



# Atelier technique

## « Transmission souterraine de données 3D »



*Une action du réseau de métiers CNRS « Milieux Souterrains et Karsts » avec l'appui du Spéléo-Secours Français.*

Réseau de la Cocalière - Ardèche - du 5 au 8 février 2024

---

### Introduction

Depuis une vingtaine d'années, les progrès en matière de relevés 3D en grotte sont importants. Il est désormais possible d'acquérir des données plus facilement et plus rapidement. Mais cela implique toujours la présence humaine pour conduire ces acquisitions. Dans certains sites souterrains, pour des raisons de sécurité des personnels (risque gaz toxiques, risque d'effondrement...) ou pour la sécurité de la cavité (conservation archéologique...), le recours à l'envoi de robots pilotés ou autonomes commence à être envisagé. Des tests de pilotages drones souterrains avec acquisitions photogrammétriques ont d'ailleurs été conduits en ce sens par le réseau MSK en 2022.

Dans le même temps, la transmission des données a fait d'importants progrès. Des stations de mesures sont installées dans des cavités et sont suivies à distance. Mais c'est toujours sur des distances raisonnables ne dépassant pas la centaine de mètres. Le Spéléo-Secours-Français a, quant à lui, développé une compétence importante dans la transmission de données sur des distances importantes, avec support filaire ou en solution sans fil et avec une capacité à déployer ces matériels rapidement.

C'est avec la volonté de croiser ces approches qu'est née l'idée de cet atelier. L'objectif est ici d'acquérir sous terre des données 3D avec deux types de supports (scanner fixe et scanner mobile), préparer ces données en un lot de fichiers, les transmettre depuis le fond de la cavité vers l'extérieur et aussi sur le web. Pour conduire cette opération, 13 opérateurs se sont retrouvés sur le terrain ou en visio en ce début février 2024.

### Liste des participants

- Judicaël Arnaud (Comité départemental de Spéléologie de l'Ardèche, assistance logistique)
- Régis Brun (Comité départemental de Spéléologie de l'Ardèche, assistance logistique)
- Rafaël Chevalier (Spéléo-Secours Français - spécialiste transmission)
- Lina Fabre (UMR EDYTEM - prélèvement hydro-bio – site Peyrejal)
- Michel Fauque (Comité départemental de Spéléologie de l'Ardèche, assistance logistique)
- Christophe Gauchon (UMR EDYTEM, assistance logistique)
- Pat Génuite (Comité départemental de Spéléologie de l'Ardèche, assistance logistique)
- Stéphane Jaillot (UMR EDYTEM - bureau réseau MSK – spécialiste 3D)
- Olivier Lanet (Spéléo-Secours Français - spécialiste transmission)
- Gaël Monvoisin (UMR GEOPS - bureau réseau MSK) – *en visio*
- Fabien Naessens (Univ-Bordeaux - spécialiste transmission)
- Tanguy Racine (Univ-Neuchâtel - spécialiste 3D)
- Alexandre Zappelli (UMR CEREGE - bureau réseau MSK)

## Compte-rendu journalier

### Lundi 5 février 2024

À midi, regroupement des participants et installation à la commanderie de Jalès (Ardèche).

14 h, départ pour le site de Chadouillet, évent de Peyrejal (résurgence temporaire du système, branche nord) : scan fixe d'un tronçon dénivelé de l'évent de Peyrejal ; scan mobile de l'ensemble de la cavité, depuis le siphon terminal jusqu'à l'entrée. Temps passés dans la cavité : 3 heures.

Participants : Christophe Gauchon, Stéphane Jaillet, Tanguy Racine, Alexandre Zappelli, rejoints par Rafaël Chevalier et Olivier Lanet.

En parallèle, Lina Fabre (LENA-EDYTEM) et Judicaël Arnaud (Comité départemental de Spéléologie de l'Ardèche) récupèrent des échantillons (billes d'argile) et un capteur de pression déposés deux mois auparavant dans le siphon terminal de l'évent.

### Mardi 6 février 2024

Matin, réunion à la commanderie de Jalès pour présenter le travail aux différents participants et coordonner les tâches à accomplir sur les deux journées de mardi et mercredi.

11 h, départ pour le site de Chadouillet, grotte de la Côtepatrière (résurgence temporaire du système, branche sud) : visite de reconnaissance d'une partie de la cavité dont la branche de Sauvas ; scan fixe d'un secteur de la cavité : les données de ce scan donneront lieu aux tests de transmission du mercredi 7 février. Scan mobile des 800 premiers mètres de la cavité.

Pendant ce temps, nous ont rejoints Régis Brun, Michel Fauque et Pat Génuite (Comité départemental de Spéléologie de l'Ardèche) qui déroulent 2.000 mètres de fil depuis le véhicule PC à l'extérieur jusque au-delà de la branche Sauvas. De premiers tests de communication phonique sont réalisés pour valider cette ligne.

Temps passés dans la cavité : 5 heures.

Participants : Rafaël Chevalier, Christophe Gauchon, Stéphane Jaillet, Olivier Lanet, Tanguy Racine et Alexandre Zappelli, rejoints en fin de matinée par Michel Fauque et Pat Génuite et dans l'après-midi par Fabien Naessens.

### Mercredi 7 février

Matin, mise en forme des données issues du laser scan fixe (35 scènes) effectuées la veille. Les données de transmission porteront sur deux fichiers « un fichier léger » correspondant à une seule scène (9,3 Mo) et « un fichier lourd » correspondant au dossier zippé des 35 scènes (303 Mo).

11 h, départ pour le site de Chadouillet, grotte de la Côtepatrière : poursuite de la reconnaissance jusqu'au deuxième lac Gaupillat ; cinq essais de transmission à 2.000, 1.500, 1.000, 500 et 250 mètres du véhicule PC. Les essais portent systématiquement sur l'envoi des fichiers décrits ci-dessus dans différentes configurations (cf. compte rendu technique) ; et aussi sur des réceptions-envois de méls, et sur l'établissement d'une conférence zoom avec un membre du réseau (Gaël).

Au fur et à mesure que les essais sont réalisés, R. Brun, M. Fauque et P. Génuite rembobinent les 2.000 mètres de fil déroulés la veille.

Temps passés dans la cavité : 4 heures.

Participants : Rafaël Chevalier, Christophe Gauchon, Stéphane Jaillet, Olivier Lanet, Tanguy Racine, Alexandre Zappelli, Fabien Naessens, Régis Brun, Michel Fauque et Pat Genuite.

Soirée : à la commanderie de Jalès, retour sur les manipulations effectuées lors de cet atelier, répartition des tâches en vue de la préparation du compte rendu de cet atelier.

### Jeudi 8 février

Rangement des chambres, de la cuisine et dispersion.

Participants : Stéphane Jaillet, Fabien Naessens.

## Résultats

Nous présentons ci-dessous le protocole mis en œuvre et les premiers résultats.

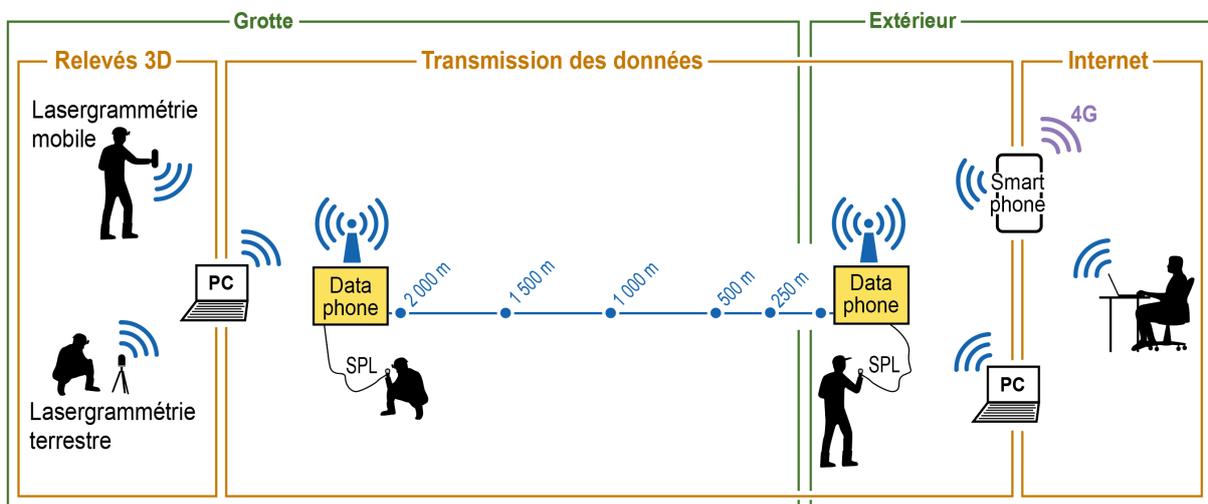


Figure 1 : Protocole mis en œuvre dans le cadre des tests réalisés lors de l'atelier transmission souterraine de données 3D.

Afin de réaliser ces tests de transmissions, représentés ici figure 1, nous avons pu compter sur l'expertise et le soutien à la fois technique et matériels des membres du Spéléo-secours Français représenté lors de cette manipe par Rafaël Chevalier et Olivier Lanet, spécialistes des techniques de transmissions souterraines.

Le matériel utilisé était le suivant :

- 2km de fil téléphonique monobrin cuivre de 5/10<sup>ème</sup>, conditionné en 4 bobines de 500 mètres chacune.
- 2 boîtiers Data Phone du Spéléo-Secours Français :
  - Un fixe en surface réalisant une interface internet par partage de connexion 4G d'un téléphone.
  - Un mobile sous terre, permettant les tests à différentes distances.
- 2 téléphones SPL05 (SSF) afin de synchroniser les tests avec l'opérateur de surface

Les boîtiers Data Phone du Spéléo-Secours Français, sont présentés ci-dessous, dans la figure 2.



Figure 2 : Data Phone du Spéléo-Secours Français, à l'extérieur et à l'intérieur de la cavité

Les différentes stations de test de transmission entre la base et le dernier point à 2000 mètres sont représentées ci-dessous figure 3 ainsi que le tableau 1 donnant les premiers résultats de ces essais.

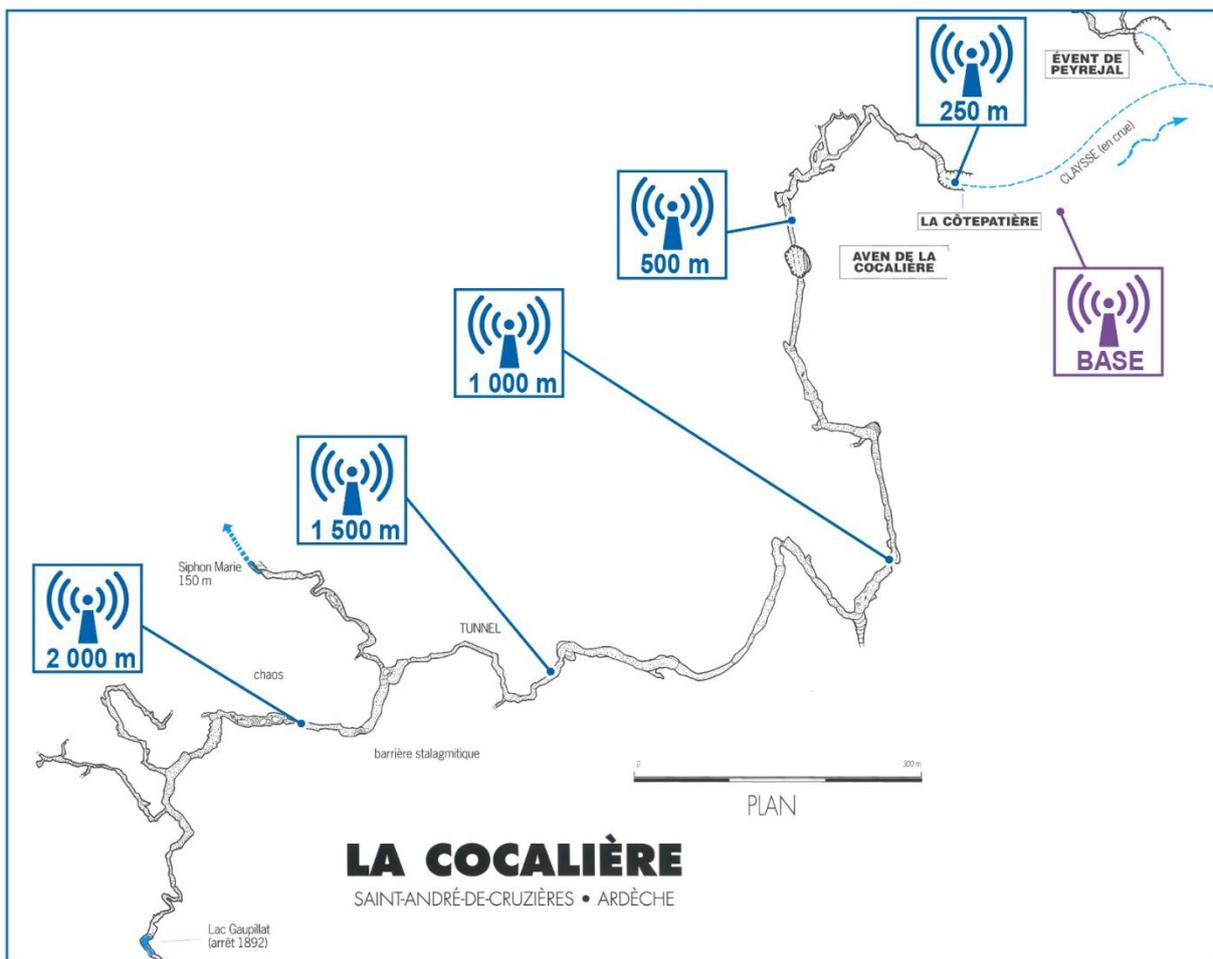


Figure 3 : Localisation des cinq stations souterraines, respectivement à 2000, 1500, 1000, 500 et 250 mètres et de la base.

DATE	Distance (m)	Débit 4G Téléphone surface		4G via Boitier spéléo Surface		Renater via Boitier spéléo Surface	Réseau Local via Boitier spéléo Surface	Commentaire
		Descendant (Mbit/s)	Montant (Mbit/s)	Descendant (Mbit/s)	Montant (Mbit/s)	Montant (Mbit/s)	Montant (Mbit/s)	
07/02/2024 09:19	0						23.040	Répertoire réseau (test)
07/02/2024 09:19	0						34.000	Répertoire réseau (test)
07/02/2024 09:56	0	75.1	10.7					Téléphone Fabien (Speedtest) 4G
07/02/2024 10:50	2000						4.650	Répertoire réseau (fichier 9.3 Mo)
07/02/2024 10:53	2000						7.647	Répertoire réseau (fichier 303 Mo)
07/02/2024 10:59	2000					1.653		Renater
07/02/2024 11:01	2000			11	2.95			Téléphone Fabien (Speedtest)
07/02/2024 11:44	1500			10.3	1.55			Téléphone Fabien (Speedtest)
07/02/2024 11:45	1500			4.75	1.2			Téléphone Fabien (Speedtest)
07/02/2024 11:48	1500			3.75	0.18			Téléphone Fabien (Speedtest)
07/02/2024 11:49	1500			10	0.74			Téléphone Fabien (Speedtest)
07/02/2024 11:50	1500						9.987	Répertoire réseau (fichier 9.3 Mo)
07/02/2024 11:53	1500						12.120	Répertoire réseau (fichier 303 Mo)
07/02/2024 11:59	1500					1.730		Renater
07/02/2024 12:58	1000			0.81	0.96			Téléphone Fabien (Speedtest)
07/02/2024 12:59	1000			10.3	0.8			Téléphone Fabien (Speedtest)
07/02/2024 13:00	1000			1.04	0.45			Téléphone Fabien (Speedtest)
07/02/2024 13:03	1000			9.08	1.58			Téléphone Fabien (Speedtest)
07/02/2024 13:12	1000			6.58	0.57			Téléphone Fabien (Speedtest)
07/02/2024 13:03	1000						18.600	Répertoire réseau (fichier 9.3 Mo)
07/02/2024 13:06	1000						24.990	Répertoire réseau (fichier 303 Mo)
07/02/2024 13:07	1000					1.033		Renater
07/02/2024 13:10	1000					0.489		Renater bis
07/02/2024 13:42	500						37.200	Répertoire réseau (fichier 9.3 Mo)
07/02/2024 13:44	500						57.714	Répertoire réseau (fichier 303 Mo)
07/02/2024 13:47	500					0.954		Renater
07/02/2024 14:02	500			0.18	0.47			Téléphone Fabien (Speedtest)
07/02/2024 14:38	250			9.84	1.16			Téléphone Fabien (Speedtest)
07/02/2024 14:51	250			6.89	0.76			Téléphone Fabien (Speedtest)
07/02/2024 15:08	250	3.94	0.76					Téléphone Fabien (Speedtest) / réseau 4G faible
07/02/2024 15:09	250			5.1	1.27			Téléphone Fabien (Speedtest)
07/02/2024 15:10	250						29.760	Répertoire réseau (fichier 9.3 Mo)
07/02/2024 15:12	250						73.455	Répertoire réseau (fichier 303 Mo)
07/02/2024 15:14	250					1.653		Renater
07/02/2024 15:33	0	1.64	3.01					Téléphone Fabien (Speedtest) 5G
07/02/2024 15:33	0	2.94	7.68					Téléphone Fabien (Speedtest) 5G
07/02/2024 15:35	0			23.6	1.75			Téléphone Fabien (Speedtest) Directement sur boitier Spéléo surface
07/02/2024 15:35	0			9.19	0.73			Téléphone Fabien (Speedtest) Directement sur boitier Spéléo surface

Tableau 1 : Premiers résultats des tests de débits en fonction de la distance

En récupérant les données théoriques de débits du fabricant des modules VDSL utilisé, ainsi que nos tests de débits, nous avons pu éditer les graphiques présentés dans la figure 4.

L'analyse de la figure 4 apporte les informations suivantes :

**1** - Les débits théoriques de téléchargement (Download) et de téléversement (Upload), représentés en bleu et en orange respectivement sur la première partie du graphique, fournis par le fabricant en mode symétrique (pour favoriser le upload) à 8dB, permet d'identifier 2 zones de fonctionnement :

Une première zone d'atténuation quasi-linéaire jusqu'à 1000m -142 kb/s/m,

Une pente moins prononcée (voir exponentielle décroissante) de -40 kb/s jusqu'à 1400m.

**2** - Les points rouges indiquent les débits mesurés sur le réseau local lors du transfert du fichier de 9.3Mo et 303Mo sur l'ordinateur à l'extrémité de la ligne en surface.

Comme pour la courbe théorique on devine deux zones de pente différente :

Une première zone d'atténuation quasi-linéaire jusqu'à 1000m d'atténuation -65,6 kb/s/m,

Puis une pente moins prononcée de -16,6 kb/s/m,

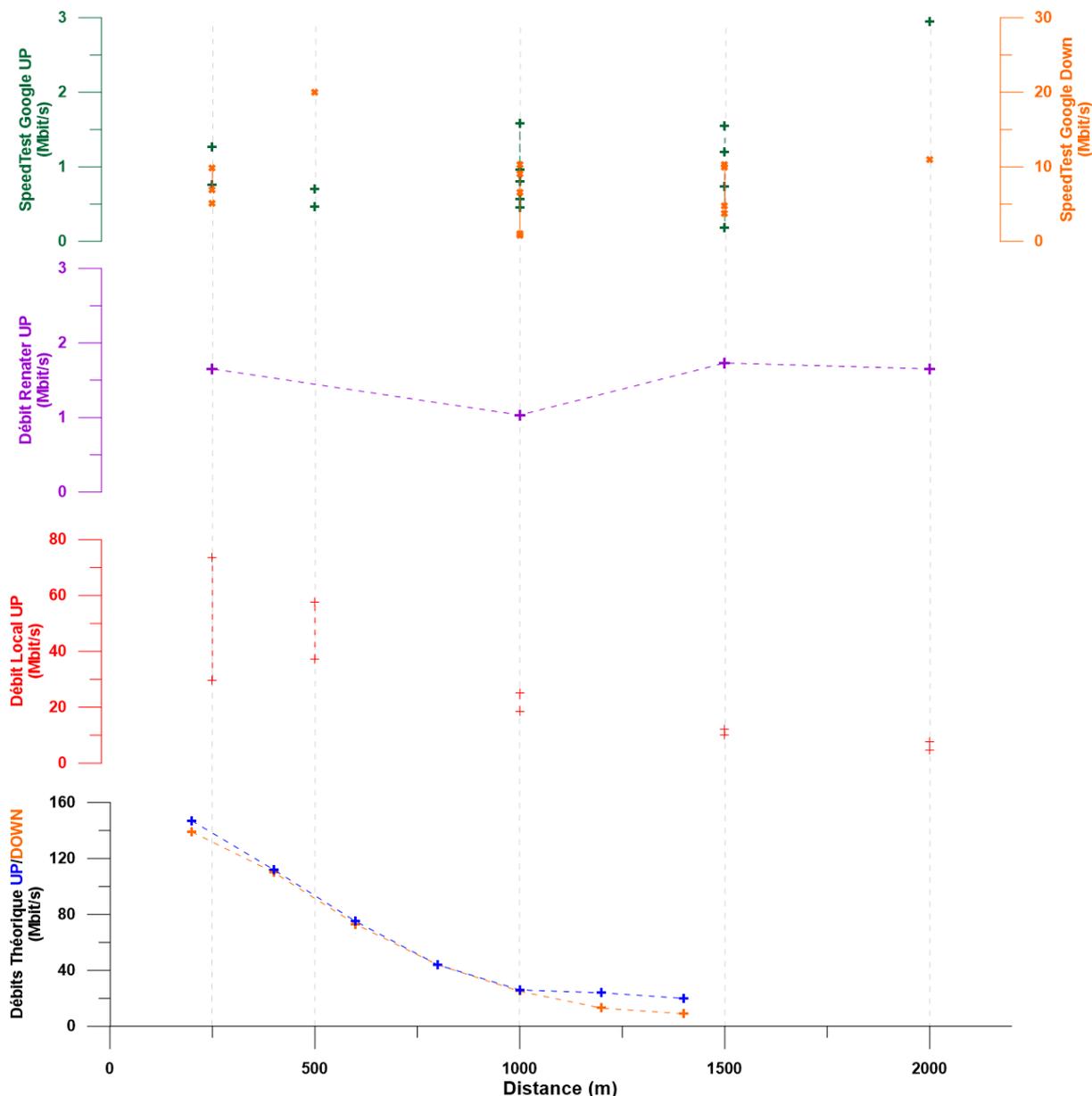


Figure 4 : Evolution des débits en fonction de la distance

Étonnamment les débits à faible distance sont plus faibles que prévu théoriquement, mais comme l’atténuation est également plus faible, les performances deviennent identiques à partir de 1000 mètres, voire meilleures par la suite.

Des débits de 4 à 7 Mbit/s ont pu être mesurés à 2000m en Upload, ce qui reste très bon au vu de la longueur de ligne.

On constate que l’on peut dépasser la limite de 1400m donnée par le constructeur puisqu’on a réussi à aller à 2km. Compte tenu de ces résultats on peut même envisager de dépasser les 2km lors d’un prochain test. Constructeur du boîtier Ethernet to VDSL2 Converter : <https://www.planet.com.tw/en/product/vc-231g>

**3** - Les tests de mesure de débit via l’Upload d’un fichier de 9.3 Mo sur le site de Renater, donnent un débit quasi constant en fonction de la longueur de ligne de 0.95 à 1.73 Mbit/s.

Il en est de même pour les tests d'Upload depuis un SpeedTest (Google), courbe verte, réalisé pour chaque station, affichant des débits d'upload en moyenne de 1.04 Mbit/s.

Les mesures de débits descendants, représentées par la courbe orange des SpeedTest, donnent des résultats très disparates d'un essai à l'autre, avec parfois un facteur 10, mais présentent tout de même un débit supérieur à 5 Mbit/s la plupart du temps.

Une explication pour ces plus faibles résultats par rapport aux tests effectués sur le réseau local serait que la connexion 4G du téléphone n'est pas très bonne sur ce site isolé de l'Ardèche. Ce peut être un problème d'isolement du téléphone, d'absence de relais, de zone non dégagée.

Une autre explication pourrait venir du routeur WiFi de surface qui gère à la fois le réseau local et la passerelle vers Internet qui serait à ses limites. Des tests plus poussés vont être réalisés pour vérifier cette hypothèse.

## Conclusion et perspective

Ce système de transmission filaire de données sous terre a donné entière satisfaction et permet un débit d'upload (en réseau local) de 57.7Mbit/s à 500m, 24.9 Mbit/s à 1000m et de 7.64 Mbit/s à 2000m.

Le débit d'upload avec la passerelle sur Internet de ~1 Mb/s quelle que soit la distance a permis :

- de transmettre un fichier de 9.3Mo en 45s, sur un service d'échange de fichier,
- de réaliser des visioconférence Zoom et WhatsApp, de bonne qualité à 2000m.

Le goulot d'étranglement est en partie lié au partage de connexion du téléphone 4G ; pour les prochains tests il serait pertinent d'utiliser une connexion Internet par satellite. Il n'a pas été testé le débit en fonction de la position du fil dans la galerie (contact sol, contact parois, zone humide). Ce sera à envisager dans le futur.

Sur les deux jours de test, nous avons réussi à passer plus de 4Go de données de la grotte au réseau Internet, tous tests confondus.

Au vu de la rapidité et simplicité de mise en place du dispositif, de futurs tests de communication entre 2 points supérieur à 2000m pourraient être envisagés dans cette thématique de transfert de fichiers.

Lors de nos nombreux échanges, il a été suggéré de développer une solution de communication sans fil autonome adaptée aux faibles débits, telle que la métrologie ou l'instrumentation, en utilisant des équipements tels que le TPS Pimprenelle ou la Balise magnétique. Cette initiative pourrait être menée en collaboration entre les équipes du Spéléo-Secours Français et du réseau MSK, et testée dans un futur proche.

## Remerciements

Nous remercions pour leur soutien à cette opération : la MITI CNRS (Mission pour les Initiatives Transverses et Interdisciplinaires), le laboratoire Archeorient et en particulier l'antenne de Jalès et enfin le CDS07, comité départemental de Spéléologie de l'Ardèche.