé de mettre en place nos propres dispositifs de mesures. Pour ainsi pouvoir interpréter si les résultats analysés par leur soin et ceux réalisé avec une autre forme de mesures étaient cohérents.
- ❖ Il était intéressant de voir si ces expériences menées sur une échelle de temps de un an pouvaient être mise en évidence sur une durée beaucoup plus courte de l'ordre de la semaine. Pour voir entre autre les répercussions des conditions extérieures sur les débits dans les deux galeries.

3. Notre travail d'approfondissement au sein de la galerie

3.1. Le traçage : une nouvelle méthode d'estimation du débit

Le projet précédent avait permis d'étudier le fonctionnement du spéléodrome, notamment du point de vue des débits, grâce à l'implantation de deux limnigraphes (notés T et SE et mesurant respectivement la hauteur d'eau à la sortie de la galerie dite « supérieure » et de la galerie principale). Mais ces limnigraphes possèdent un certain nombre d'inconvénients : une certaine imprécision venant des déversoirs, immobilité...



Figure : photo du limnigraphe qui avait permis une mesure de débit

Nous avons donc réfléchi à une nouvelle méthode afin de permettre l'estimation du débit de manière plus précise et à moindre coût. Nous avons finalement choisi le traçage qui possède un avantage non négligeable : la mesure peut se faire partout dans la galerie.

Les quelques paragraphes ci-dessous expliquent la manière dont une mesure de conductivité a permis une estimation du débit.

Principe :

Cette méthode permet de calculer le débit d'un écoulement indépendamment des mesures de hauteur et de vitesse, ce qui sera simplificateur étant donné que ces deux données varient constamment le long des galeries.

Le principe du traçage par injection instantanée (celui que nous avons choisi car le plus facile à mettre en œuvre) consiste à effectuer un bilan de masse: la masse de traceur injectée en amont d'un tronçon sur lequel on veut mesurer un débit Q doit être égale à la masse de traceur déterminée en aval, en mesurant la concentration $C(t)$ en traceur, après dilution dans l'écoulement et propagation dans le tronçon.

Choix du traceur :

- Nous avons ici choisi comme traceur le chlorure de sodium (NaCl), pour différentes raisons :
- il n'est pas naturellement présent en forte quantité dans l'écoulement.
 - il se dissout facilement dans l'eau.
 - il est mesurable par un capteur, le conductimètre, en temps réel.
 - il a un coût très faible (moins d'un euro le kilo en grande surface) et peut donc être utilisé en grande quantité.

Méthode de traçage :

La méthode par dilution consiste à injecter en une seule fois une solution de traceur à l'amont, et à mesurer en un point à l'aval les variations de concentration du traceur au cours du temps. L'injection instantanée et permis par les remous naturellement présents dans la galerie qui permettent une dissolution homogène.

Calcul du débit :

On supposera les deux hypothèses suivantes vérifiées :

-le débit Q est supposé constant pendant toute la durée de l'expérience

-la masse M de traceur est supposée constante

On peut donc écrire :

$$M = C_0 V_0 = Q \int_{t_{AR}}^{t_{AR} + T_p} C(t) dt$$

Avec :

M : masse de traceur introduite dans l'écoulement (g)

C_0 : concentration initiale en traceur (g/L)

V_0 : volume injecté (L)

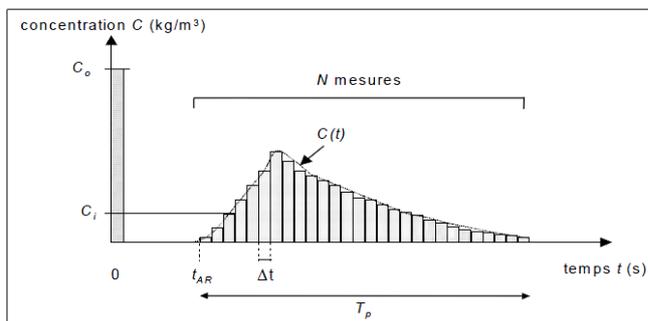
Q : débit à mesurer (L/s)

$C(t)$: concentration dans la section de mesure (g/L)

t_{AR} : instant de l'arrivée du traceur dans la section de mesure (s)

T_p : durée de passage du traceur dans la section de mesure (s).

Figure : Schéma présentant le principe de la méthode



On applique la version discrétisée de l'équation précédente :

$$Q = \frac{M}{\Delta t \sum_i C_i} \quad \text{ou} \quad Q = \frac{M}{\Delta t \sum_i (C_i - C_n)} \quad \text{avec un bruit de fond}$$

Avec :

Q : débit à mesurer (L/s)

M : masse de traceur introduite dans l'écoulement (g)

Δt : pas de temps du système d'acquisition de la concentration (s)

C_i : concentrations à chaque pas de temps i lors du passage du traceur (g/L)

C_n : concentration avant et après le passage du traceur = bruit de fond (g/L)

Relation entre la conductivité et la concentration de sel :

Par la suite, il est nécessaire pour avoir des résultats précis d'établir une relation entre la concentration du sel utilisé et la conductivité. La linéarité se situe entre 0 et 6g/l, ce qui nous arrange car nous nous situerons toujours à des concentrations inférieures au cours de nos expériences.

Nous avons donc procédé de la manière suivante : nous avons réalisé des solutions avec différentes concentrations massiques, principalement situées entre 0 et 6 g/l (nous avons chauffé l'eau jusqu'à ébullition pour faciliter la dissolution). Après avoir refroidi celle-ci jusqu'à une température proche de 12 degrés (température moyenne de l'eau s'écoulant dans les galeries du spéléodrome), nous avons calculé leur conductivité.

Pour une faible concentration massique, les points du graphique représentant la conductivité (mS/cm) en fonction de la concentration (en g/l) se sont alignés sur une droite de pente 1,2. Celle-ci ne passe pas par l'origine, ce qui est normal car il existe le bruit (conductivité naturelle de l'eau). Comme ce qui nous intéresse dans cette expérience est l'augmentation de conductivité en fonction des ajouts de sel, nous avons enlevé le bruit à chaque mesure afin d'obtenir une droite passant par l'origine.

Nous obtenons ainsi le graphe suivant :

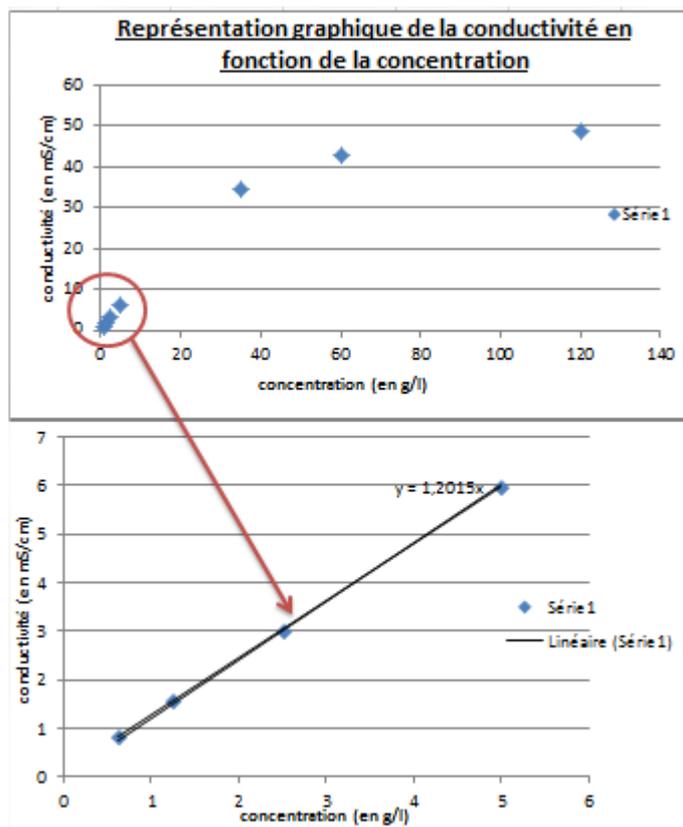


Figure : graphe présentant la relation conductivité-concentration

Calcul de la longueur d'injection :

La longueur de bon mélange L_{BM} peut être estimée par la formule suivante :

$$L_{BM} = 9,5 h \frac{V}{\sqrt{gRJ}}$$

Avec :

H hauteur d'eau (m)

V vitesse moyenne de l'écoulement (m/s)

R (h) rayon hydraulique (m) = surface / périmètre mouillé

J pente de la ligne d'énergie ou pente de la canalisation (m/m).

Avec de fortes approximations, nous pouvons prendre comme données :

$H = 0.2 \text{ m}$

$V = 1 \text{ m/s}$ (déterminé grâce au suivi d'un indicateur coloré sur une distance de 20m)

$J = 1\%$

$R = 1 \text{ m}$

Soit $L = 6 \text{ m}$

On peut aussi prendre pour L_{BM} 75 fois la plus grande distance hydraulique de l'écoulement (hauteur, largeur) si l'injection est faite au centre de l'écoulement. Soit ici comme la largeur fait environ 40 cm, cela donne 30m.

En pratique nous avons injecté le traceur à une distance d'environ 20m de l'endroit où le calcul de conductimétrie a été effectué, et nous avons pu observer qu'avec une telle distance le mélange avait le temps de se faire de manière homogène.

Masse de traceur à injecter :

Dans la pratique et suite à quelques conseils trouvés sur des sites spécialisés, nous avons remarqué qu'un volume de 1 à 2 litres d'eau salé proche de la saturation (soit à 300 g/l) était suffisant pour observer le pic de conductivité et ainsi obtenir des résultats satisfaisants.

Où et quand faire les mesures :

Nous n'avons pu faire que 4 sorties dans le spéléodrome, dont 2 d'entre elles relativement courtes. Il s'agissait donc de définir une stratégie pour essayer de répondre au maximum de questions que nous nous posions. Les principaux points que nous souhaitions étudier étaient les suivants :

- Evaluation des débits de la galerie supérieure et inférieure
- Estimation de la précision de cette méthode
- Comparaison des débits après quelques jours secs ou pluvieux
- Estimation des apports d'eau latéraux et dus aux forages sur une certaine distance

Nous avons pu apporter des éléments de réponses à ces questions, que nous développerons dans l'analyse des résultats.

Figure : mesure de la conductivité dans la galerie



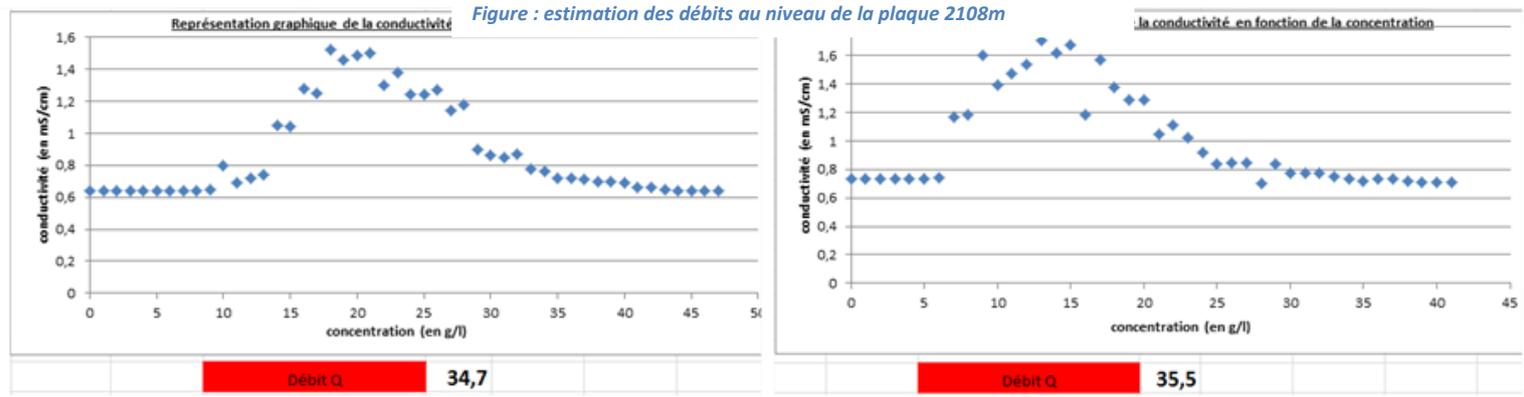
3.2. Exploitation des résultats

En exploitant les courbes obtenues lors des campagnes de mesure sur le terrain, nous tenterons d'apporter des éléments des réponses aux questions que nous nous sommes posé.

3.2.1. Estimation de la précision de la méthode :

Nous avons réalisé deux fois de suite une estimation de débit par méthode de traçage à deux endroits de la galerie. Les résultats obtenus permettent d'avoir un ordre d'idée de la précision de la méthode.

A 2108 m de la sortie de la galerie principale, nous avons obtenu les deux courbes suivantes :



Entre ces deux mesures de débit nous n'obtenons que 2,3% de différence ce qui reste très faible et révèle une grande précision de la méthode.

Remarque : On aperçoit une différence non négligeable du bruit, alors que les mesures ont été faites strictement au même endroit et avec un intervalle de temps très court. Cela peut avoir plusieurs explications:

- ❖ Soit une partie du sel injecté lors de la première mesure était encore présente dans l'eau au moment de la seconde. Cela est vraisemblable vu que la conductivité est supérieure dans le cas de la seconde mesure.
- ❖ Soit il y a eu dérèglement du conductimètre entre les deux mesures.

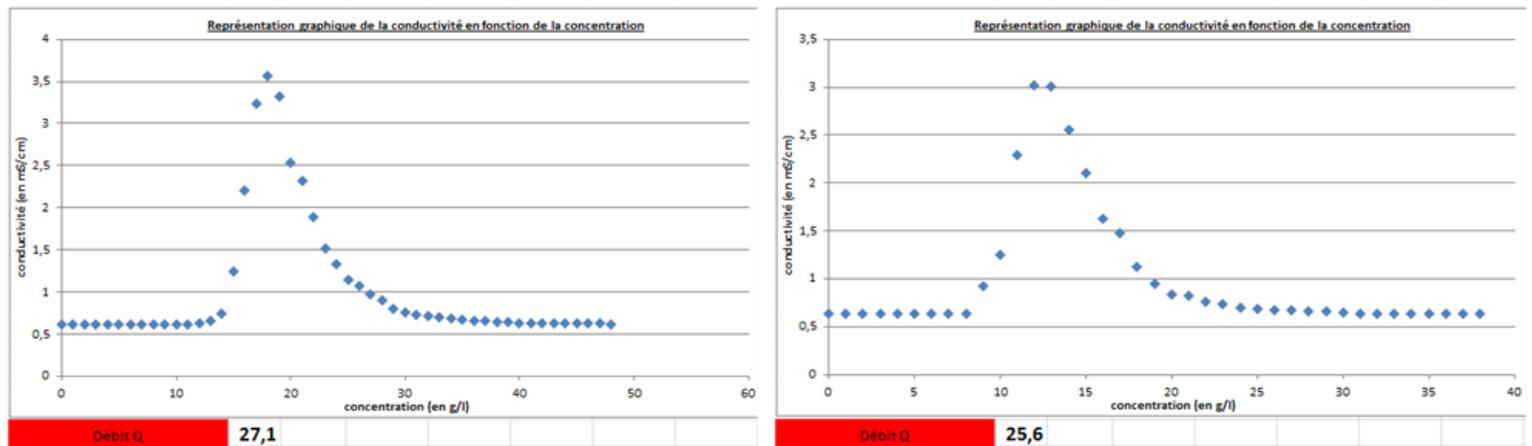
Dans les deux cas cela n'influe en rien sur le résultat final puisque ce qui nous intéresse pour le calcul de débit ce n'est pas la conductivité, mais la différence de conductivité par rapport au bruit lors du passage du traceur.

Figure : photo de la galerie principale



Au niveau du limnigraphe SE, les courbes sont les suivantes :

Figure : estimation des débits au niveau du limnigraphe SE



Dans ce cas nous obtenons une différence de débit de l'ordre de 5.9%.

Avec ces deux doubles mesures, nous pouvons affirmer avec quasi-certitude que la méthode du traçage permet d'obtenir des résultats avec une précision supérieure à 90%. Cependant il existe tout de même une incertitude qui est non négligeable, elle peut provenir de nombreux éléments comme:

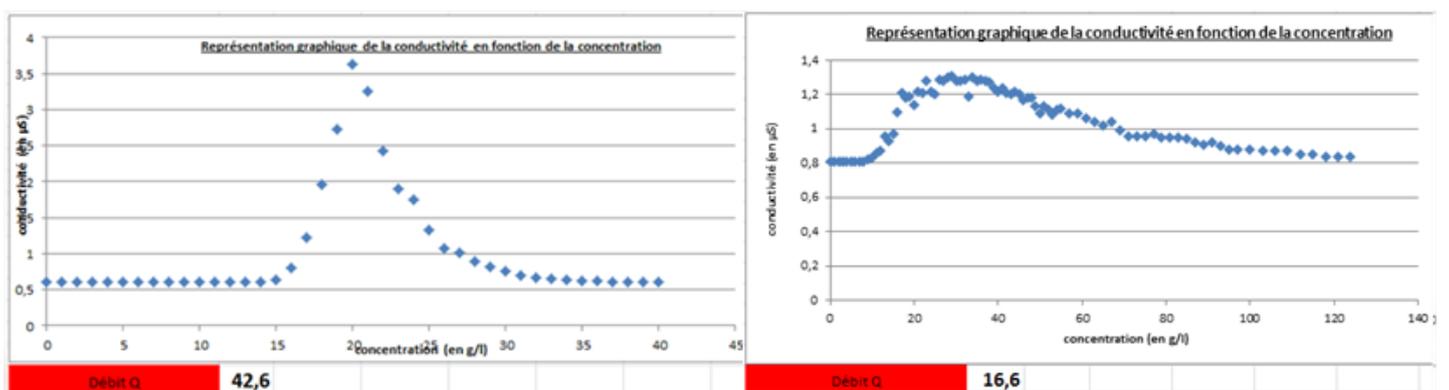
- ❖ L'imprécision du conductimètre
- ❖ Le nombre réduit de mesures par seconde du conductimètre (aux environ de 2)
- ❖ Un mélange inhomogène du sel dans l'eau
- ❖ L'incertitude sur la masse de sel injectée
- ❖ Injection non instantanée (sur environ 1s)
- ❖ ...

3.2.2. Evaluation des débits de la galerie supérieure et inférieure

Au cours de ce projet nous avons fait deux séries de mesures galerie supérieure et galerie inférieure. La première a été faite pendant une période fortement pluvieuse, le débit été d'ailleurs extrêmement importante car l'eau passait au-dessus des seuils, et la seconde a été réalisée une semaine plus tard et après quelques jours sans pluie et avec des fortes chaleurs.

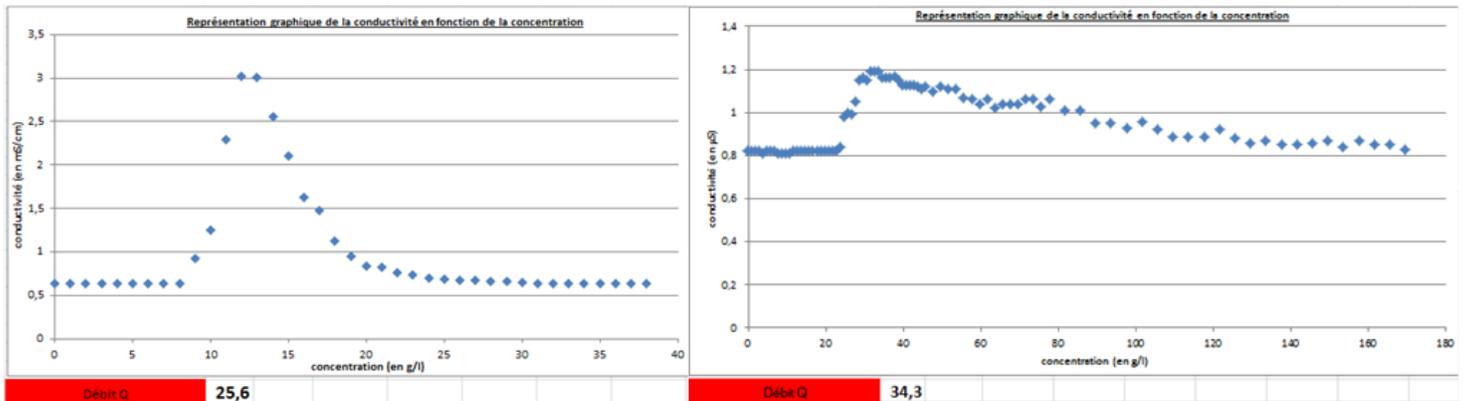
Voici la présentation des débits pendant la période pluvieuse :

Figure : courbes de conductivité et débits de la galerie principale (gauche) et supérieure (droite) en période pluvieuse



Voici maintenant la présentation des débits en période sèche :

Figure : courbes de conductivité et débits de la galerie principale (gauche) et supérieure (droite) en période sèche



Remarque : La galerie supérieure est située à une profondeur assez faible (de l'ordre de 10-15m), donc l'eau qu'elle draine a eu un temps de transfert dans le sol relativement court et ainsi le débit dépend fortement de la météo extérieure. Or dans la présentation des résultats nous remarquons une incohérence : le débit calculé est supérieur en période sèche qu'en période pluvieuse. Cela est d'autant plus vrai que la hauteur d'eau observée au niveau du limnigraphe était inférieure en temps sec. Cela nous fait donc fortement douter sur la véracité des résultats obtenus pour la galerie supérieure.

Il n'est cependant pas étonnant d'obtenir des résultats erronés vu les conditions dans lesquelles les mesures ont été faites : le sel a été injecté à moins de 4m de la mesure par manque de place, dans un réservoir dont les dimensions sont les suivantes : hauteur : 80cm, largeur : 50 cm. Le mélange du sel n'a donc pas eu le temps de se faire de manière homogène.

Si d'autres étudiants sont amenés à poursuivre ce type de mesure, nous leur conseillons d'injecter le sel 15m plus haut au début du tuyau. Cela permettra un mélange beaucoup plus homogène entre l'eau et le sel et donc des résultats avec une précision supérieure.

Dans la suite de notre rapport, nous ne tiendrons donc plus en compte les résultats calculés sur la galerie supérieure.

Dans la galerie principale nous obtenons des débits en accord avec ce qui avait été calculé avec les limnigraphes. Ceux-ci sont relativement importants (entre 25 et 45 l/s) mais semblent dépendant des conditions météorologiques. Nous allons étudier cette influence dans le paragraphe suivant.

3.2.3. Comparaison des débits après quelques jours secs ou pluvieux

Le département géoingénierie de l'école n'ayant plus les codes pour accéder aux données pluviométriques de Météo France, et Pascal Admant ayant arrêté ses mesures, nous avons eu du mal à trouver des données précises sur la pluviométrie en forêt de Haye. Cette étude sera donc plus qualitative que quantitative.

Nous nous sommes basés sur les données de <http://www.meteociel.fr> qui nous a permis de trouver des données pluviométriques journalières à Essey-lès-Nancy (situé à environ 15km de la galerie). Cependant nous pouvons considérer que la pluviométrie reste proche.

Figure : Précipitations durant les 7 jours précédant la mesure, en période humide (gauche) et sèche (droite)

Jour	Température max.	Température min.	Précipitations 24h	Ensoleillement	Jour	Température max.	Température min.	Précipitations 24h	Ensoleillement
<u>20</u>	11.2 °c	9.5 °c	16.4 mm	0 h	<u>28</u>	21.9 °c	5.5 °c	2 mm	8.2 h
<u>21</u>	14.4 °c	8.9 °c	8 mm	0.1 h	<u>29</u>	15 °c	8.6 °c	0 mm	1.6 h
<u>22</u>	12 °c	8.3 °c	0.2 mm	0.2 h	<u>30</u>	15.3 °c	5 °c	0.8 mm	3.1 h
<u>23</u>	8.9 °c	3.7 °c	10 mm	1.4 h	<u>31</u>	14.8 °c	8.5 °c	10.1 mm	0 h
<u>24</u>	11.9 °c	2.9 °c	0.2 mm	3.1 h	<u>1</u>	19.6 °c	10.7 °c	0 mm	4.6 h
<u>25</u>	14.3 °c	1.9 °c	1.4 mm	5.5 h	<u>2</u>	18.9 °c	9.6 °c	0 mm	1.6 h
<u>26</u>	10 °c	6.2 °c	0.4 mm	0 h	<u>3</u>	17 °c	6.7 °c	0 mm	5.2 h
<u>27</u>	20 °c	8.3 °c	0 mm	9.5 h	<u>4</u>	21.2 °c	9.6 °c	0 mm	14.1 h
		total:	36,6				total:	12,9	

D'après ces données, nous remarquons que les précipitations cumulées des 7 jours précédant la mesure sont presque 3 fois supérieures avant la première série de mesure qu'avant la seconde. Or les graphes précédents montrent que le débit de la galerie inférieure est passé de 42.6 à 25.6 l/s en l'espace de 8 jours. Nous pouvons donc en tirer plusieurs conclusions:

- ❖ Il existe un lien direct entre pluviométrie et débit d'eau dans la galerie principale. La hauteur de la nappe dépend donc de la pluie efficace.
- ❖ Ce lien est relativement rapide, malgré la profondeur importante de la galerie (de l'ordre de 40m). En seulement 4 jours sans précipitations, le débit chute de 40%. Cela révèle que soit la nappe est alimentée par un réseau de fractures important, soit la perméabilité du calcaire permet une circulation rapide des eaux vers la nappe. Le second cas paraît le plus probable car dans le cas contraire on observerait une fracturation de la roche au niveau de la galerie.

Mais ces mesures doivent être faites de manière plus systématique et être comparées à la pluviométrie pour pouvoir en tirer des conclusions précises et avec certitude.

3.2.4. Estimation des apports d'eau latéraux et dus aux forages

Nous n'avons malheureusement jamais pu parcourir l'ensemble des 7 km de galerie, mais sur les quelques centaines de mètres de part et d'autre du puits de Clairlieu nous avons remarqué que certains forages et certaines parois latérales contribuaient à un apport important d'eau alors que d'autres étaient complètement secs.

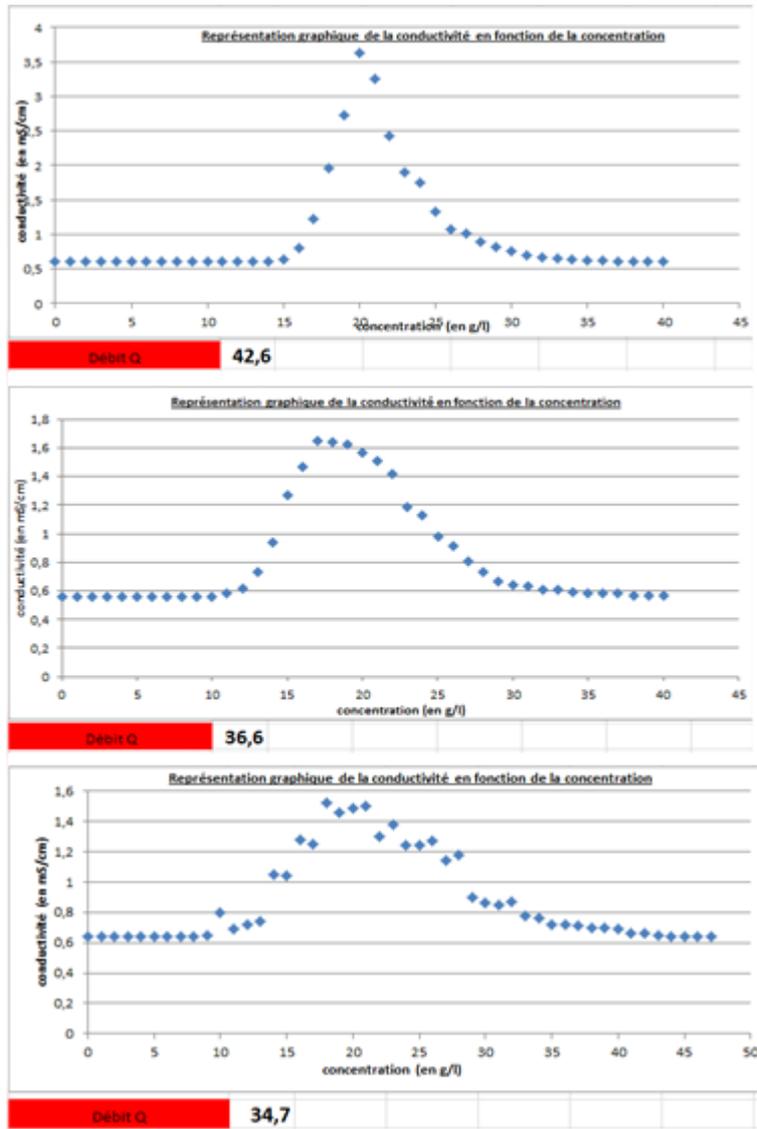
Pour essayer de comprendre le pourquoi de la chose, nous pensons qu'il est intéressant de cartographier les zones fortement sèches, celles fortement humides et d'en évaluer l'apport. C'est ce que nous avons commencé à faire sans pouvoir poursuivre. Nous présenterons tout de même nos quelques résultats.

Un même jour nous avons réalisé des mesures à trois endroits de la galerie principale, en partant du puits de Clairlieu et en remontant petite à petit. Il est assez difficile de se repérer dans la galerie, du coup nous avons été forcés d'effectuer les mesures au niveau de plaques indiquant la distance à la sortie et non au début ou à la fin d'une zone d'apports latéraux importants.



Figure : exemple de plaque permettant de nous situer dans la galerie principale

Figure : Courbes de conductivité et débits aux repères 1740, 2000 et 2108m (de haut e bas)



Nous remarquons avant tout que plus nous remontons en amont de la galerie, plus le débit est faible ce qui est normal car pertes sont négligeables voir même nulles et ce qui confirme l'exactitude de la méthode de calcul.

Un calcul rapide permet de déterminer qu'entre les repères 1740 et 2000 (on l'appellera zone 1) les apports sont de 0.02 l/m soit 0.004l/m^2 , en considérant une hauteur de 1.8m et une largeur de 1.3m, ce qui est une valeur moyenne le long de la galerie. Alors qu'entre 2000 et 2108 (zone 2) ils sont de 0.018 l/m.

Ces apports sont relativement importants car s'ils étaient identiques tout le long de la galerie le débit au niveau du limnigraphe SE serait supérieur à 100 l/s. Si on n'a pas un tel débit, c'est qu'il existe le long de la galerie principale de nombreuses zones sèches, malgré des forages verticaux faisant parfois plus de 5m. Il est légitime de se demander pourquoi de telles zones existent, et mineurs ayant creusé la galerie se l'ai sûrement posé quand, à leur grand désespoir, ils se sont aperçu que pas une seule goutte d'eau ne sortaient de forages faits sur plusieurs dizaines de mètres de galeries.

Nous ne pourrions malheureusement pas apporter de réponse dans ce rapport. A notre avis une cartographie précise des zones sèches et des zones humides avec une estimation des apports par mètre, couplé avec une étude approfondie de la géologie locale pourrait donner quelques éléments de réponse.

Cependant nous pouvons supposer deux pistes principales:

- ❖ Soit le minerai de fer ne possède par la même perméabilité partout, et certaines zones seraient plus imperméables que d'autres. Certaines zones seraient situées dans une partie imperméable ne pouvant donc drainer la nappe.
- ❖ Soit à cause de la géographie et géologie locale, la nappe ne se situe pas entièrement là où les hydrologues l'avaient prévu. Ainsi une partie de la galerie ne recouperait pas la nappe.

Dans tous les cas, ces zones sèches ont posé des soucis aux ingénieurs de l'époque. Débitant un volume inférieur à celui espéré, elles ont contribué à l'abandon du spéléodrome après seulement quelques années d'exploitations.

3.3. De nouveaux dispositifs de mesure

Nous avons pensé à de nouveaux dispositifs de mesure qui permettraient de résoudre certaines énigmes du spéléodrome.

- L'origine de l'eau drainée par la galerie supérieure

La galerie supérieure est relativement courte, de l'ordre de 250 m. Cependant elle draine des quantités très importantes d'eau, presque identiques à celles drainées par les 5km de galerie en amont du puits de Clairlieu. Il est donc normal de se demander pourquoi une telle quantité d'eau est débitée par cette galerie. Deux explications paraissent viables:

- ❖ Soit il existe un réseau de fracturation important entre la surface et la galerie, et l'eau s'écoulerait avec abondance dans ces fractures.
- ❖ Soit il existe une nappe au-dessus des marnes micacées, couche un peu moins perméable que les autres. La galerie drainerait donc cette nappe.

Comme le débit de la galerie supérieure est fortement dépendant des intempéries, il semble que le réseau de fracture soit le plus probable. Cependant nous pourrions le vérifier grâce à un capteur de température de type Mini-Diver produit par Schlumberger.

Ce capteur comporte de nombreux avantages : il peut effectuer jusqu'à 24000 mesures de pression ou température à intervalles de temps réguliers, il ne dépend pas d'une alimentation externe, il est précis et le transfert de données se fait sans fils.

Figure : photo du Mini-Diver



L'idée est que les températures des pluies torrentielles lors des orages sont souvent plus chaudes que les pluies habituelles. En comparant les horaires des gros orages d'été et la variation de température de l'eau dans la galerie supérieure, nous pourrions avoir une idée précise du temps de transfert de l'eau jusqu'à la galerie supérieure. Mais cela uniquement dans le cas où le transfert est rapide, car dans le cas contraire la température de l'eau aura baissé le temps d'arriver à la galerie.

Ce type d'expérience nous permettrait potentiellement de déterminer la perméabilité des terrains et l'existence ou non d'un réseau de fractures.

Enfin nous pensons que l'étang situé juste à proximité du puits de Clairlieu pourrait en partie expliquer ce débit, une expérience avec un indicateur coloré pourrait permettre de savoir si c'est effectivement le cas.

- La corrélation pluviométrie/débit dans les deux galeries

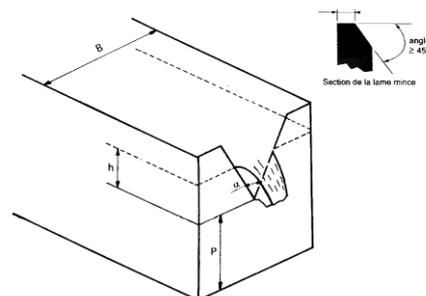
L'autre dispositif que nous pensons très intéressant mais que nous n'avons pas pu mettre en œuvre par faute de temps et la rénovation des déversoirs déjà utilisés.

Après s'être renseigné dans la littérature et compte tenu des débits mesurés, nous pensons que contrairement à ce qui a déjà été fait un déversoir à tête triangulaire et paroi mince serait plus judicieux :

Figure : tableau indiquant le type de déversoir à utiliser en fonction du débit (<http://medhycos.mpl.ird.fr/en/data/hyd/Drobot/5C.htm>)

Gamme de débits à mesurer		Type de déversoir à utiliser	Lame d'eau correspondante		Observations
Mini	Maxi		Mini	Maxi	
0.2 l/s	35 l/s	triangulaire type $\frac{1}{4} \text{ tg } a / 2 = 1/4$	5 cm	40 cm	La pelle doit avoir si
0.4 l/s	70 l/s	triangulaire type $1/2 \text{ tg } a / 2 = 1/2$	5 cm	40 cm	possible plus de 0.45 m, donc le canal doit avoir
1 à 20 l/s	$70 > Q < 140$ l/s	triangulaire type $90^\circ \text{ tg } a / 2 = 1$	5 cm pour 1 l/s	40 cm pour 140 l/s	plus de 0.85 m de hauteur
> 20 l/s	200 l/s	Rectangulaire de 0.30 m de largeur	10 cm	40 cm	pelle > 40 cm
50 l/s	500 l/s	Rectangulaire de 1 m de largeur	10 cm	40 cm	hauteur canal > 80 cm
100 l/s	1000 l/s	Rectangulaire de 1 à 2 m de largeur	15 à 10 cm	65 à 45 cm	hauteur canal > 1.30 m hauteur canal > 90 cm
500 l/s	5 000 l/s	Rectangulaire de 5 à 10 m de largeur	15 à 10 cm	65 à 40 cm	hauteur canal > 1.30 m hauteur canal > 90 cm

Figure : Schéma du déversoir à tête triangulaire



Le débit pourrait alors s'obtenir avec la formule suivante :

$$Q = C_e * \frac{8}{15} * \sqrt{2g} \tan(2a) * h^{(5/2)}$$

Avec :

Q est le débit (m^3/s)

C_e le coefficient de débit $f(a, h/p, p/B)$;

g l'accélération de la pesanteur (m/s^2);

a l'angle formé par les parois de l'échancrure;

h la charge piézométrique fictive ou hauteur de la surface liquide

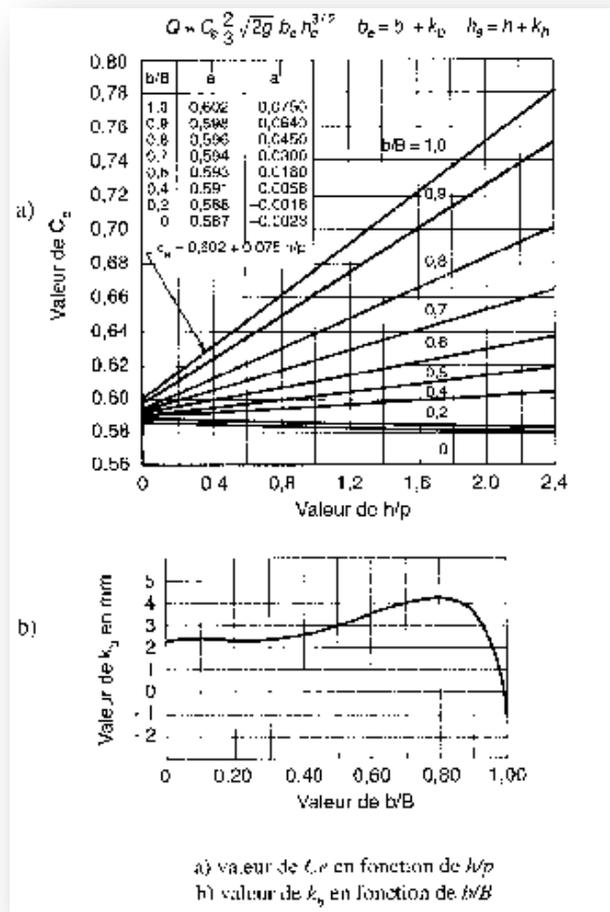
On utilise d'après le tableau précédent une échancrure de type ¼ donc où l'écartement des sommets de l'échancrure est égal à la moitié de la hauteur verticale correspondante ($\tan(a/2) = 0.25$)

Ce qui nous donne la formule finale :

$$Q = C_e * \frac{2}{15} \sqrt{2g} h^{(5/2)}$$

Pour calculer le coefficient C_e il faut se référer aux courbes suivantes :

Figure : Courbes donnant le coefficient C_e



Pour avoir accès à la hauteur d'eau h , les spéléologues ont eu il y a quelques années l'idée de mettre des limnigraphes. Il nous paraît beaucoup plus pratique d'utiliser le Mini-Diver décrit précédemment, car en ayant accès à la pression d'eau on détermine aisément la hauteur. Cela permettrait d'avoir des débits beaucoup plus précis, et n'obligerait pas une relève régulière des résultats puisque le capteur peut stocker en mémoire plusieurs semaines de relevés.

Une campagne de mesure sur plusieurs mois donnerait de nombreuses informations dont :

- ❖ L'influence de la pluviométrie sur les débits
- ❖ Le temps que met l'eau à parvenir jusqu'à la nappe, donnant également des informations sur la géologie du terrain
- ❖ L'existence ou non d'un lien entre les débits des galeries supérieures et inférieures

4. Etude du terrain autour de la galerie

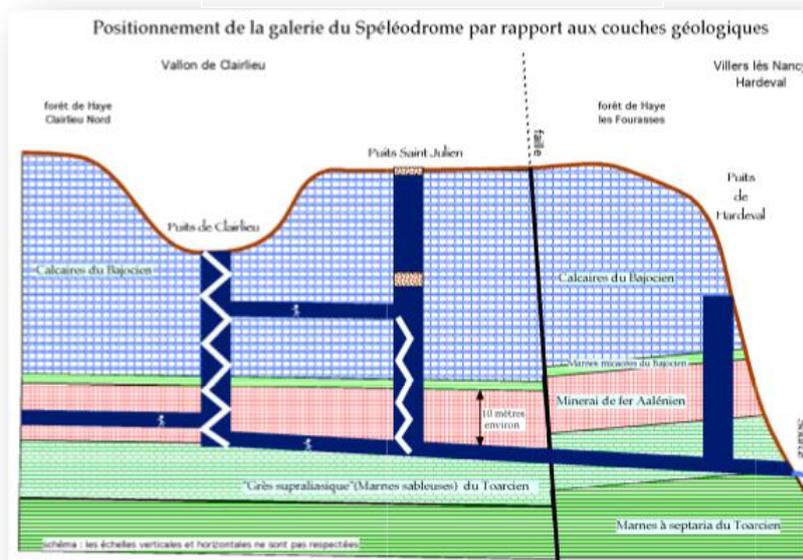
Après avoir étudiés les variations de débit à la fois dans la galerie inférieure et supérieure, il nous a paru intéressant de nous pencher sur les caractéristiques du terrain au-dessus et en dessous de ce premier lieu d'étude.

Nous avons pour cela dans un premier temps déterminé une nouvelle coupe géologique de notre terrain. Puis nous avons mis en place une nouvelle expérience de sondage électrique des terrains pour avoir une idée de la profondeur à laquelle se trouvait la nappe qui alimentait en eau la galerie.

4.1. Elaboration d'une nouvelle coupe géologique

Afin de mieux comprendre le fonctionnement du spéléodrome, nous avons cherché à améliorer la coupe en long déjà existante peu précise et ne respectant pas les échelles horizontales et verticales.

Figure : schéma simplifié de la coupe en long



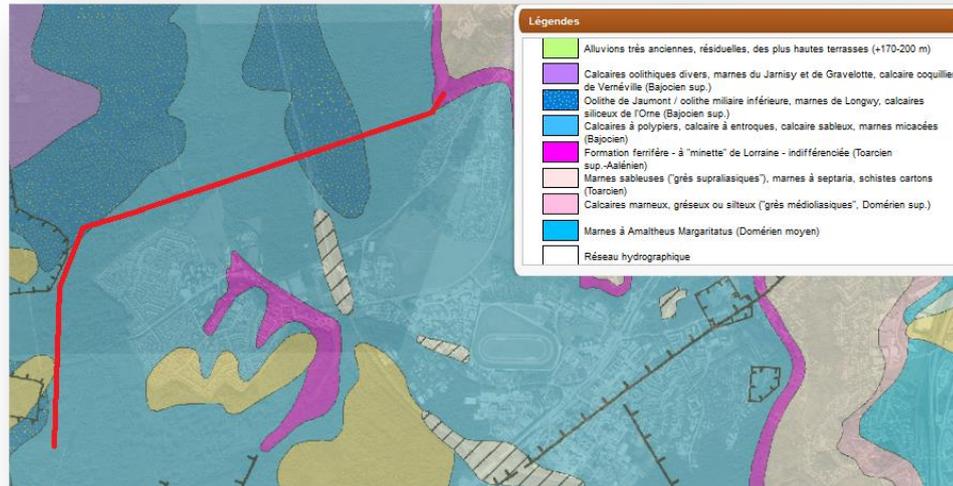
Pour cela, nous avons trouvé important de donner une échelle correcte à la coupe. Nous avons donc tout d'abord utilisé le logiciel Google Earth qui nous a fourni le profil d'élévation sur un tracé choisi. Après avoir reproduit les galeries du spéléodrome sur la carte, nous avons obtenu les altitudes de surface.

Figure : profil d'élévation à la surface de la galerie principale.



Puis pour la partie géologie nous avons utilisé plusieurs documents que nous disposons dont le log stratigraphique, très important, qui a été présenté au début du présent rapport ainsi que des données fournies par le site internet du BRGM : <http://infoterre.brgm.fr/viewer/MainTileForward.do#> . Cela nous a permis de connaître les couches géologiques affleurantes ainsi que l'épaisseur de celle-ci. Pour ce qui est des pendages, nos connaissances de la région permettent de supposer qu'ils sont subhorizontaux (les galeries des mines de fer avoisinantes étaient horizontales).

Figure : données fournies par le site infoterre



Cependant, la coupe en long existante montre la présence d'une faille subverticale avec un léger rejet. N'ayant eu le temps de le vérifier, nous supposons son existence comme acquise. Et ne pouvant la localiser correctement sur la carte nous nous en tiendrons à la faille présente sur la coupe géologique initiale.

En combinant toutes les données nous obtenons la coupe en long suivante précédée du log stratigraphique de la zone :

Figure : log stratigraphique correspondant à la coupe en long

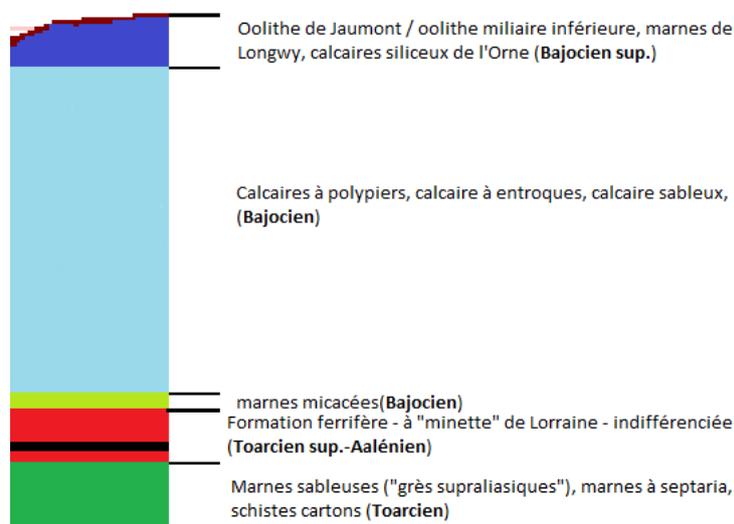
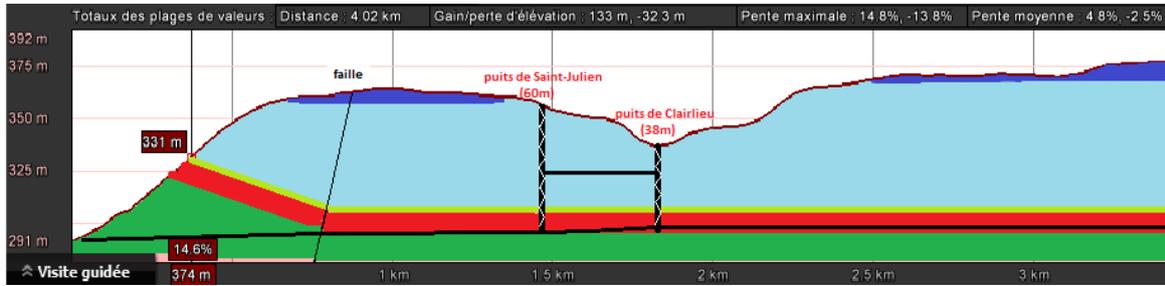


Figure : Nouvelle coupe en long de la galerie principale



4.2 Calcul de la résistivité des terrains (quadripôle Schlumberger)

Pour mesurer la résistivité des terrains nous avons mis en place le quadripôle de Schlumberger. Cette méthode géophysique électrique permet en effet de déterminer la composition des terrains par un sondage de la résistivité de ceux-ci. Ce qui nous intéresse ici et de déterminer la position d'une potentielle nappe d'eau par la baisse de la résistivité des terrains. La vitesse de propagation du courant est plus faible dans les terrains contenant de l'eau, donc la résistivité est plus faible.

4.2.1 Explication de la méthode

Ce dispositif de mesures nous a été présenté par Mme Judith Sausse lors de nos expériences à l'IUT de Nancy. C'est de cet exposé que nous est venue l'idée de mesurer la résistivité des sols en Plateau de Haye afin de délimiter la nappe alimentant la galerie.

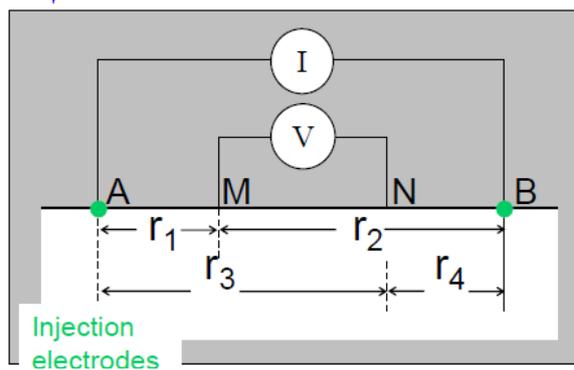


Figure : modèle théorique du dispositif (Basic of survey and log, Mme Judith Sausse)

Le schéma ci-dessus présente le circuit électrique qu'il s'agit de mettre en place sur le terrain. On crée un circuit entre A et B où l'on fait passer un courant I et on mesure une différence de potentielle ΔV aux bornes M et N de notre circuit afin d'obtenir la résistivité R des terrains en utilisant la formule suivante construite sur la loi d'Ohm :

$$\rho = \frac{\Delta V K}{I}$$

ρ : résistivité du terrain à une profondeur donnée ($\Omega.m$)

ΔV : différence de potentiel entre M et N (V)

I : intensité du circuit (A)

K : facteur géométrique (m)

Le facteur géométrique K ne dépend que des caractéristiques géométriques du dispositif étudié. Ces valeurs restent les mêmes quel que soit le terrain étudié. En effet K est donné par la formule suivante :

$$K = \frac{2\pi}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BM} + \frac{1}{BN}}$$

Voici un schéma qui résume la pénétration des ondes électriques et les champs induits qu'elles créent dans le sol.

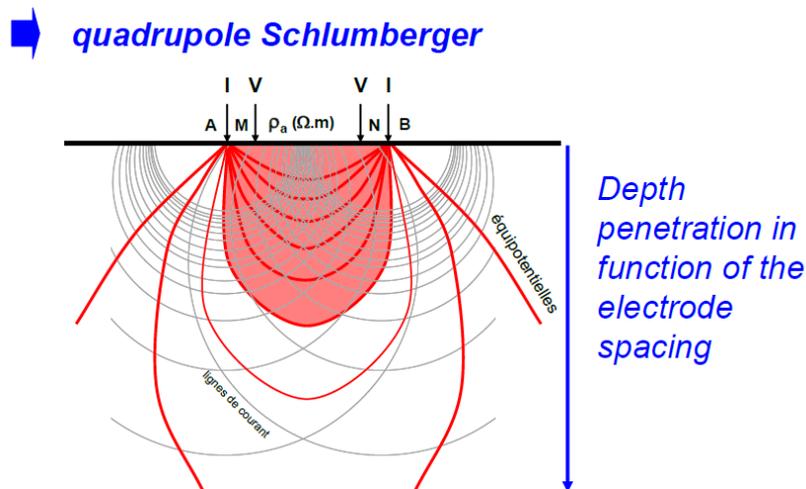


Figure : Représentation du champ électrique sous le sol créé par les électrodes (Basic of survey and log, Mme Judith Sausse)

4.2.2. Mise en place du dispositif sur le terrain

Pour la mise en place de ce dispositif sur le terrain nous avons besoin d'un certain matériel qui est le suivant :

- ❖ 4 bobines électriques (dont 2 de plus de 50 m de long)
- ❖ 2 mètres de plus de 50 m de long
- ❖ Plusieurs maquereaux afin de fixer les mètres au sol
- ❖ Le quadripôle de Schlumberger (pour réaliser les mesures mais qui sert également pour l'alimentation en courant)



Figure : Dispositif nécessaire à l'expérience (Basic of survey and log, Mme Judith Sausse)

Nous avons tout d'abord pensé à installer ce quadripôle dans l'espacement de 500m qui sépare le puits de Clairlieu du puits de Saint-Julien mais la végétation trop dense d'un côté et la pente trop élevée du talus de l'autre ne nous a pas permis d'installer le dispositif de 100m d'envergure sur ce terrain.

Pour ces raisons pratiques nous avons décidé d'installer notre dispositif sur des chemins autour des puits de Clairlieu et de Saint-Julien pour ne pas être dérangé par la végétation et pouvoir anticiper les pentes trop fortes.

Nous sommes dans un premier temps restés proches du puits Saint Julien mais au-delà de 2m pour AB/2, le quadripôle saturé et ne nous donnés plus de valeur pour la tension ni l'intensité. Après injection de l'appareil celui-ci affichait « défaut ligne ». Nous avons essayé deux fois sur ce chemin mais à deux reprises la tension trop importante ne nous permettait pas de nous éloigner à plus de deux mètres de notre quadripôle. Le fait que cette expérience n'est pas fonctionnée peut s'expliquer par le fait que la couche de calcaire qui affleure à la surface donne une tension trop élevée non mesurable par notre quadripôle. Ce dysfonctionnement peut également s'expliquer par la présence de tuyau enterré à côté de l'autoroute A31. Ce chemin qui était perpendiculaire à la galerie et nous donnant aucun résultat nous avons choisi de nous placer sur un chemin parallèle à la galerie.

Ce chemin fournissant ainsi une plus grande connaissance de ce qu'il se passe dans le calcaire au-dessus de la galerie sur une plus grande longueur. On peut sur le chemin ainsi indiqué sur la carte en jaune obtenir les différentes couches géologiques entre le puits de Clairlieu et celui de Saint-Julien et interpréter l'existence d'une nappe ou non.



Figure : Carte IGN de la zone des mesures par quadripôle électrique (Géoportail)

Légende

Orange : lieux des premières mesures

Jaune : lieux de la deuxième série de mesures

Rouge : galerie (avec le puits de Clairlieu à gauche et celui de Saint-Julien à droite)

4.2.3. Exploitation des mesures

L'acquisition aussi appelé « problème direct » qui consiste à mettre le dispositif en place ne contient pas de nombreuses difficultés. En revanche l'interprétation des données appelées aussi « problème inverse » consiste en l'analyse des données collectées sur le terrain et permet après compréhension des mesures de donner la solution géologique ou hydrogéologique la plus vraisemblable possible. C'est-à-dire la structure interne du sous-sol la plus proche de la réalité qui a permis de générer les résistivités observées en surface.

4.2.3.1. Calcul de la profondeur de prospection

La profondeur de prospection peut être obtenue en connaissant les paramètres du quadripôle électrique mis en place.

Dispositifs	Profondeur d'investigation (d'après Roy, 1972)		Profondeur d'investigation effective (d'après Edwards, 1977)	
	z/a	z/L	ze/a	ze/L
Wenner α	0,321	0,107	0,519	0,173
Wenner β	0,300	0,100	0,417	0,139
Wenner γ	0,345	0,115	0,594	0,198

Tableau : Détermination de la profondeur de prospection pour un quadripôle électrique

Pour calculer la profondeur d'investigation on peut utiliser la formule donnée pour le quadripôle de Wenner de type alpha même si ce dispositif ne correspond pas exactement au dispositif que nous avons mis en place sur le terrain. Le quadripôle de Wenner de type alpha est très proche de celui de Schlumberger sauf que celui-ci maintient une distance $a=AB/3$ entre les électrodes M et N. On prendra donc en compte le coefficient d'un tel quadripôle qui est de 0.173 quitte à majorer la profondeur d'investigation à laquelle on effectue les mesures. Car on peut également considérer un facteur pour calculer la longueur d'investigation allant de 1/6 à 1/8 correspondants au quadripôle de Schlumberger. Ces facteurs n'ayant pas été obtenus de façon théorique mais pratique nous retiendrons par la suite 0.173. La profondeur de prospection ze est donc donnée par :

$$ze = 0.173 * AB$$

En calculant la profondeur de nos terrains d'après l'essai électrique on se rend compte que notre sondage descend à une profondeur de 17.3 m au maximum pour une étendue de fil de 100m.

4.2.3.2 Premières interprétations (grâce au logiciel Excel)

Après avoir effectué les mesures la première interprétation de nos données consiste à tracer le Log de la résistivité en fonction du Log de $AB/2$ (AB étant l'écartement entre les deux électrodes). Cela peut permettre dans certains cas de distinguer les différentes couches de notre terrain, marquées par une rupture de la résistivité et un palier au niveau de la courbe.

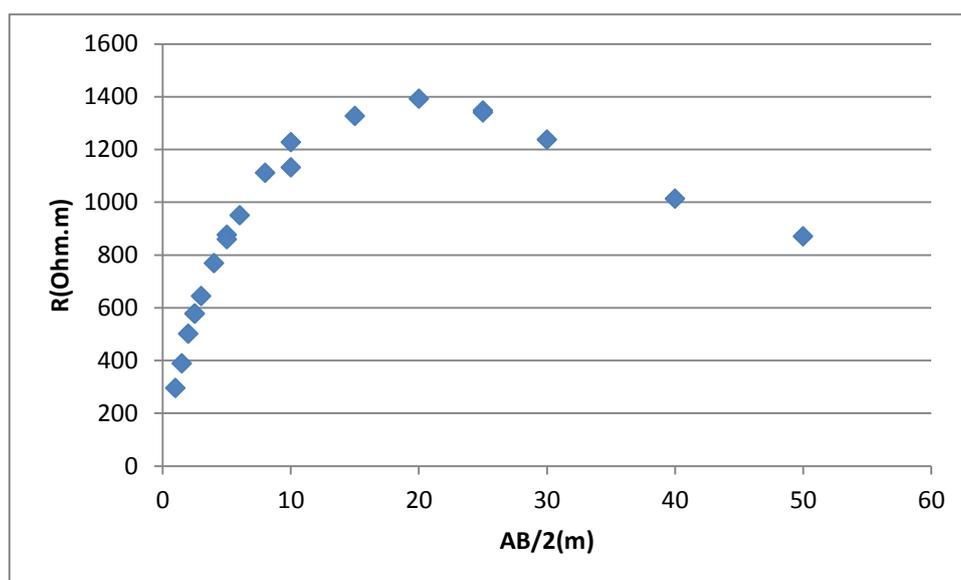


Figure : Représentation de la résistivité en fonction de $AB/2$

Nous n'avons pas la forme habituellement étudié de courbe faisant apparaître plusieurs paliers et permettant alors de distinguer facilement plusieurs couches. Cependant après certaines recherches on s'aperçoit que cette courbe est semblable à une courbe représentant une formation géologique contenant de l'eau. Voici la courbe d'interprétation des mesures obtenue lors de recherche de nappe à l'aide cette méthode. Sur la courbe ci-dessous apparaît le niveau de la nappe (sur le site de Kappelen par un groupe de chercheur de l'institut de Lausanne). Le niveau de la nappe a été obtenu par forage dans le sol elle correspond à une valeur de 4.4m soit une distance OA de 12.7m.

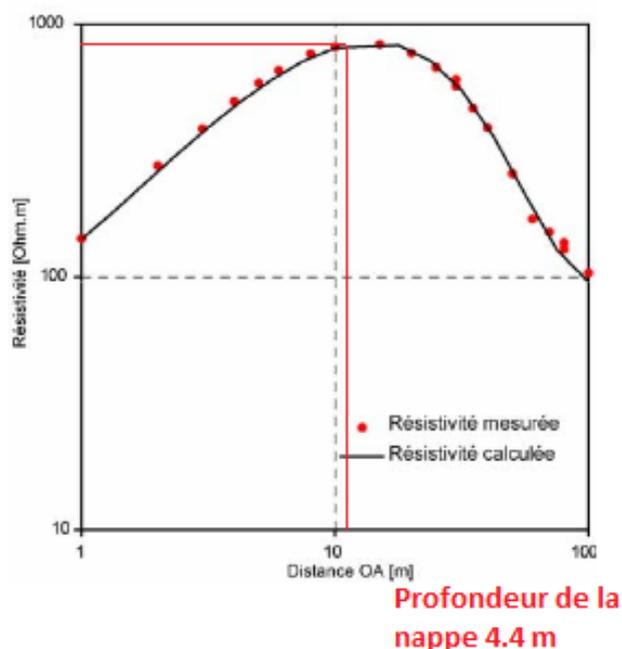


Figure : Forage électrique sur le site de Kappelen + forage niveau de nappe

On peut ainsi voir que le début de la pente descente de la courbe correspond au début de la nappe dans les sables graveleux. Comme nous le montre ce tableau on peut envisager la présence d'eau dans les argiles à partir d'une résistivité de 1000 Ohm.m cette valeur correspondant à la limite de sables secs. La comparaison de ces deux courbes ne pourra pas être effectuée instantanément car la couche géologique contenant la nappe dans notre cas est une nappe de calcaire et non une nappe de sables graveleux.

Sables et graviers secs	1 000-10 000
Sables et graviers imbibés d'eau douce	50-500

Tableau : Résistivités des sables et graviers site Kappelen : Sables et graviers secs et imbibés en Ohm.m (ASTIER, 1971)

Dans le cas de la nappe probable située sous le Plateau de Haye il faut nous référer aux résistivités du calcaire sec et du calcaire imbibé d'eau. Voilà les données pour cette nouvelle roche:

Calcaires	300-10 000
Calcaires saturés en eau douce	300
Calcaires saturés en eau de mer	8,6

Tableau : Résistivités des calcaires secs et imbibés en Ohm.m (ASTIER, 1971)

Sans étudier en détails la figure donnant R en fonction d'OA et en connaissant les résistivités de notre matériau. On peut expliquer la tendance de descente de notre courbe qui correspond certainement à une augmentation de la quantité d'eau présente dans la couche calcaire. On observe une baisse brutale de la résistivité et donc une augmentation de la conductivité des terrains traversés. Ceci peut s'interpréter par la présence de plus en plus importante d'eau dans les pores de la roche traversée, qui aurait ainsi tendance à faire baisser la résistivité du milieu.

4.2.3.3. Approfondissement de l'étude par la méthode VES

Dans un second temps pour pouvoir délimiter les différentes couches observées nous avons utilisé le logiciel d'inversion VES pour Windows qui permet d'obtenir la superposition de la courbe théorique et de la courbe pratique (tracée à partir des données collectées sur le terrain). Cette méthode nous a permis de distinguer trois couches différentes dans la hauteur totale de terrains investigués. Nous pouvons grâce à ce logiciel définir les propriétés des deux premières mais pas de la dernière qui n'a pas été sondée intégralement.

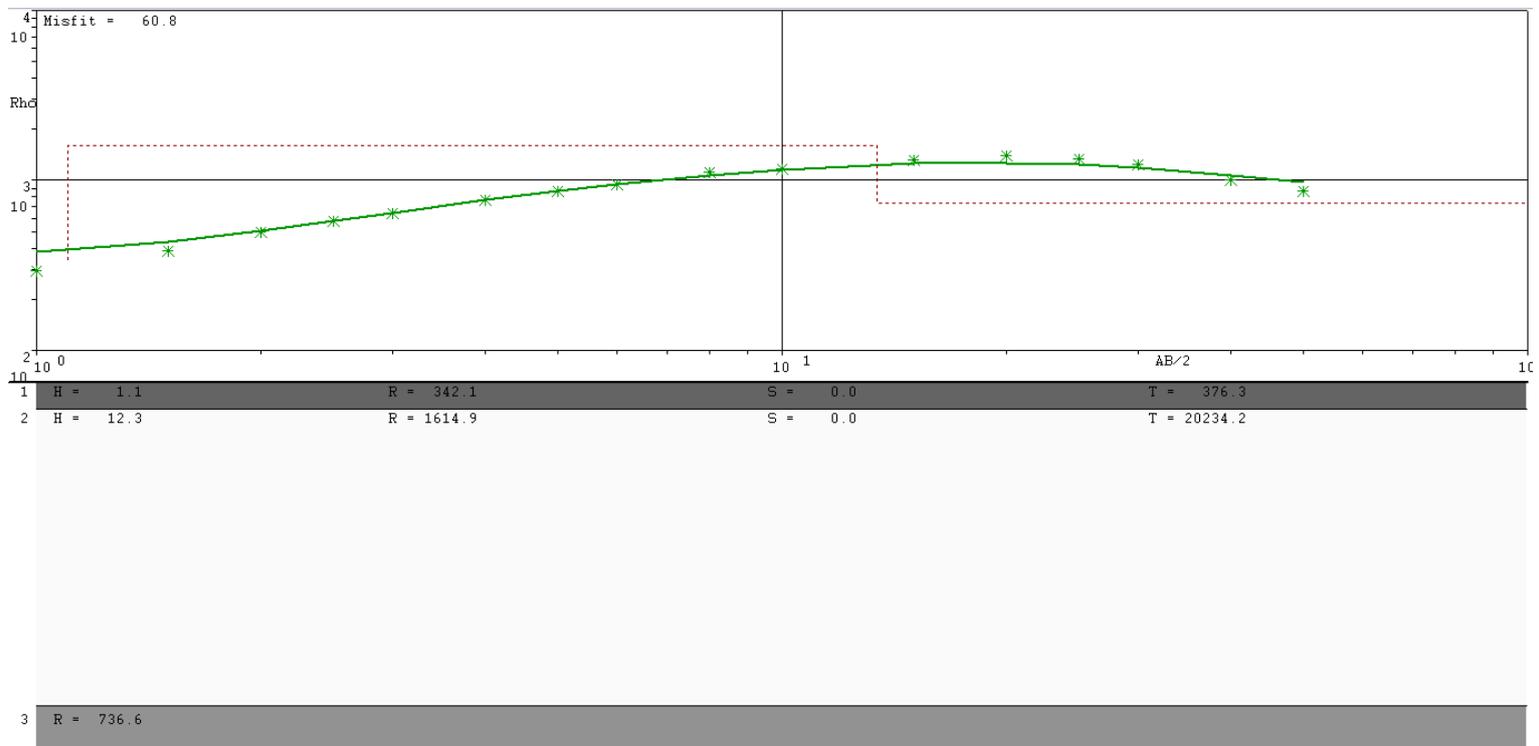


Figure : Interprétation VES des données

Automatic Interpretation of 2 & 3 Layer Curves : Starting Model

No. Layer:	Thickne:	Resistivi
3	0.8	342.1
Layer	19.0	1489.4
Layer	Infini	783.5

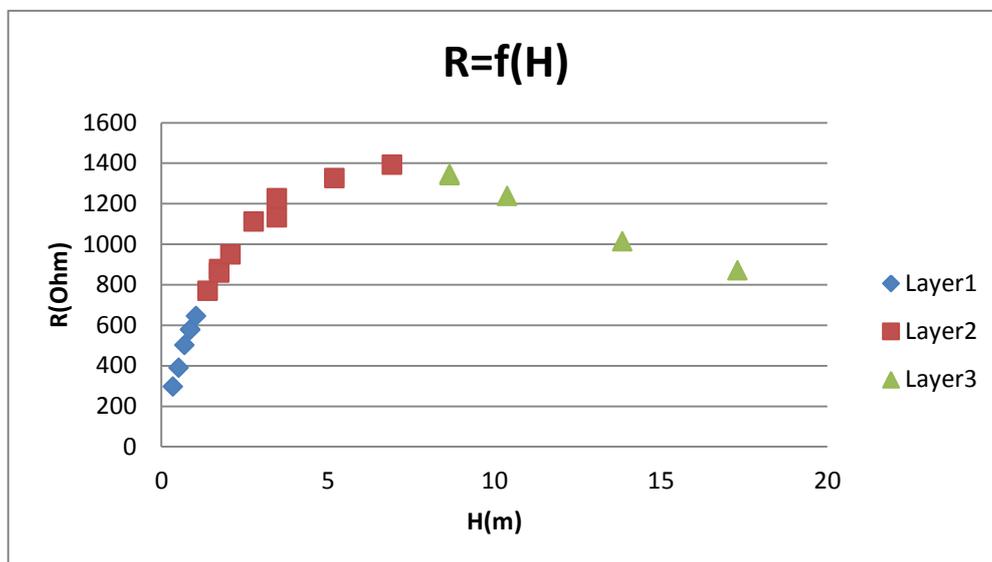
Advanced Opti:

No. iteratio	100	Momentum	50.0
--------------	-----	----------	------

OK Cancel

Figure : Zoom sur les propriétés des différentes couches

On reporte ces différentes couches sur la courbe donnant R en fonction de AB/2, on notera Layer 1,2 et 3 les différentes couches obtenues.



Pour interpréter ces différentes couches, on peut noter que l'épaisseur de la première est d'une épaisseur assez faible de 1.1m on peut donc penser que celle-ci correspond à des formations superficielles voire plus loin à un calcaire très fracturé. La deuxième couche ayant des résistivités allant de 800 à 1400 Ohm.m correspond à des calcaires en accord avec les données du tableau présentant la résistivité des calcaires. Puis la phase descendante correspond à une phase de baisse significative de la résistivité de la couche traversée. On peut imaginer que le calcaire se charge en eau. Pourtant dans cette troisième couche on n'atteint pas la valeur de 300 Ohm.m qui correspond à une couche de calcaire saturée en eau. Le niveau de la nappe alimentant la galerie n'est alors pas atteinte.

Conclusion

Ce sondage électrique nous a permis de mettre en valeur une couche au-dessus de la galerie supérieure plus remplie d'eau que la partie supérieure du calcaire mais le niveau de la nappe n'est pas atteint. Pour déterminer le niveau de la nappe il aurait fallu poursuivre le sondage à des profondeurs plus grandes et pour cela être muni d'un quadripôle de Schlumberger plus puissant que celui que nous avons utilisé. On peut arriver à la conclusion cependant que la galerie supérieure du spéléodrome n'est pas alimentée par une nappe phréatique, mais par une série de fractures dans ce

même calcaire. L'eau qui s'écoule dans la galerie supérieure paraît donc venir presque directement de la surface et donc ne pas être d'une très bonne qualité en comparaison avec l'eau qui s'écoule dans la galerie inférieure. La nappe alimentant la galerie inférieure doit être à une profondeur de 30 à 35m, il faudrait pour étudier cette nappe mettre en place un dispositif électrique d'environ 200 m de long.

Dans la présentation de la construction du spéléodrome on note la phrase suivante « Le 15 décembre de la même année, une arrivée d'eau à 32 mètres de profondeur noie le puits de Clairlieu, les travaux s'arrêtent dans ce puits », on peut donc imaginer que la nappe se situe à cette profondeur.

Conclusion

Ce projet intitulé « étude des écoulements hydrogéologiques sous le plateau de Haye » nous paraissait au début très large. De nombreuses campagnes de mesures et études avaient déjà été faites et nous ne savions pas trop par où commencer. Notre méthodologie fut donc d'étudier l'ensemble des rapports afin de répertorier les connaissances actuelles du spéléodrome, mais également les questions auxquelles aucunes réponses précises n'avaient été formulées.

Suite à cela, nous avons défini nos axes principaux d'investigation. Nous avons donc réfléchi à des nouvelles méthodes de mesures dont certaines ont pu être testé sur le terrain. Nous avons notamment mis en place un calcul de débit par traçage qui nous a permis d'avancer sur nos connaissances du spéléodrome . Nous avons pu mesurer avec une précision relativement importante le débit de la galerie principale, les apports d'eau par mètre de galerie aux endroits où la paroi suintait le plus, et la corrélation entre la pluviométrie et le débit. Cette méthode n'a malheureusement pas permis de déterminer les débits de la galerie supérieure.

Puis, afin de résoudre le mystère sur l'existence ou non d'une nappe dans le Bajocien supérieur qui serait drainé par la galerie supérieur, nous avons sondé le sol avec un quadripôle Schlumberger. Celui-ci a montré l'inexistence de manière quasi certaine d'une seconde nappe. Cependant, la profondeur d'investigation n'investigation du quadripôle n'étant que de 18m, nous n'avons pu déterminer la surface libre de la nappe du Bajocien.

Enfin grâce l'ensemble de nos connaissances géologiques et géographiques du site nous avons réalisé une nouvelle coupe en long de la galerie plus précise et respectant les échelles.

Ainsi notre travail a apporté de nouvelles connaissances mais surtout de nouvelles idées de recherche et de nouvelles méthodes d'investigation qui pourraient être poursuivies afin d'apporter des réponses complémentaires.

Remerciements :

Nous tenons à remercier toutes les personnes qui nous ont aidés au cours de la réalisation de notre projet, notamment :

Pascal Admant qui nous a permis de descendre à trois reprises dans le spéléodrome

Jérôme Sterpenich qui nous a aidé à faire les mesures avec le quadripôle Schlumberger

Pascal Cuxac, Pierre Revol pour les informations transmises concernant le spéléodrome

Ainsi que Véronique MERRIEN-SOUKATCHOFF pour son implication et son soutien dans le projet.