
Première estimation du pourcentage d'altération par fantômisation dans les carbonates à l'aide de méthodes géophysiques

Lise DURAND

Encadrants : Cédric Champollion & Philippe Vernant

Soutenue le 3 juin 2022 devant un jury composé de :

S. Gauthier (Rapporteuse)

P. Antonio (Rapporteur)

C. Garcia-Estève

S. Mazzotti

Résumé

La ressource en eau est l'un des enjeux de notre siècle. Les massifs karstiques sont des zones hétérogènes, ils constituent des réservoirs en eau. Il existe dans le karst un processus d'altération nommé la fantômisiation (Quinif., 2010). Ce processus d'altération crée des zones plus poreuses dans la matrice, nommées altérites ou fantômes de roche. Ces poches, par leur porosité d'environ 40%, sont susceptibles de contenir de l'eau. Le volume de ces zones de fantômes est mal contraint.

Le massif du Larzac est un massif karstique situé dans le sud de la France, à ses pieds se développent des agglomérations utilisant des sources provenant de roches fantômées. Les zones d'études se situent sur les deux principales lithologies du Larzac, le calcaire et la dolomie. La lithologie joue-t-elle un rôle sur la géométrie et le pourcentage de zones fantômées ? Pour avoir une première estimation du pourcentage de fantômes dans les carbonates, des données de géophysique seront utilisées.

La sismique passive a été utilisée en calculant le H/V, elle n'a pas permis de mettre en évidence les zones de fantômes. La méthode l'Electrical Resistivity Tomography ou ERT a imagé des zones fantômes. La variation de porosité entre le fantôme et la matrice les différencie, le fantôme est détecté comme des zones de faibles résistivités. L'utilisation de modèles directs permet de réaliser une première estimation du volume de poches altérées.

Le pourcentage de zones fantômées n'est pas identique selon la lithologie et la profondeur d'investigation. Le volume de fantômes dans la dolomie est de 5% alors que dans le calcaire le volume varie entre 10 et 20 %. La stratification de la lithologie a une influence sur les géométries des zones de fantômes. Dans le cas de la dolomie non stratifiée, la géométrie est verticale. Pour le calcaire stratifié la géométrie des zones fantômes est horizontale.

*Master géoscience, aléas géologiques : observations, mesures et modélisation, Université Montpellier, Pl. E. Bataillon, Montpellier, Cedex 5, France

**Stage effectué au laboratoire géoscience Montpellier

Table des matières

1 Introduction	p5
2 Contexte	p6
2.1 La fantômisat	p6
2.2 La fantômisat sur le massif du Larzac.....	p .7
2.2.a Zone d'étude en contexte calcaire.....	p.9
2.2.b Zone d'étude en contexte dolomitique.....	p.10
3 Méthodes géophysiques	p.13
3.1 Sismique.....	p.13
3.2 Electrique	p.13
4 Résultats géophysiques et discussions	p.15
4.1 Sismique passive.....	p.15
4.2 Electrique.....	p.17
4.2.a Zone d'étude en contexte dolomitique.....	p.17
4.2.b Zone d'étude en contexte calcaire - Aven du fonctionnaire.....	p.19
4.2.c Zone d'étude en contexte calcaire - Aven du cochon.....	p.21
5 Comparaison et interprétation	p.24
5.1 Géométrie de la roche fantôme pour chaque lithologie.....	p.24
5.2 Estimation du pourcentage de fantômes et lien avec l'hydrogéologie.....	p.26
5.2.a Calcul du pourcentage de fantômes et de vide.....	p.26
5.2.b Application des résultats à l'hydrogéologie.....	p.27
5.2.c Points à approfondir pour affiner les résultats.....	p.28
6 Conclusions et perspectives	p.29
Remerciements	p.29
Bibliographie	p.30
Table des taches	p.31
Annexes	p.32

1 Introduction

La ressource en eau est l'un des enjeux de notre siècle. Les massifs karstiques sont des zones hétérogènes, ils constituent des réservoirs en eau complexes. Il existe dans le karst un processus d'altération nommé la fantômisation (Quinif., 2010). Ce processus d'altération crée des zones plus poreuses dans la matrice, nommées altérites ou fantômes de roche. Ces poches, grâce à leur porosité d'environ 40%, sont susceptibles de contenir de l'eau. Le volume de ces zones dites fantômes est mal contraint.

Le massif du Larzac est un massif karstique. Il est situé dans le sud de la France à 40 km à vol d'oiseau au nord de la ville de Montpellier, à ses pieds se développent des agglomérations utilisant des sources provenant de zones de fantômes.

Le Larzac est composé en grande partie de calcaire et de dolomie, les sites étudiés sont sur ces deux lithologies. La lithologie joue-t-elle un rôle sur la géométrie et le pourcentage de zones altérées ? Pour avoir une première estimation du pourcentage de fantômes dans les carbonates, des données de géophysique seront utilisées, en particulier des méthodes électrique et de sismique passive



Figure 1 : Bord du plateau du Larzac, couloirs d'altération sub-verticaux dans la dolomie.

2 Contexte

Les roches fantômes par leurs porosités 40% (Quinif., 2010) jouent un rôle dans le stockage en eau. Le processus de fantômisation est un processus d'altération qui a formé le Larzac tel que l'on le voit aujourd'hui. Sur les zones d'études sélectionnées, la fantômisation a laissé des traces visibles, elles sont propices pour réaliser une première estimation du pourcentage de fantôme.

2.1 La fantômisation

La fantômisation est un processus d'altération (Quinif., 2010) affectant les massifs de calcaire et de dolomie, s'apparentant au processus d'arénisation dans le granite. Ce processus permet de créer dans une matrice des poches d'altération. Ces poches sont composées de sable ou d'argiles selon la matrice de départ. Si elles sont vidées des matériaux qui les composent, il reste une cavité dans la matrice (figure 2 ci-dessous).



Figure 2 : Image extraite de Quinif et al., 2014. Poche d'altération partiellement vidée dans une matrice carbonatée.

La fantômisation commence lorsque le massif est saturé en eau. L'altération va se produire sur des zones de faiblesses, principalement dans les zones fracturées et les joints stratigraphiques. L'eau dissout les éléments les plus solubles, les éléments insolubles restent sur place. Ils se nomment altérites résiduelles ou fantômes de roche. Cette altérite va devenir plus poreuse que la roche saine 40%+/- 5% (Quinif., 2010). Cette porosité est due aux vides microscopiques laissés par les éléments dissous. Tant que le milieu est saturé, il n'y a pas de variation du volume, la stratification reste continue avec la matrice. Le temps de formation d'une poche d'altérite est très mal contraint sur l'échelle des temps géologiques.

Lorsque la zone n'est plus saturée, les vides se tassent et laissent place à un vide macroscopique au sommet de la poche altérée. Ce système reste en place jusqu'à ce qu'apparaisse un potentiel hydrologique qui permet à l'eau d'emporter l'altérite

résiduelle pour laisser place à une cavité. Ce changement de potentiel se produit de manière naturelle ; surrection liée à la tectonique ou au creusement de vallée (Vernant et al., 2022), ou anthropique, creusement de carrière (Quinif., 2010). La vidange du fantôme se produit sur quelques années mais tant que la poche d'altérites n'est pas en connexion avec le réseau hydrologique, l'altérite résiduelle reste dans la matrice (figure 3).

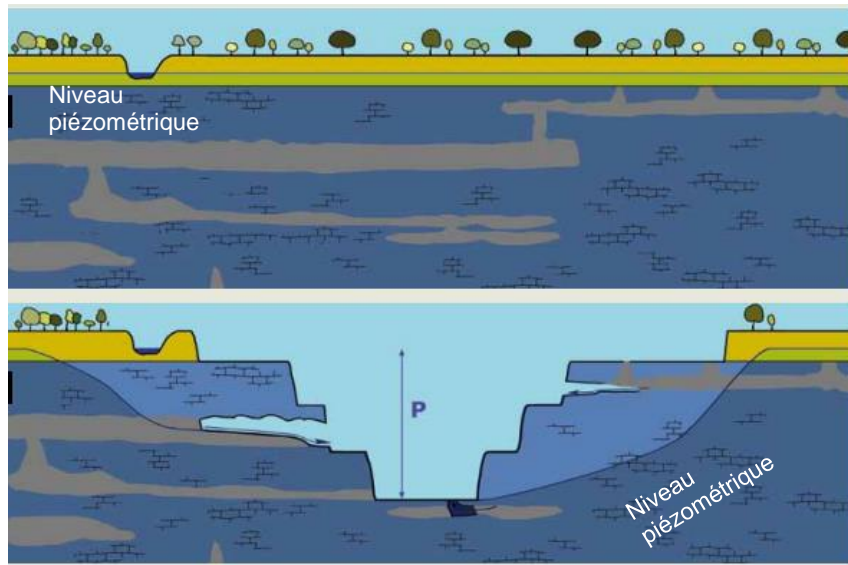


Figure 3 : Vidange de zones fantômes dans une carrière modifié d'après Quinif et al., 2014.

2.2 La fantômisation sur le massif du Larzac

Le massif du Larzac se situe dans le sud de la France à 40 km à vol d'oiseau au nord-ouest de la ville de Montpellier. Ce massif est composé principalement de calcaire et de dolomie. Pour les trois zones d'étude sélectionnées, deux sont dans un contexte calcaire et une dans un contexte dolomitique (figure ci-dessous).

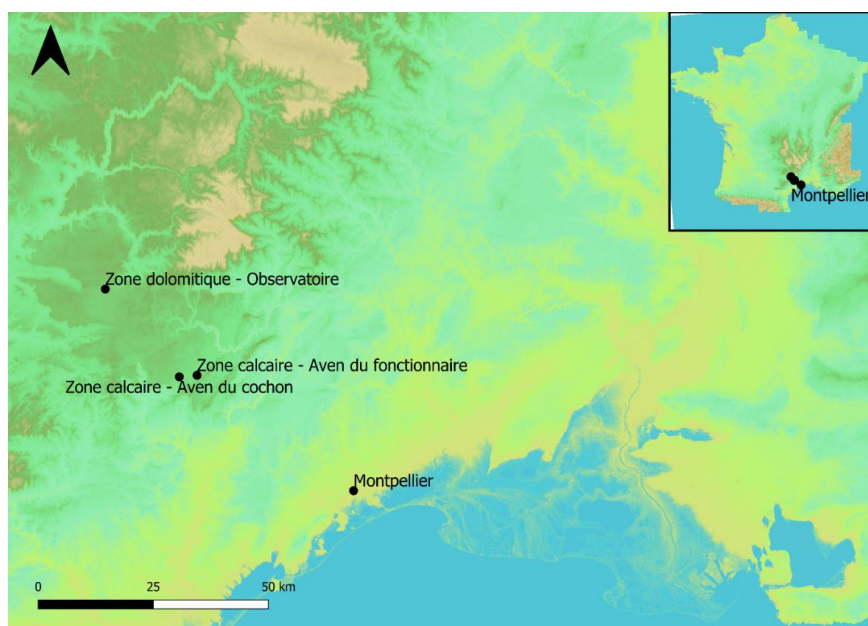


Figure 4 : Localisation des sites d'études.

Les zones fantômées sur le Larzac se développent en particulier dans le jurassique. Le processus de fantômisaiton peut s'initier dès le début de la période jurassique, entre 205 et 135 Ma. A la fin du crétacé débute la compression pyrénéo-provençale jusqu'à l'oligocène où l'on rentre dans une phase de distension (Bruxelles., 2001). La zone subit des régimes tectoniques différents qui fracturent la roche, favorisant le développement de fantômes de roches. Aux alentours de 6 Ma le bloc cévenol commence à se soulever (Macles., 2020). L'incision de la zone est tout d'abord faible (Ambert., 1984), puis devient plus importante au quaternaire (Ambert., 1984, Bruxelles 2001). Cette incision a pour conséquences de descendre le niveau de base et d'engendrer la vidange de certaines zones fantômées (Vernant et al., 2022).

La période au cours de laquelle le fantôme sur le Larzac a pu se créer s'étend du jurassique à l'actuel. La vidange des fantômes est très récente. Elle a dû commencer lors de l'incision des reliefs au quaternaire.

Sur le Larzac des poches de fantômes ont été vidangées (Vernant et al., 2022), et ont formé des cavités comme celles présentes sur les zones d'étude. Dans ces cavités, des zones de fantômes sont encore visibles (figure 5 ci-dessous). Les cavités sur les zones d'études permettent de savoir que des roches fantômes sont encore en place mais elles n'ont pas de rôle sur le stockage en eau. Ce sont les roches fantômes qui nous intéresse.



Figure 5 : Zone fantôme dans l'aven du cochon.

2. 2.a Zone d'étude en contexte calcaire

Dans la zone calcaire, deux sites sont étudiés séparément, le karst étant un milieu très hétérogène, la comparaison entre les deux zones permettra d'affiner le résultat. Elles sont situées à une distance 4 km, avec une différence d'altitude de 50 m environ. Grâce à leur proximité on suppose qu'ils ont subi les mêmes processus géodynamiques.

Sur chacun des sites se trouve un aven, l'aven du fonctionnaire et l'aven du cochon. Ils sont formés par le processus de fantômisiation, à l'intérieur des cavités se trouvent des poches de fantômes (figure 6 ci-dessous).



Figure 6 : Roche calcaire prélevée dans l'aven du cochon.

Les deux cavités se développent avec trois niveaux subhorizontaux orientés NE-SO comme la fracturation (annexe 1). En superposant les coupes des deux cavités, il n'est pas évident de relier les niveaux des avens entre eux (annexe 2). Ces avens s'ouvrent dans de l'oxfordien ; celui-ci est composé de calcaire stratifié de faible pendage et de quelques îlots de dolomie recristallisés. L'aven du cochon d'une longueur de 3,7 km se déploie seulement sur cette lithologie. Le fonctionnaire plus bas en altitude, traverse cette lithologie, le dernier étage se trouve dans de la dolomie du bathonien (figure 7 ci-dessous).

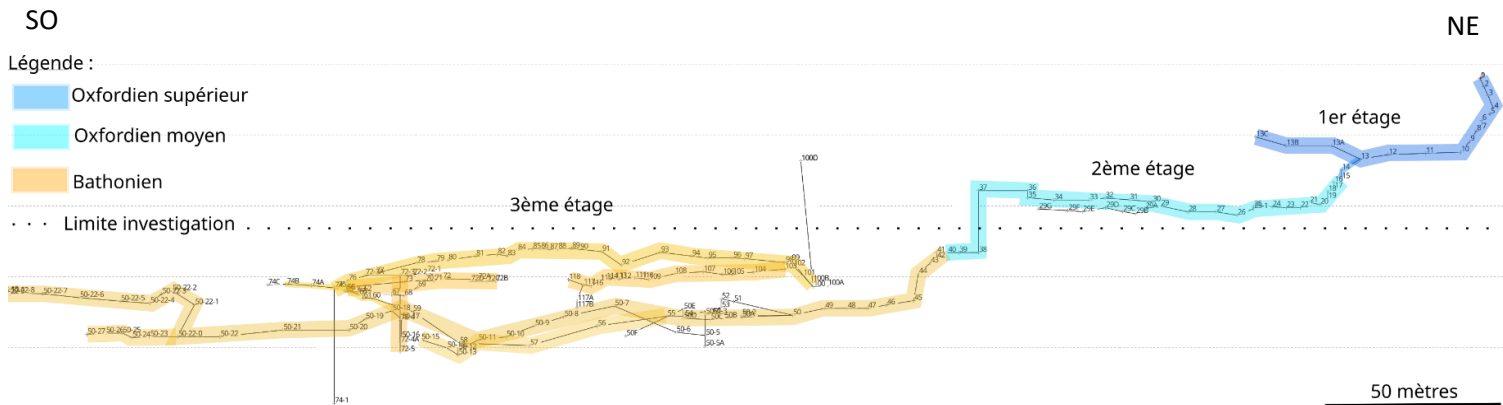


Figure 7 : Coupe du fonctionnaire modifiée d'après P. Vernant.

La limite d'investigation géophysique ne pouvant aller au-delà de 60 m de profondeur, les mesures sont réalisées seulement dans la zone calcaire.

2.2.b Zone d'étude en contexte dolomitique

La zone d'étude choisie s'étend essentiellement sur de la dolomie du bathonien plus ou moins altérée. En surface cette dolomie ne montre pas de stratification évidente. Dans le cas de la dolomie le fantôme de roche est du sable dolomitique nommé grisou (figure 8 ci-dessous).

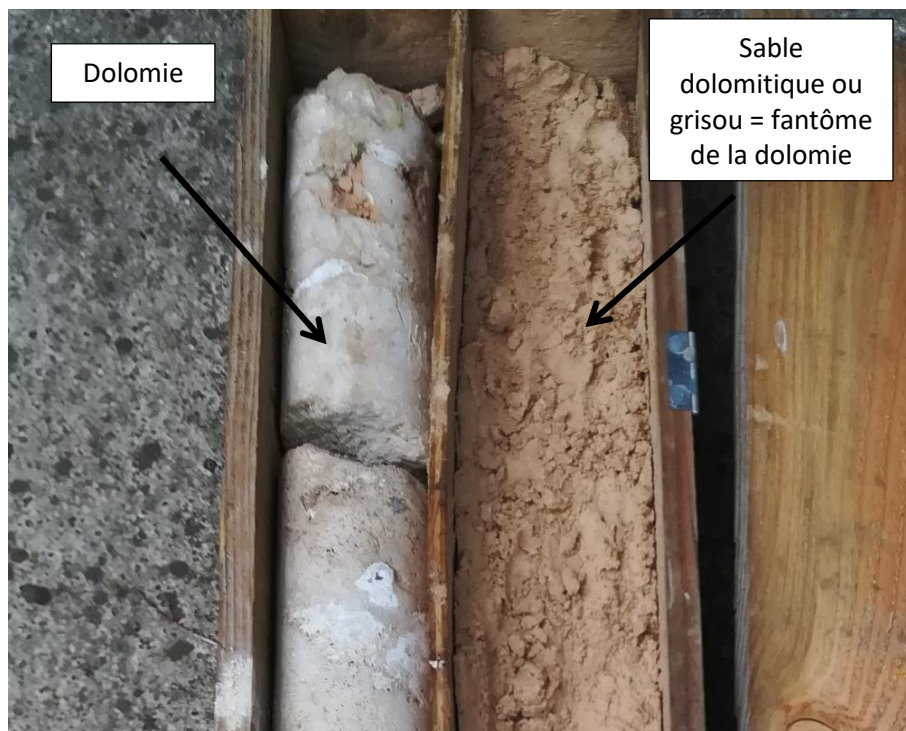


Figure 8 : Carotte dans de la dolomie.

Sur la zone d'étude se trouve l'observatoire du Larzac créé en 2011. L'observatoire est équipé d'appareils permanents qui permettent de récolter des données hydrologiques sur le bassin versant du Durzon. Le site accueille également diverses campagnes de mesures dont celles de R. Valois 2011, R. Bayer et al. 2011, et P.Y. Galibert 2012. Cette zone ayant de nombreux appareils de mesures permet d'avoir des éléments de comparaison et certaines de ces données brutes seront traitées par la suite.

Le site est équipé de plusieurs forages. L'un des forage traverse six mètres de grisou avant d'atteindre la dolomie. Les trois autres traversent essentiellement de la dolomie, ils enregistrent des niveaux piézométriques différents alors qu'ils se situent à moins d'une dizaine de mètres les uns des autres (figure 9).

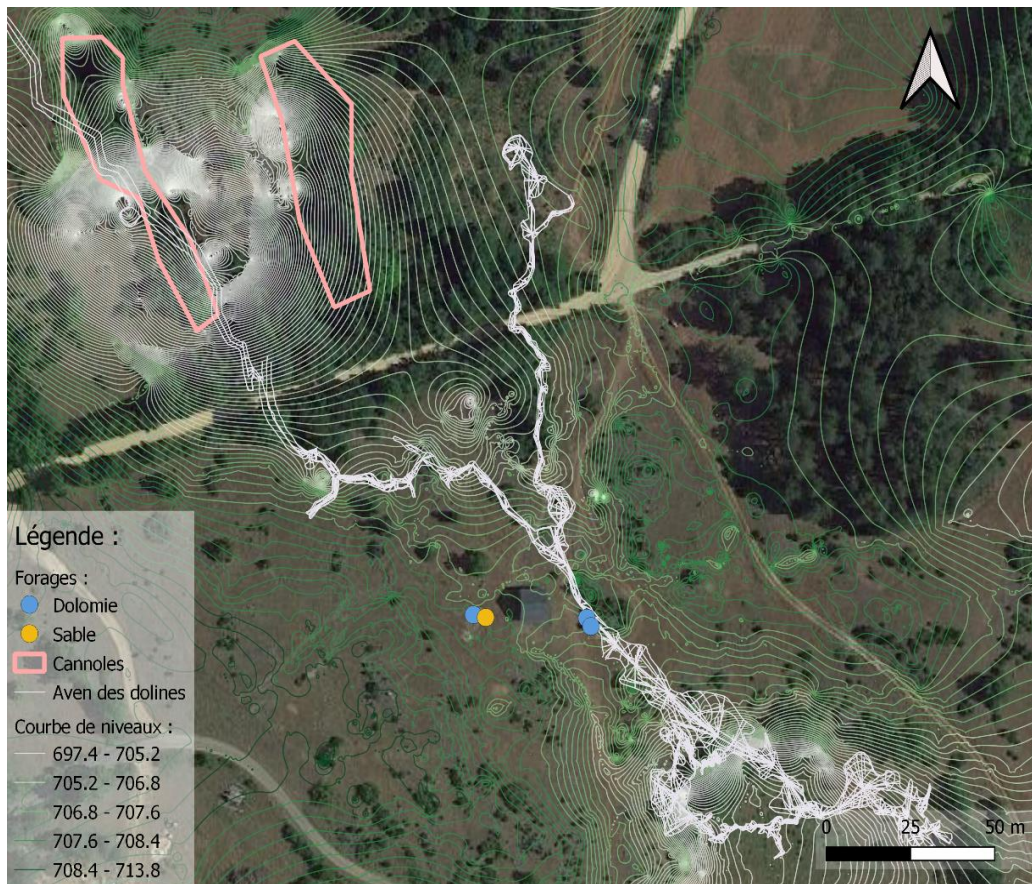


Figure 9 : Carte de l'observatoire avec les forages ainsi que les indices de zones fantômisées en surface et en profondeur.

En surface, selon l'axe NE-SO se trouvent des cannoles, ce sont des creux d'environ 10 mètres de profondeur sur 20 de long dans la dolomie. Au fond se trouve du sable dans lequel les arbres poussent. Les parois de dolomie rappellent celles des aven fantômisés (figure 10). En profondeur la zone est traversée dans le même axe par l'aven des dolines.

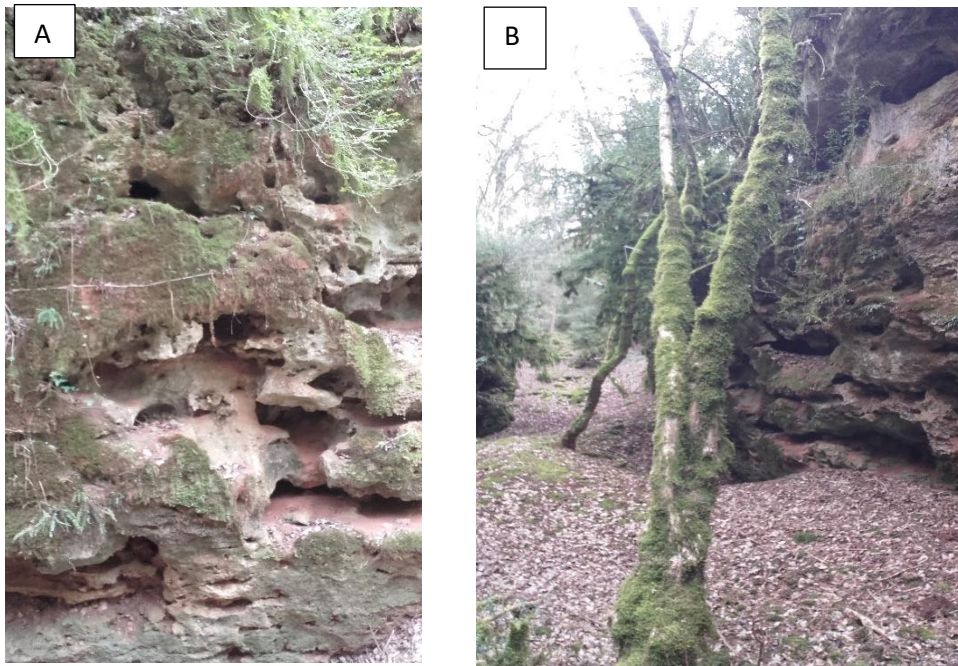


Figure 10 : A) parois de la cannole en dolomie fantômisée, B) vu à l'intérieur de la cannole au centre sous les feuilles présence de sable dolomitique sur chaque côté des parois de dolomie fantômisée.

L'observation à l'aide des forages permet d'avoir une idée du sous-sol uniquement pour des points ponctuels. La variabilité de la zone étant très importante, les méthodes géophysiques sont utilisées pour apporter une information sur des zones étendues.

3 Méthodes géophysiques

Le fantôme de roche a des propriétés géophysiques différentes de la matrice, principalement la porosité mais aussi la saturation en eau. Les méthodes géophysiques sismique et électrique sont sensibles à ces variations et permettront d'avoir une première imagerie de la présence de fantômes.

3.1 Sismique

La vitesse de propagation des ondes sismiques dépend de la rigidité du milieu. Le fantôme est une zone plus poreuse que l'encaissant, les zones fantômes vont être imagées par des zones de vitesses lentes.

La sismique active consiste à générer une onde et la sismique passive utilise le bruit naturel et anthropique.

Pour la sismique active, l'une des méthodes se focalise sur les premières arrivées des ondes, elle se nomme la sismique réfraction. Cette méthode est utilisée pour chercher des couches subhorizontales. Sachant que les zones de fantômes prennent diverses formes, seule la sismique passive est utilisée. Pour utiliser cette méthode, la source de bruit doit être la plus homogène possible. Les appareils de mesures, sismomètres et trominos dans notre cas, enregistrent selon trois composantes, l'une verticale et deux horizontales. La méthode utilisée est le H/V. Cette méthode consiste à diviser les composantes horizontales par la composante verticale pour obtenir une amplification des zones lentes (Bard.,2004).

L'analyse de données H/V sur des zones karstiques a déjà été réalisée (Raines et al., 2015). La présence de forages sur le site de l'observatoire permet de connaître le signal de la dolomie et du fantôme de dolomie. Ces points H/V vont servir de référence.

3.2 Electrique

La méthode utilisée est l'Electrical Resistivity Tomography ou ERT. Elle consiste à injecter du courant électrique dans le sol et à mesurer la variation de potentiel pour estimer la résistivité électrique. La résistivité est l'inverse de la conductivité du milieu : plus la résistivité est importante moins le milieu est conducteur. Cette résistivité varie en fonction de la porosité, la saturation en eau et la chimie du milieu (Bechtel et al., 2007). Sachant que le fantôme a une porosité différente de l'encaissant, cette méthode permet de détecter sa présence.

Il existe différentes méthodes d'acquisition, la différence entre ces méthodes est due à la disposition des électrodes qui injectent le courant et qui mesurent le potentiel. La méthode dipôle-dipôle permet d'avoir une meilleure résolution pour des géométries horizontales tandis que la méthode Wenner-Schlumberger permet d'avoir une meilleure résolution en verticale (annexe 3). Dans le cas des fantômes, les géométries sont diverses, par la suite les méthodes seront toujours combinées.

La résistivité enregistrée le long du profil est la résistivité apparente, elle est la « moyenne » de la résistivité de tous les milieux traversés. A partir des résistivités apparentes, il est possible de reconstituer la variation des résistivités du sous-sol, ce processus se nomme une inversion. Le résultat de l'inversion est non unique.

Un modèle direct permet de créer une géométrie du sous-sol ainsi que la résistivité associée puis de simuler des données. Par la suite, on peut visualiser le résultat de l'inversion. Par exemple la géométrie créée (figure 11a ci-dessous) représente une colonne de fantômes de résistivité de 1000 ohm.m dans un encaissant de 10 000 ohm.m

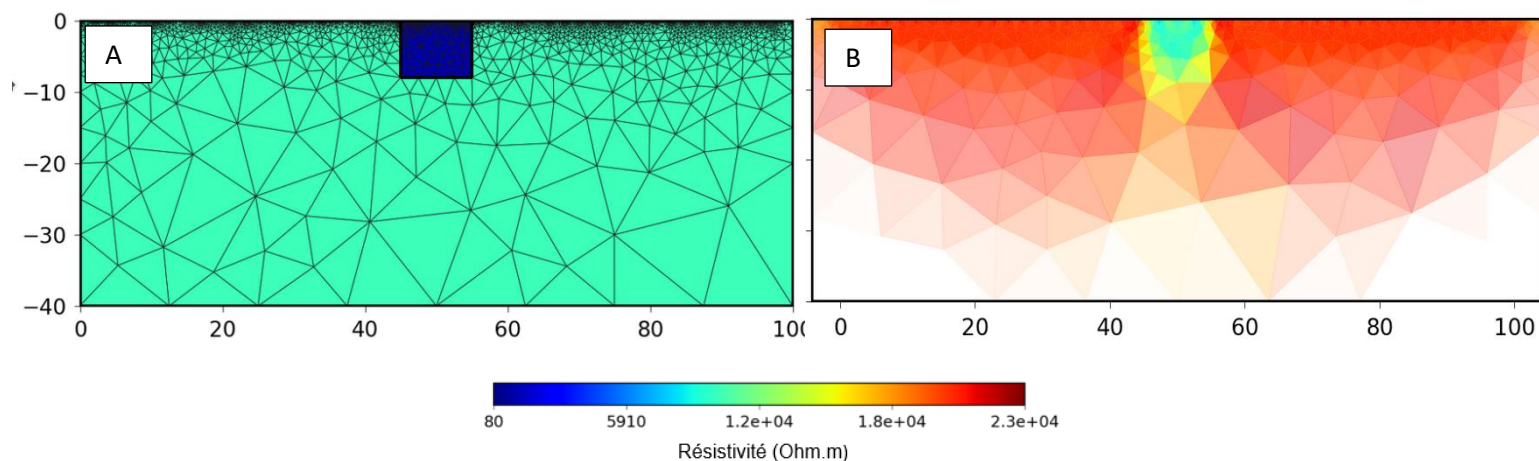


Figure 11 : Modèle direct, A) géométrie et résistivité, B) résultat de l'inversion.

Dans le cas du modèle direct, la géométrie initiale est connue (figure 11A), permettant de comparer avec le résultat de l'inversion (figure 11B). Dans cet exemple, le résultat de l'inversion permet d'imager la colonne de fantômes mais la géométrie n'est pas identique et les résistivités sont très différentes. L'encaissant initial est de 10 000 ohm.m, suite à l'inversion il est aux alentours 20 000 ohm.m. Il existe des différences entre le résultat de l'inversion et la géométrie de départ.

Au cours de ce travail, le résultat de l'inversion des données acquises sur le terrain n'est pas utilisé directement. L'interprétation de la géométrie du sous-sol passe par l'utilisation de modèles directs. On cherche à ce que les inversions des données de terrain et du modèle direct soit similaires. Le critère de similitude est basé en grande partie sur étude qualitative. Grâce à cette démarche, on obtient une géométrie du sous-sol donnée par le modèle direct. Le calcul du pourcentage de fantômes est réalisé sur cette géométrie.

Pour travailler sur le modèle direct, les résistivités sont fixées en utilisant le tableau 1 et ajustées sur les inversions des données de terrain.

Lithologie	Approximation réalisée dans les modèle direct	Résistivité ohm.m
Argiles humide	Fantôme de calcaire	2 à 100
Sables selon la saturation	Fantôme de dolomie	50 à 1000
Calcaires et dolomies	Matrice	500 à 10000

Tableau 1 : Résistivités pour quelques lithologies extrait de Valois., 2011.

4 Résultats géophysiques et discussion

4.1 Sismique passive

Les 52 points H/V ont été acquis en grande partie sur les profils électriques pour le site de l'observatoire (contexte dolomitique, figure 12 ci-dessous) et celui l'aven du fonctionnaire (contexte calcaire, annexe 4).



Figure 12 : Carte d'acquisition des données tromino sur le site de l'observatoire du Larzac.

Les points au niveau des forages servent de références pour différencier les zones fantômisées et la roche saine. Une comparaison sur l'ensemble des données a été réalisée, il y a aucun signe évident permettant de déterminer la présence de fantômes (annexe 5).

L'une des raisons qui rend l'interprétation complexe est l'influence du vent. Lors de l'acquisition des données, la force du vent a variée de nulle à des bourrasques de 80 km/h. En présence de vent, un pic dans les basses fréquences est présent sur toutes les mesures hormis celle sur le sable affleurant (figure 13A). Pour un même emplacement, le pic disparaît en l'absence de vent (annexe 6). En utilisant les données d'un sismomètre placé à plusieurs mètres de profondeur dans la dolomie, il y a également des différences liées à présence ou non du vent (annexe 7). En comparant avec (Bard., 2004), le vent forme un pic basse fréquence, mais celui-ci est moins étalé et plus basse fréquence (figure ci-dessous).

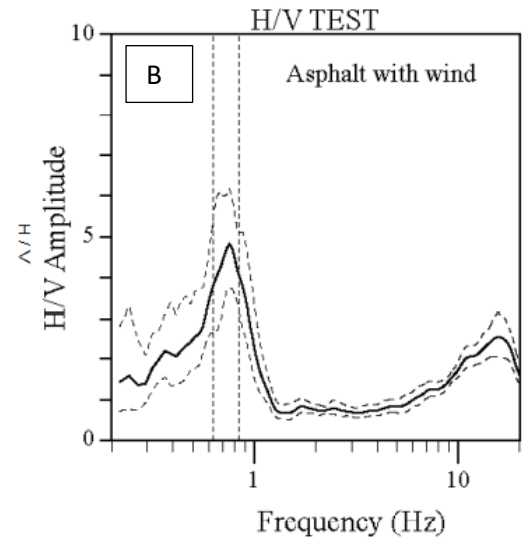
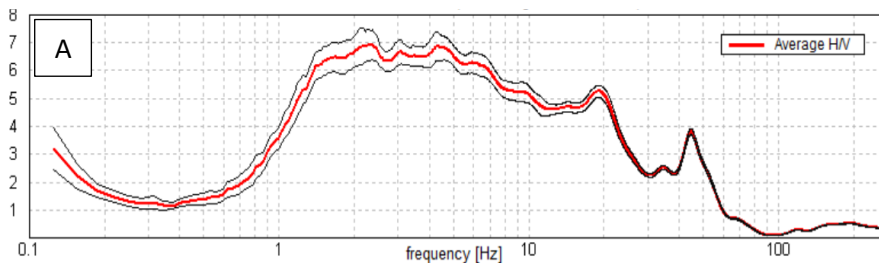


Figure 13 : Comparaison entre des données acquises sur le terrain et le guide Sesame de référence Bard., 2004 A) tromino exposé au vent sur de la dolomie, B) exemple de tromino exposé au vent figure extraite de Bard., 2004.

Dans le cas des points H/V placés dans des zones de sable affleurant, le pic de basse fréquence n'est pas visible, en présence ou en l'absence de vent (annexe 8).

Les trominos sont sensibles au bruit anthropique, pour les deux sites, la route et l'autoroute ne sont pas loin. La source de bruit n'est pas complètement homogène, cette source de bruit est parallèle à la fracturation et aux zones altérées.

Par la suite les données acquises par la sismique passive ne seront pas utilisées.

4.2 Electrique

4.2.a Zone d'étude en contexte dolomitique

Les données utilisées sur le site de l'observatoire du Larzac datent de 2010, acquises par R. Bayer et al. Il y a 11 profils de 48 électrodes chacun, le tout sur une zone de 100 mètres carrés (figure 14).



Figure 14 : Carte des profils ERT et des zones de forages.

La présence de forages à proximité des profils 4 et 5 permet de connaître la résistivité de la zone de sable dolomitique. Grâce à cette information il est possible de reconnaître sur l'ensemble des profils les zones avec du fantôme.

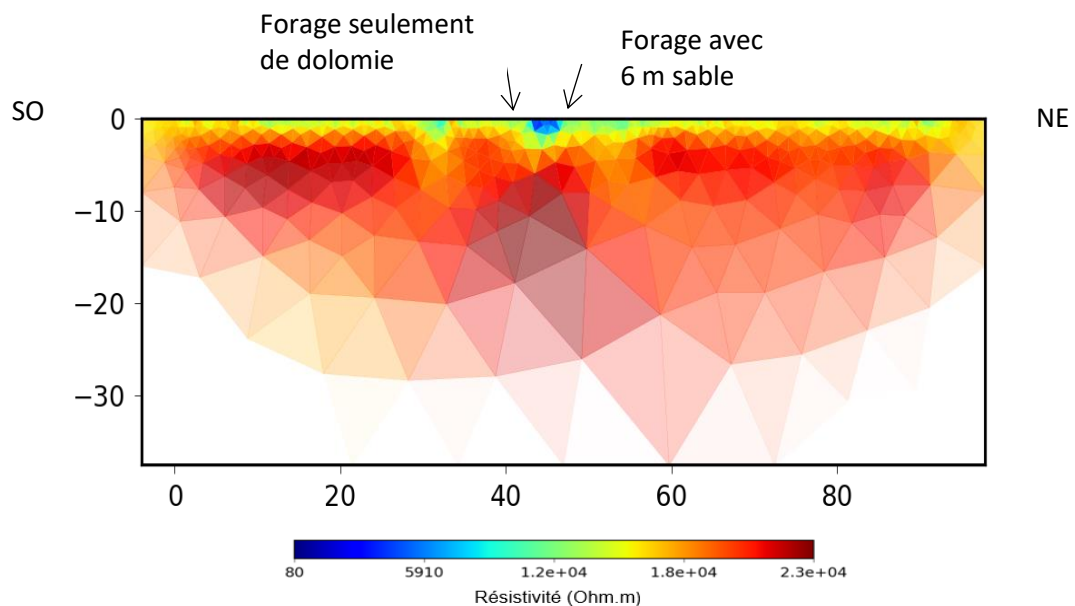


Figure 15 : Résultat de l'inversion des données acquises sur le profil 4.

Pour le résultat de l'inversion du profil 4, la zone avec la résistivité la plus faible correspond au forage avec 6 mètres de sable. Le fantôme de dolomie est donc représenté par de faibles résistivités. Les profils ERT permettent d'apporter des informations supplémentaires aux forages, d'autres zones de fantôme sont mises en évidence sur le modèle direct (figure 16).

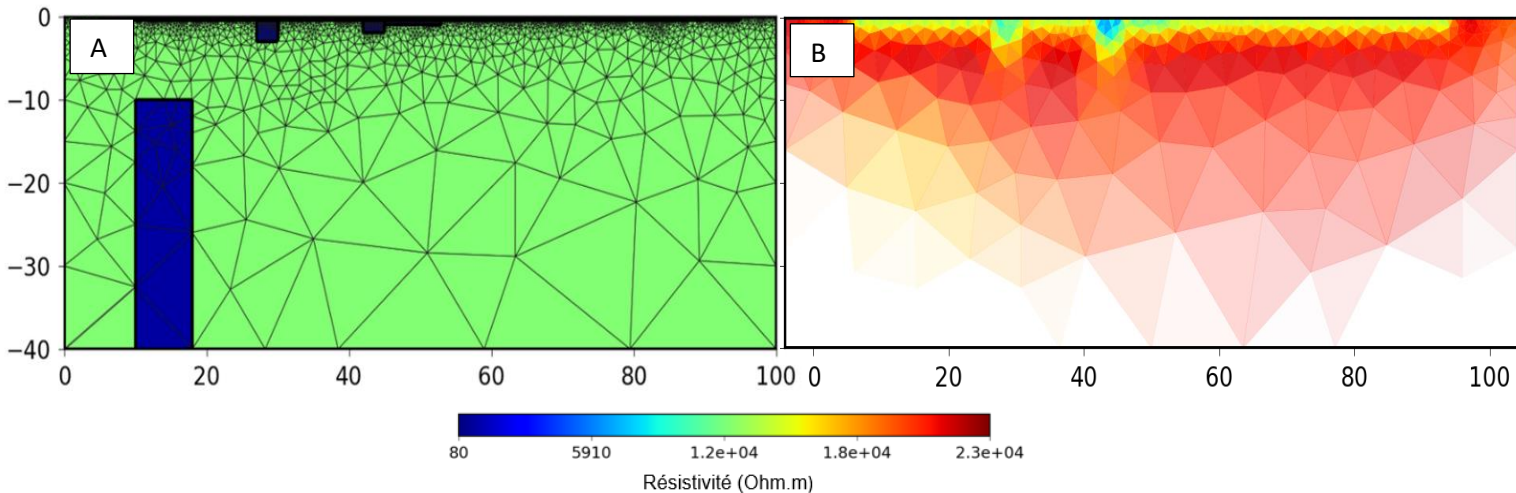


Figure 16 : Modèle direct du profil 4, A) géométrie et résistivité, B) résultat de l'inversion.

Pour les autres profils acquis en 2011, des zones de faibles résistivités sont visibles (annexe 9), elles ont la géométrie d'une colonne. Les poches de fantômes de dolomie ont des structures verticales.

En utilisant l'ensemble des profils, une inversion pseudo 3D est réalisée. Pour chaque profondeur de l'inversion 3D il est possible d'observer une distribution spatiale des résistivités (annexes 10). Les colonnes de fantômes sur chacun des profils se transforment en un couloir d'altération en 3D (figure 17). La profondeur maximale atteinte par ce couloir ne dépasse pas les 6 mètres. Le fantôme de roche de dolomie se déploie en forme de couloirs verticaux.

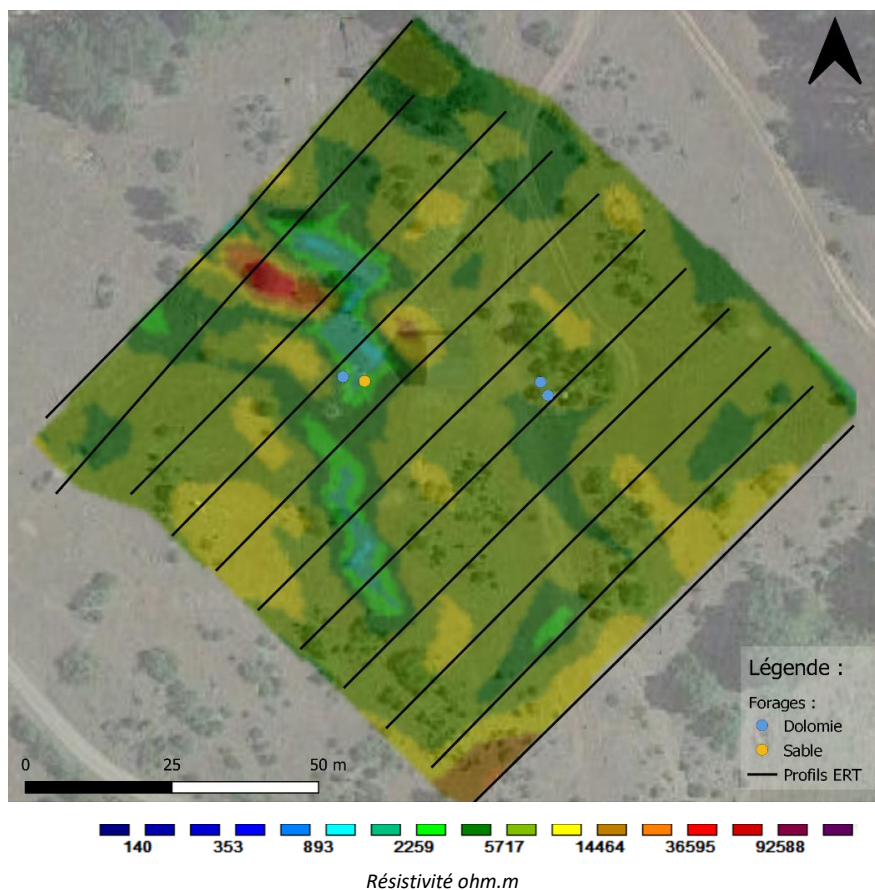


Figure 17 : Pseudo 3D pour une profondeur entre 3 et 4 m.

Les résistivités sur l'observatoire atteignent jusqu'à 90 000 ohm.m, ce sont des résistivités très élevées (Valois., 2011) obtient les même valeurs, alors que la zone est composée de dolomie et de sables dolomitiques. La zone recouverte par les profils ERT est traversée par un profil de sismique réfraction acquis en 2010 par R.Valois. En traitant les données brutes, la zone de fantômes n'est pas visible (annexe 11). La sismique réfraction étant sensible aux structures subhorizontales elle a du mal à imager une structure verticale de faible profondeur.

4.2.b Zone d'étude en contexte calcaire - Aven du fonctionnaire

Sur le site de l'aven du fonctionnaire, deux profils électriques de 240 mètres avec 96 électrodes ont été acquis (figure 18 ci-dessous). La disposition des profils permet de voir si la cavité est visible et s'il existe une variation du volume de fantômes de roche entre les deux profils.



Figure 18 : Profils ERT de 240m avec 96 électrodes au niveau de l'aven du fonctionnaire.

Le profil 2 recoupe les trois étages de l'aven, une cavité étant de très forte résistivité, il est plus probable de retrouver les cavités dans ces zones. En regardant le résultat de l'inversion (figure 19B), les niveaux se situent sur les zones de faibles résistivités. Ces zones entre 80 et 5000 ohm.m, correspondent aux fantômes de calcaire. Le fantôme est un milieu plus conducteur que la matrice, il va inhiber la présence des cavités sur les résultats de l'inversion. En vérifiant à l'aide de modèles directs, les cavités n'ont pas d'influence sur le résultat de l'inversion comparé aux zones de fantômes (annexe 12).

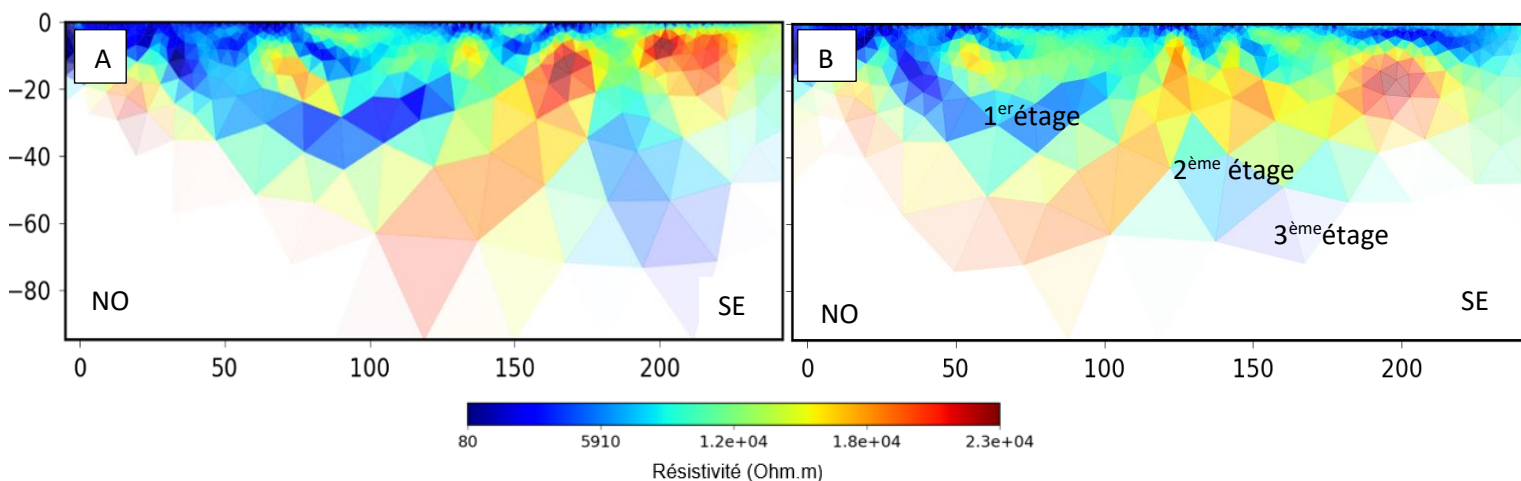


Figure 19 : Résultat de l'inversion des données de terrain : A) Profil 1, B) Profil 2.

Les résultats de l'inversion des deux profils sont similaires. Les zones de fantômes sont continues sur les 50 mètres qui les séparent. La cavité du fonctionnaire a été créée par des poches de fantômes qui ont été vidangées. Puisque les deux profils sont

similaires, la proportion de fantômes qui constituaient autrefois l'aven du fonctionnaire était très faible. La part la plus importante du fantôme est encore en place. La résistivité du fantôme de calcaire est associée à l'argile, elle est de 200 ohm.m pour les modèles directs tandis que pour la matrice, la résistivité utilisée est de 5000 ohm.m.

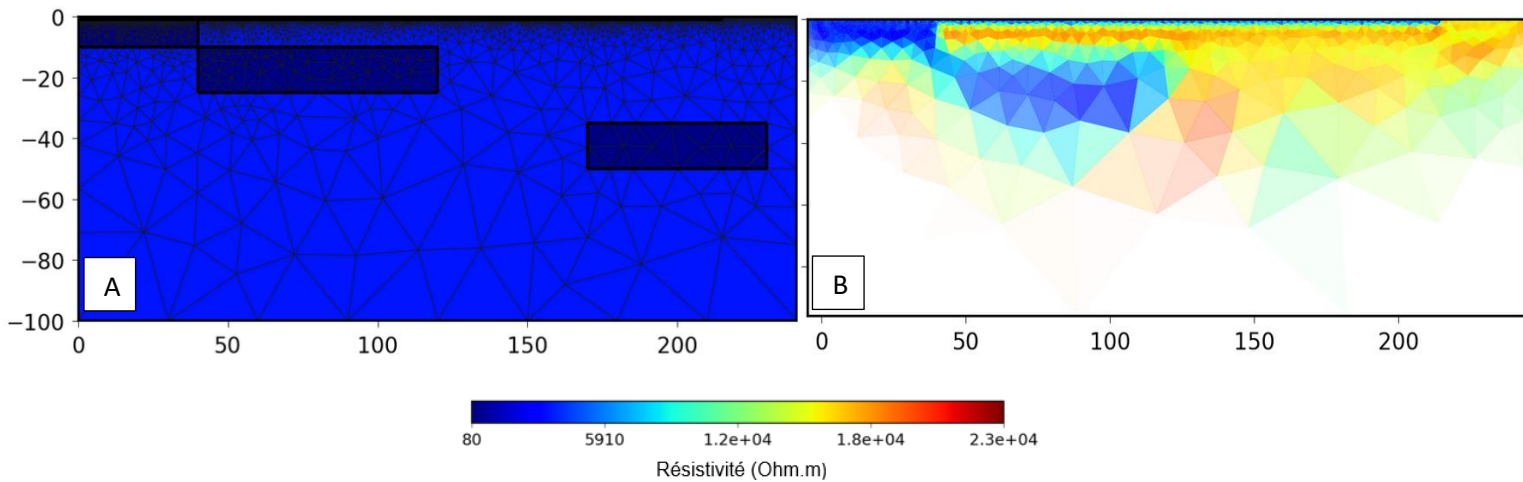


Figure 20 : Modèle direct du profil 1 : A) géométrie et résistivité, B) résultat de l'inversion.

L'utilisation du modèle direct permet de voir que les zones fantômées sont discontinues avec des structures horizontales.

4.2.c Zone d'étude en contexte calcaire - Aven du cochon

Au-dessus de l'aven du cochon, deux profils électriques superposés sont réalisés (figure 21). Le premier profil a un espacement entre les électrodes de 2.5 m. Il est de la même longueur que ceux du fonctionnaire. Le deuxième profil est réalisé avec un espacement de 5 m entre les électrodes. Dans cette cavité, des zones de fantômisations sont visibles jusqu'à -150 mètres. Le deuxième profil permet d'augmenter la profondeur d'investigation. La superposition des deux profils permet de voir l'influence de la profondeur d'investigation sur le pourcentage de fantôme.

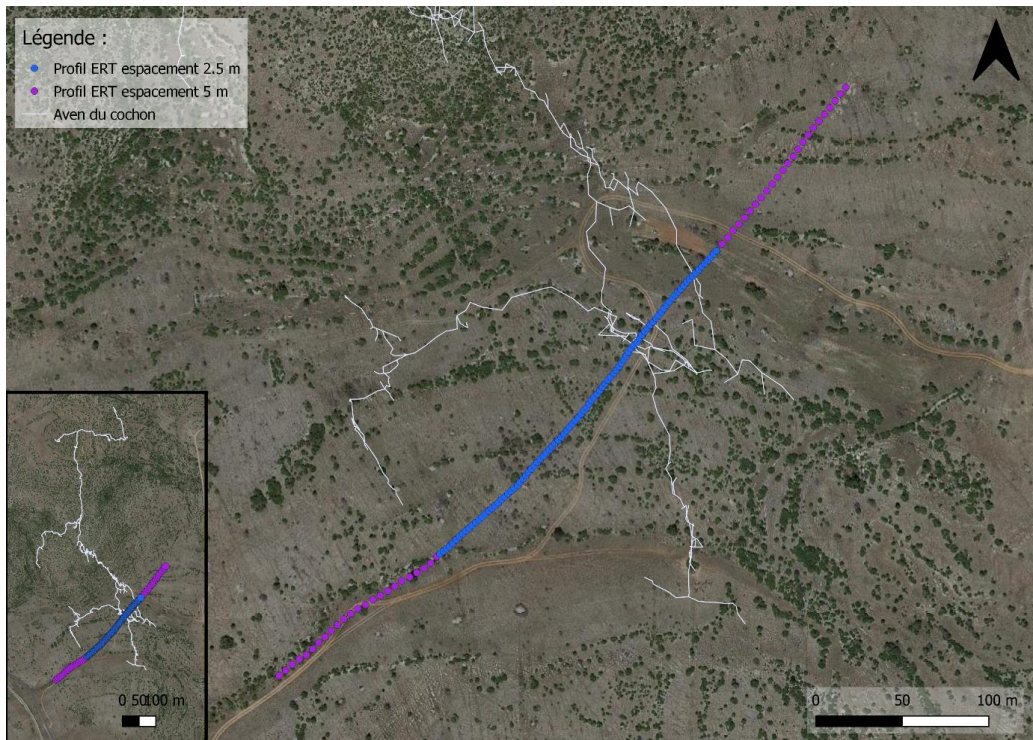


Figure 21 : Aven du cochon avec les deux profils ERT de 240m et 480 m.

Pour le profil avec un espacement de 2.5 m, les cavités se trouvent à limite de la résolution. Pour le plus grand profil, les cavités se retrouvent dans les zones de faibles résistivités, comme pour le fonctionnaire.

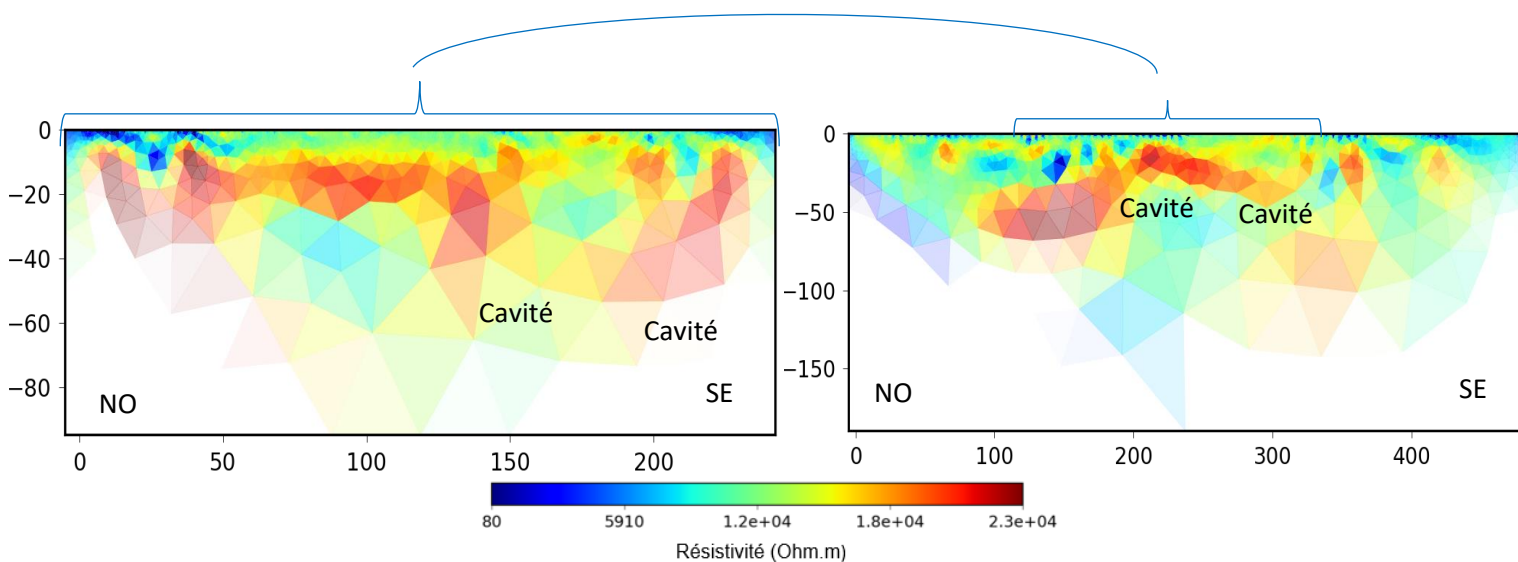


Figure 22 : Résultat de l'inversion des données de terrain : à gauche espacement des électrodes de 2.5 m à droite espacement de 5 m.

En analysant les géométries avec les modèles directs, on retrouve à nouveau des structures horizontales et discontinues comme celles pour le fonctionnaire. Les résistivités utilisées dans le modèle direct varient de 200 à 500 ohm.m pour le fantôme, l'encaissant est de 500 ohm.m.

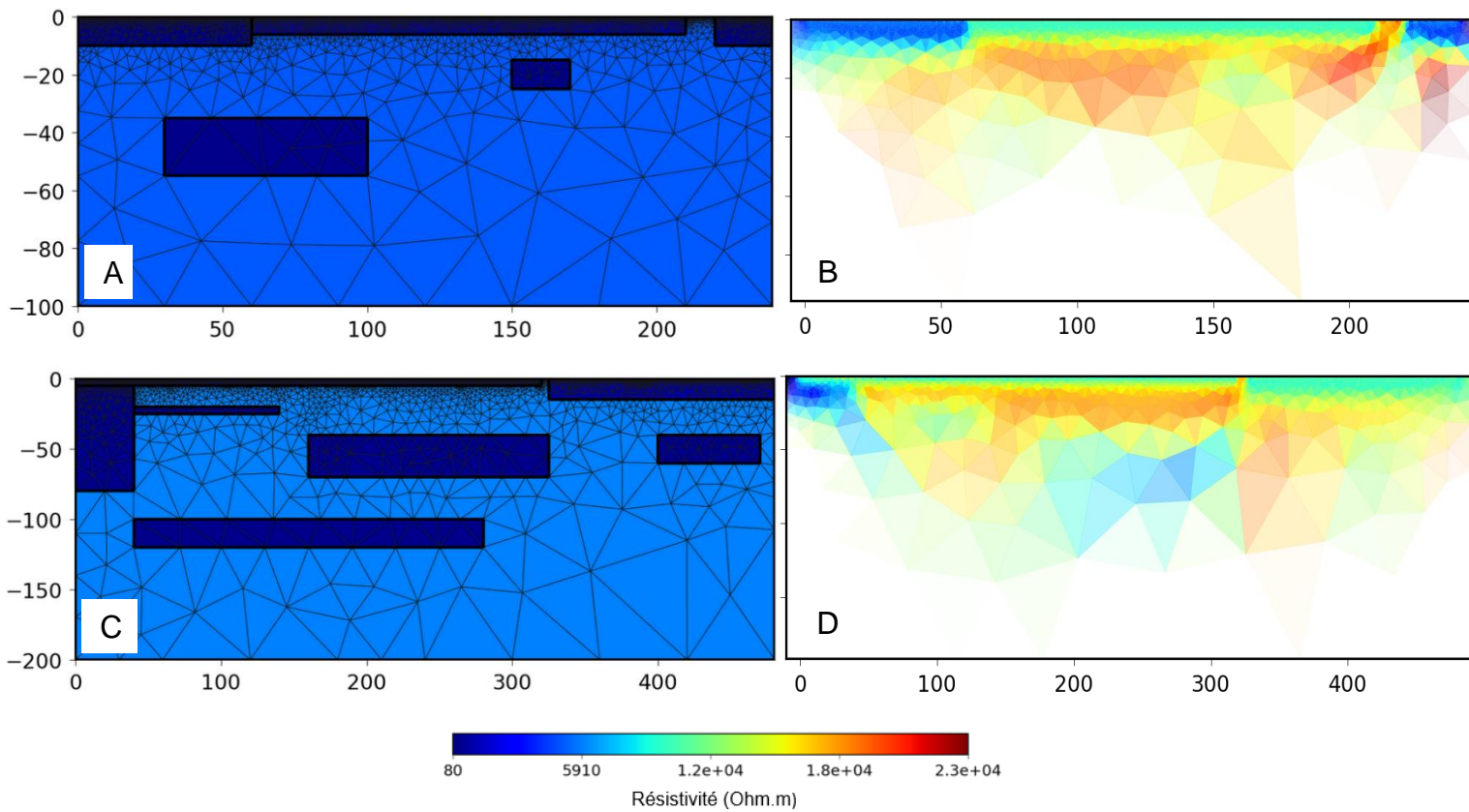


Figure 23 : Modèle directe :

Pour un espacement de 2.5 m : A) géométrie et résistivité, B) résultat de l'inversion.

Pour un espacement de 5 m : C) géométrie et résistivité, D) résultat de l'inversion.

5 Comparaison et interprétation

5.1 Géométrie de la roche fantôme pour chaque lithologie

En contexte dolomitique d'après les modèles directs, les géométries du fantôme sont verticales. Ces structures verticales sont retrouvées dans la forme des cannoles (creux d'environ 10 mètres de profondeur sur 20 de long). La zone fantômisée sur les profils ERT forme un couloir partant de la subsurface jusqu'à 6 mètres de profondeur. Un autre couloir d'altération a été détecté en utilisant la sismique réfraction en 3D (R. Valois., 2011). Les cannoles en surface ainsi que l'aven des dolines 100 mètres en profondeur ont les mêmes orientations. Les zones altérées sont alignées sur l'orientation de la fracturation de la zone (figure 24).



Figure 24 : Carte de couloirs d'altération.

Les cannoles par le passé étaient similaires aux couloirs d'altération détectés par l'ERT ou la sismique réfraction. Elles ont subi un soutirage pour vider le sable dont elles étaient remplies. Au fond de l'aven des dolines coule un ruisseau, du sable dolomitique est visible régulièrement dans cette cavité alors que le cours d'eau est présent. L'aven des dolines passe sous une cannole encore en partie remplie de sable. On suppose que le long d'une même fracture, il y a plusieurs poches de fantômes, vidées ou non. Entre les poches de fantômes le long de la fracture du sable ou de l'eau pourraient circuler (figure 25 ci-dessous).

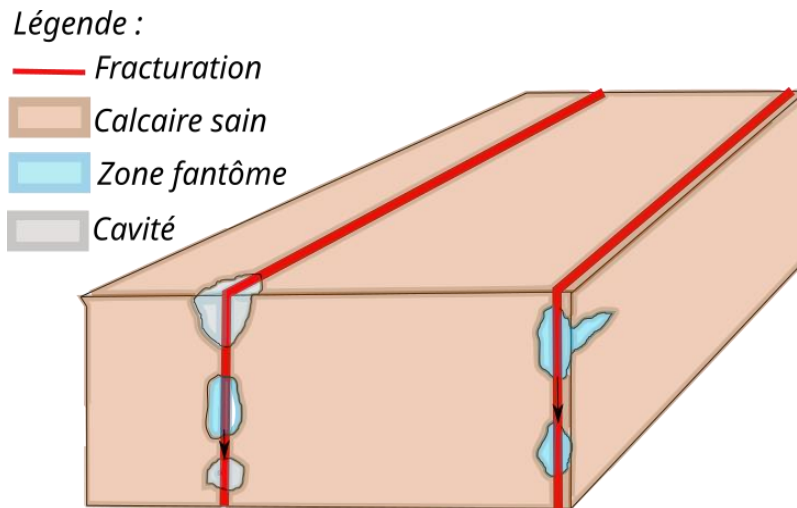


Figure 25 : Schéma représentant les cavités et zones de fantômes dans la dolomie.

Concernant la zone constituée de calcaire, les géométries des zones fantômées sont horizontales bien que les profils n'aient pas la même orientation. Pour l'aven du fonctionnaire, les profils sont NO-SE tandis que pour le cochon ils sont SO-NE. Les profils électriques sont perpendiculaires entre eux. Dans les deux cas, les structures sont horizontales. Le pendage dans cette zone varie de 10 à 15°, les zones de fantômes suivent la stratification de la lithologie. La vidange des cavités est suivant la fracturation. Plusieurs failles sur la zone ont une orientation NE-SO ce qui correspond aux niveaux subhorizontaux des cavités.

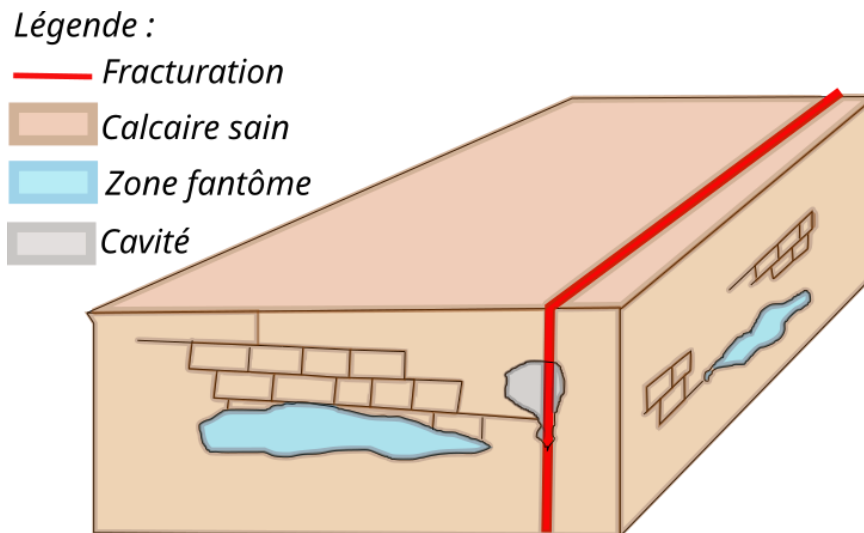


Figure 26 : Schéma représentant les zones de fantômes et cavités dans le cas d'un calcaire.

Le développement des zones fantômes n'est pas identique pour la dolomie et le calcaire. Dans le cas où un fantôme se formerait dans un milieu sans stratification marquée, on suppose qu'il suit la gravité et forme des structures verticales sur les zones d'infiltration de l'eau. C'est le cas de la dolomie, cette dolomie est recristallisée la stratification n'est pas visible. Le calcaire au contraire est composé de bancs stratifiés, le fantôme ne va pas suivre la gravité uniquement mais aussi la stratification.

C'est la stratification de la lithologie qui joue un rôle dans la géométrie des zones fantômes.

5.2 Estimation du pourcentage de fantômes et lien avec l'hydrogéologie

5.2 a Calcul du pourcentage de fantômes et de vide

Le calcul du volume de fantômes s'appuie sur les géométries réalisées dans les modèles directs. Le travail sur le modèle direct permet de connaître le pourcentage de fantôme et de matrice exacte pour une inversion de données.

Pour calculer le pourcentage de vide et donc de stockage en eau, il faut connaître la porosité du milieu. Pour le calcaire, des porosités ont été calculées sur l'aven du Rocas par Manon Doucet (annexe 13). La porosité dans les zones fantômes varie de 6 à 44 %, la porosité de la matrice de calcaire est de 2%. Pour la dolomie, les données de porosités utilisées sont de 4% pour le fantôme et de 1% pour la matrice (mesures pétrophysiques sur des échantillons, Cédric Champollion).

Le volume de fantômes est calculé sur une largeur d'un mètre sur la longueur du profil en fonction de la profondeur d'investigation.

	Zone en contexte dolomitique	Zone en contexte calcaire		
	Observatoire	Aven du fonctionnaire	Aven du cochon	Aven du cochon
Longueur des profils (m)	94	240	240	480
Aire de la zone (m ²)	94*40	240*100	240*100	480*150
Pourcentage de fantôme	0.05	0.1	0.14	0.24
Porosité du fantôme	0.4	0.4/0.06	0.4/0.06	0.4/0.06
Porosité de la matrice	0.05	0.02	0.02	0.02
Pourcentage de vide	0.05	0.06/0.02	0.8/0.3	0.12/0.03

Tableau 2 : Comparaison du pourcentage de fantômes et du volume de vide pour les zones en contextes dolomitique et calcaire.

Le pourcentage de fantôme est différent en fonction de la lithologie avec un ordre de grandeur d'écart. Dans le cas du calcaire entre les deux avens, pour une profondeur d'investigation identique, le pourcentage de fantôme est similaire. Sur l'aven du cochon, pour deux profondeurs d'investigation différentes, le pourcentage de fantômes n'est pas identique. Il existe une variation du volume de fantôme avec la profondeur.

Le pourcentage de vide est identique pour les deux lithologies, la porosité de la matrice joue également un rôle dans le stockage en eau.

5.2.b Application des résultats à l'hydrogéologie

Pour répondre à l'enjeu de la ressource en eau, un premier calcul est réalisé pour estimer le rôle des zones fantômes.

La zone d'étude en contexte dolomitique se situe sur le bassin versant du Durzon. Le débit de la source est de 1m^3 (Fores., 2016). Pour déterminer combien de temps l'ensemble des zones fantômées maintiennent le débit de la source en l'absence de pluie, les hypothèses sont :

- Le volume estimé sur les profils ERT est le même pour l'ensemble du bassin versant
- Les fantômes communiquent directement avec la source
- Les zones de fantômes sont complètement saturées en eau.
- La profondeur maximale est de 50 mètres correspondant à la zone de stockage (Fores., 2016).

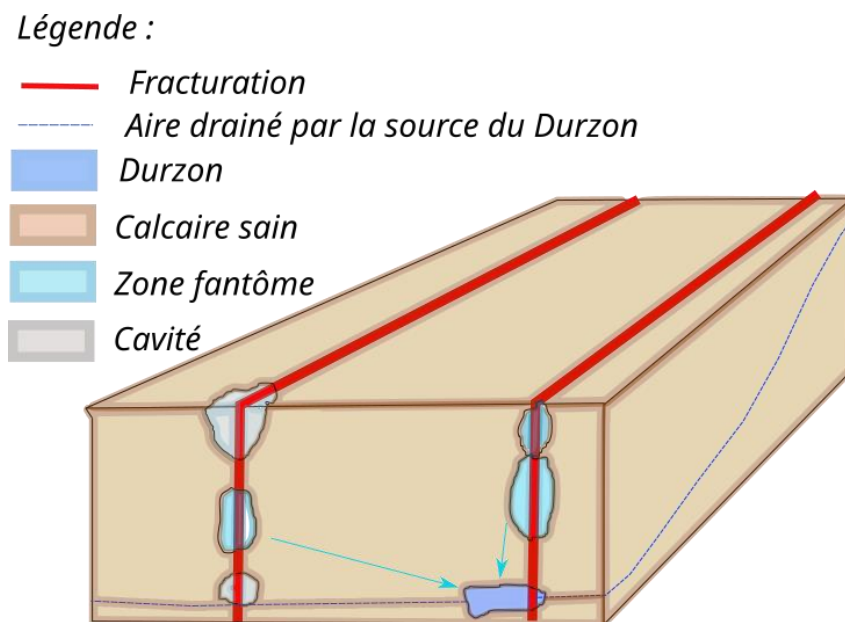


Figure 27 : Schéma bassin versant du Durzon.

En réalisant un calcul (annexe 16), la source du Durzon coulerai au maximum 8 ans en étant seulement alimenté par l'eau contenue dans les zones fantômes et la matrice. La matrice dans le cas de la dolomie peut jouer un rôle dans les écoulements. Dans ces calculs, si la matrice n'est pas prise en compte, le volume d'eau disponible est divisé par deux.

Pour la zone composée de calcaire, le ou les bassins versants contenant les avens du fonctionnaire et du cochon ne sont pas encore identifiés et l'estimation du débit est complexe.

5.2.c Points à approfondir pour affiner les résultats

L'inversion est une représentation non unique de la réalité. Lors du calcul du pourcentage de fantômes, il y a un écart entre l'inversion des modèles directs et les données en particulier sur la distribution des résistivités (annexe 14).

Le travail sur le modèle direct est une simplification, en particulier sur les zones fantômes, les résistivités allant de 80 à pratiquement 10 000 ohm.m sont considérées comme zone de fantômes alors que par exemple en surface, c'est la signature du sol. Dans le cas du fantôme de dolomie, la référence est réalisée dans un forage avec un niveau piézométrique, le sable contient de l'eau ce qui fait chuter la résistivité. S'il y a une absence d'eau, le sable a une résistivité importante. Pour le cas du calcaire dans les modèles directs, c'est la résistivité de l'argile qui est utilisée. Pour la suite du stage un travail sur la chimie des fantômes et des matrices va être réalisé en utilisant les méthodes X-Ray fluorescence ou XRF et X-Ray Diffraction ou l'XRD.

Les géométries des modèles directs sont mieux contraintes en surface qu'en profondeur. Un exemple dans le cas de la dolomie pour une inversion similaire le volume de fantômes varie de 2 à 5% (annexes 15).

Pour les deux lithologies, les profondeurs d'investigations ne sont pas identiques. Pour la dolomie les profondeurs d'investigations n'excèdent pas 40 mètres alors que pour le calcaire elle est jusqu'à 150 mètres. Le karst étant un milieu très hétérogène il est possible de passer à côté d'une zone de fantôme importante situé plus en profondeur.

6 Conclusions et perspectives

La sismique passive avec la méthode H/V ainsi que la sismique réfraction en 2D n'ont pas permis de mettre en évidence les zones fantômes. La sismique réfraction en 3D (Valois., 2011) et la méthode ERT ont permis d'imager au moins partiellement les zones de fantômes. Le pourcentage de zones fantômées est différent selon la lithologie, dans la dolomie, il est de 5%, dans le calcaire il varie entre 10 à 20 %. La stratification dans la lithologie joue un rôle dans la géométrie des zones d'altérées. Le fantôme forme des poches verticales le long de la fracturation pour la dolomie non stratifiée. Dans le cas du calcaire les zones fantôme suivent la stratification subhorizontale. Les volumes et géométries des zones fantômes ne paraissent pas aberrant. Une première application du rôle du stockage de l'eau dans les zones fantômes est réalisé sur le bassin versant du Durzon dans le cas de la dolomie.

Pour poursuivre ce travail, une analyse par X-Ray fluorescence et X-Ray Diffraction va être réalisée pour chacune des lithologies dans les zones de fantômes et matrices. Dans la continuité des méthodes géophysiques, il y a pour projet de réaliser de la sismique réfraction au-dessus et dans l'aven du fonctionnaire et du géoradar à l'observatoire. Pour approfondir la partie hydrogéologie, il faut contraindre les bassins versants et le débit dans la zone de calcaire. Actuellement, le BRGM est intéressé par cette thématique et le stage de Lucien Bourget porte sur ce sujet.

Remerciements

Mes remerciements vont en premier à Cédric Champollion et Philippe Vernant pour leur disponibilité et leur patience à répondre à l'ensemble de mes questions.

Un grand merci à Lucien Bourget, Bertille Loiseaux, Catherine et Philippe Collard sans qui la mise en place des profils électriques sur le terrain aurait été bien plus longue. Je tiens à remercier Pierre Camps pour ces conseils pour la suite de mon stage sur la partie chimie, à Remi Valois et Manon Doucet pour leurs explications en plus de leurs données brutes utilisées dans ce rapport. Merci à Oswald Malcles pour les discussions toujours enrichissantes.

Je remercie Sylvie et Charles Balhouane, propriétaires du terrain sur lequel se trouve l'aven du fonctionnaire, de nous avoir gentiment autorisé à faire les mesures géophysiques. Je remercie également la mairie de St Pierre de Lafage de nous avoir autorisé à réaliser des mesures sur les terrains communaux à l'aplomb de l'aven du cochon.

Je ne saurais oublier mes camarades de bureau et de classe avec qui j'ai passé des heures à discuter de nos stages et à rédiger nos rapports, en particulier à Clémence Petit qui m'a corrigé mes nombreuses fautes d'orthographe.

Bibliographie

Ambert, P. (1984) 'La région de Millau (Grands Causses). [Présentation d'une carte géomorphologique en couleurs en 1/25 000]: Présentation d'une carte géomorphologique en couleurs en 1/25 000', *Méditerranée*, 52(3), pp. 43–56.
doi:10.3406/medit.1984.2254.

Bard, P.-Y. (2004) 'SESAME: Site EffectS assessment using AMbient Excitations', p. 62.

Bechtel, T.D., Bosch, F.P., Gurk, M. (2007) 'Methods in Karst Hydrogeology' (pp.171-199)

British Geological Survey *et al.* (2015) 'The Application of Passive Seismic Techniques to the Detection of Buried Hollows', in *Sinkholes and the Engineering and Environmental Impacts of Karst: Proceedings of the Fourteenth Multidisciplinary Conference. National Cave and Karst Research Institute Symposium 5*, Rochester, Minnesota: University of South Florida Tampa Library, pp. 423–430.
doi:10.5038/9780991000951.1034.

Bruxelles, L. (2001) 'Reconstitution morphologique du Larzac (Larzac central, Aveyron, France) : le rôle des formations superficielles', *Karstologia : revue de karstologie et de spéléologie physique*, 38(1), pp. 25–40.
doi:10.3406/karst.2001.2482.

Bruxelles, L. and Ambert, P. (1999) 'Altération et karstification sous couverture : le rôle morphologique de certaines formations superficielles du Causse de l'Hospitalet (Larzac, Aveyron)', p. 17.

Fores, B. (2016) 'Gravimétrie et surveillance sismique pour la modélisation hydrologique en milieu karstique: application au bassin du Durzon (Larzac, France)', p. 286.

Macles, O., (2021) 'Analyse des mouvements verticaux récents associés aux reliefs cévenols : Implications en termes de dynamique des déformations en domaine intraplaque'.

Quinif, Y., (2010) ' Fantôme de roche et fantômisation' 978-2-87509-016-4.

Quinif, Y.,(2014) 'fantômisation une nouvelle façon de concevoir la formation des cavernes.'

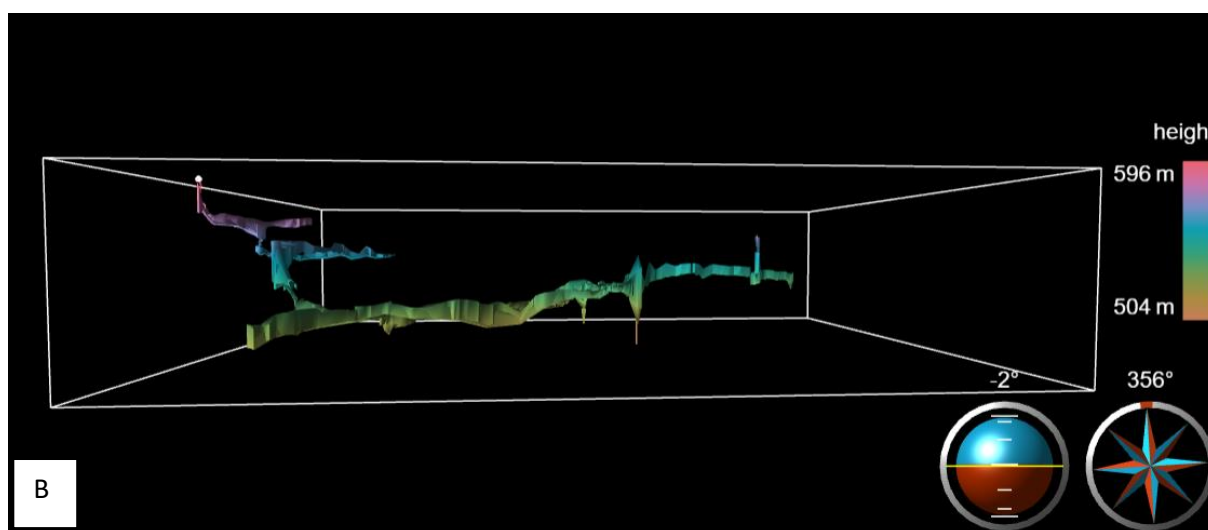
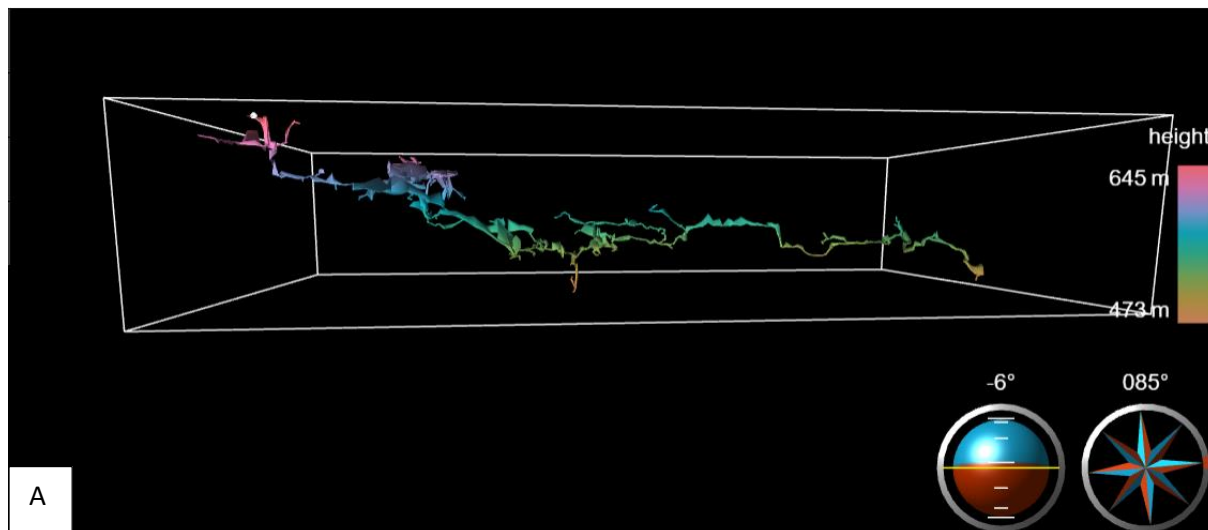
Valois, R. (2011) 'Caractérisation structurale de morphologies karstiques superficielles et suivi temporel de l'infiltration à l'aide des méthodes électriques et sismiques', p. 245.

Vernant, P. *et al.* (2022) 'Regional karst network genesis due to removal of ghost rocks revealed by burial dating', p. 4.

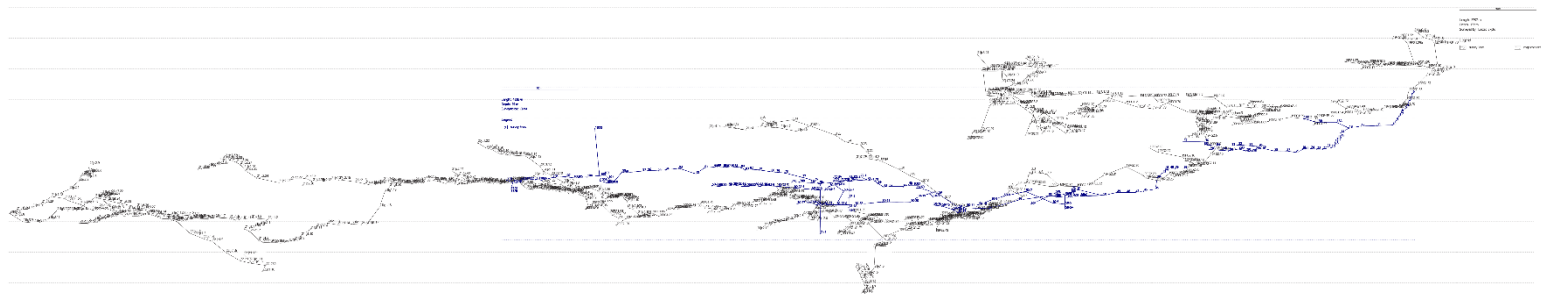
Table des tâches

MOIS	TACHES
JANVIER - MARS	Bibliographie
	Prise en main des logiciels res2inv et res3dinv
	Visite des lieux d'étude
	Travail sur les codes python pour traiter l'ERT en 2D, 3D et modèle direct
AVRIL	Résultats en utilisant les données brutes dans le domaine dolomitique profil ERT en 2D, 3D et de sismique réfraction
	Acquisition de données de sismique passive sur le site dolomitique et sur l'aven du fonctionnaire
	Acquisition des deux profils ERT sur l'aven du fonctionnaire
	Traitement des données récoltées
MAI	Travail sur des codes pythons pour analyser les données d'ERT et sismique passive
	Acquisition des profils ERT sur le site dolomitique et à l'aven du cochon
	Acquisition de données de sismique passive sur le site dolomitique
	Traitement des données de terrain
JUIN - JUILLET	Début du traitement des échantillons pour les analyses de chimie
	Rédaction du rapport et préparation à la soutenance
	Analyses des échantillons par XRF et XRD

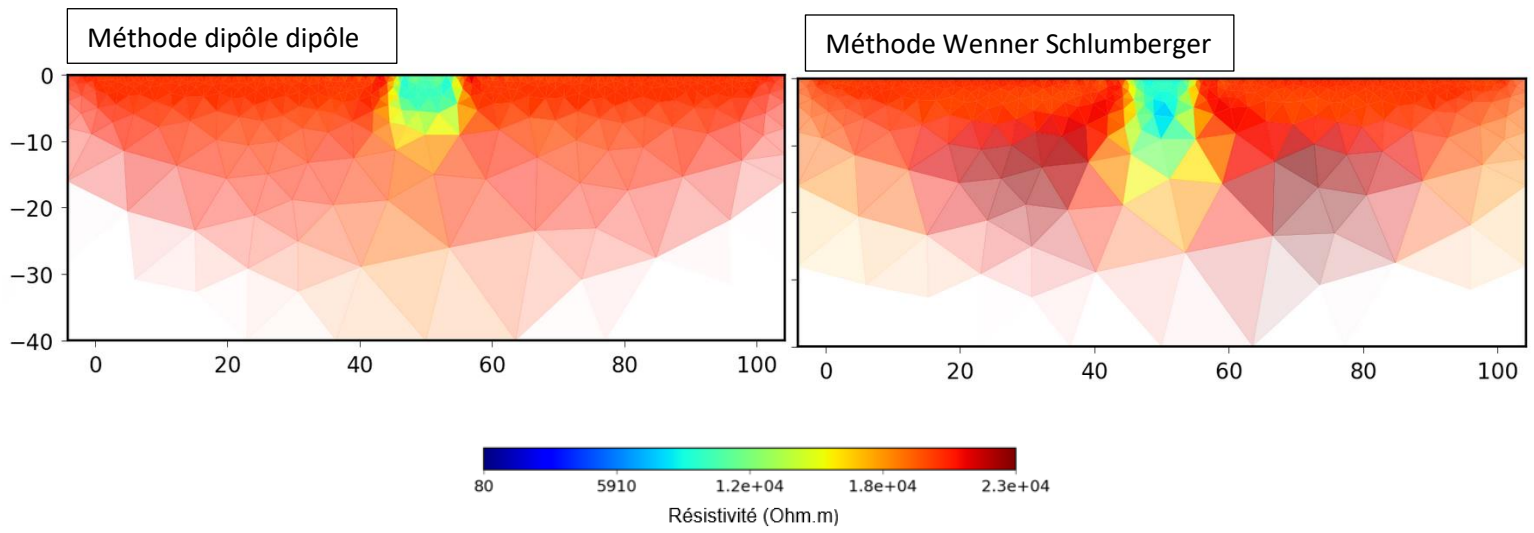
Annexes



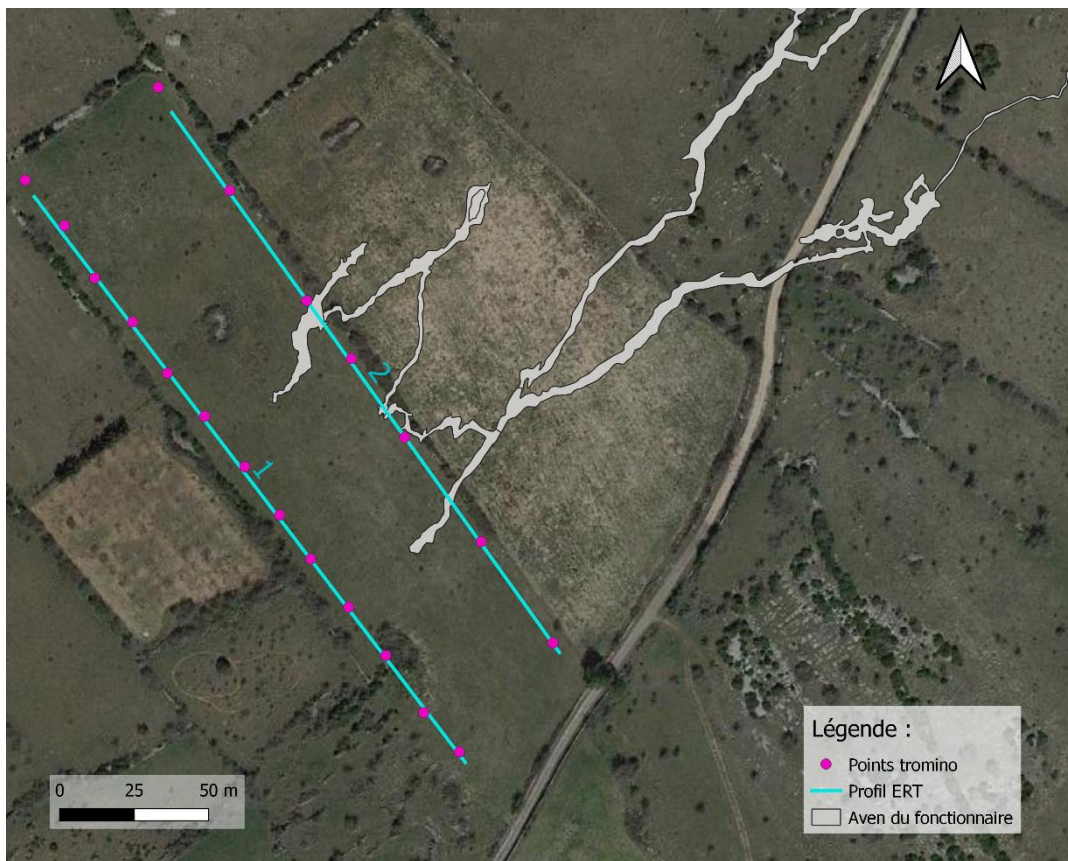
Annexe 1 : Aven en 3D, figure A aven du cochon, figure B aven du fonctionnaire.



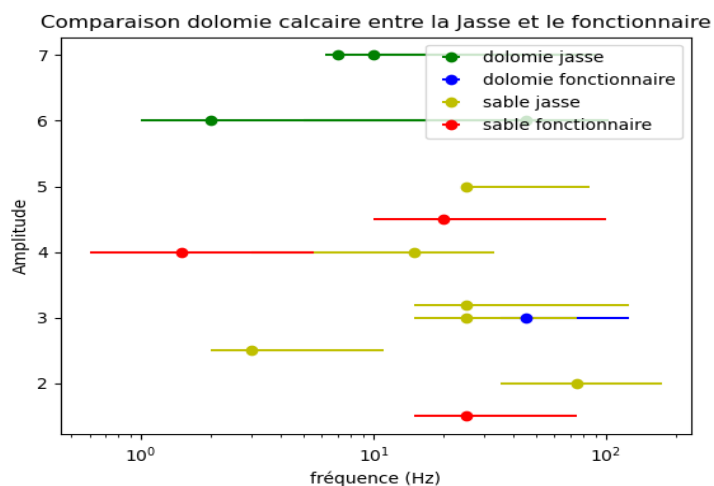
Annexe 2 : Superposition des avens recalés aux bonnes altitudes. En noir aven du cochon en bleu aven du fonctionnaire.



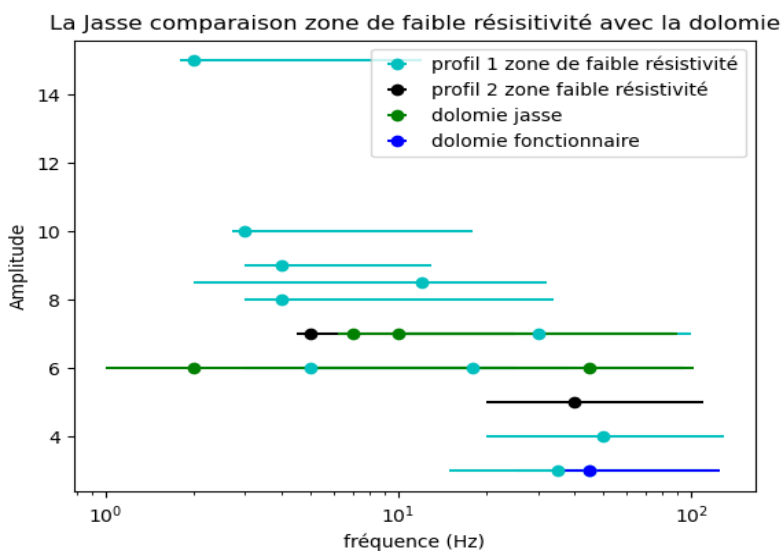
Annexe 3 : Inversion pour la même géométrie pour une méthode dipôle dipôle et Wenner Schlumberger.



Annexe 4 : Points d'acquisition des données tromino sur le fonctionnaire.

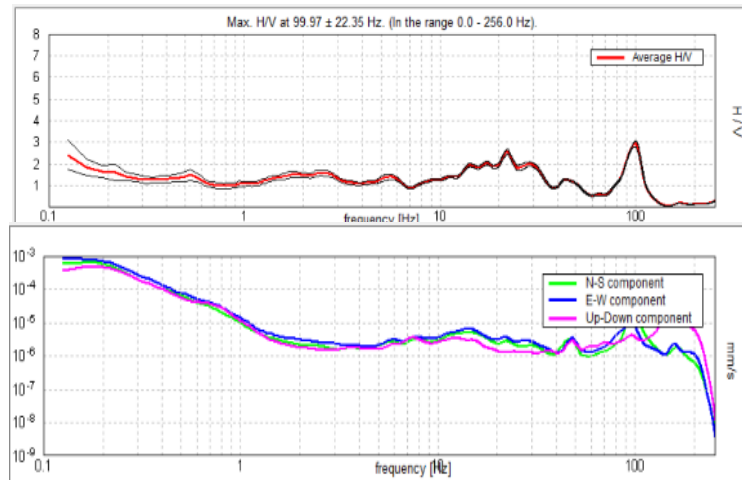
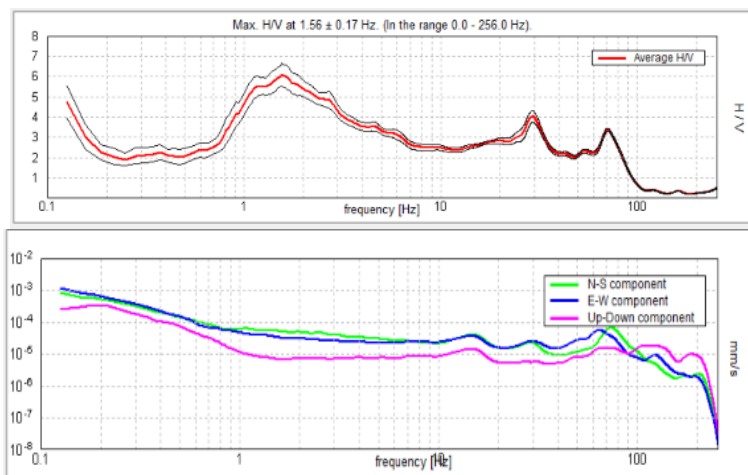


Les points sur la Jasse situés au niveau de l'observatoire du Larzac sont au niveau des forages, pour le fonctionnaire les points sable et dolomie sont choisis à partir de zones affleurantes, il n'y a pas de forages.

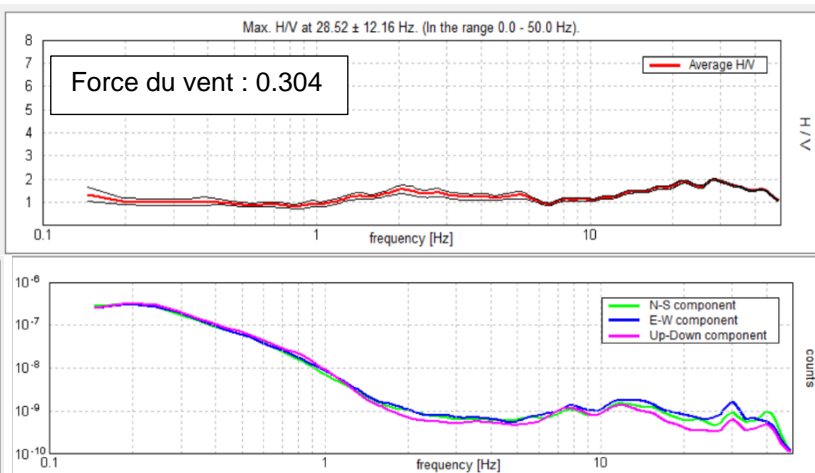
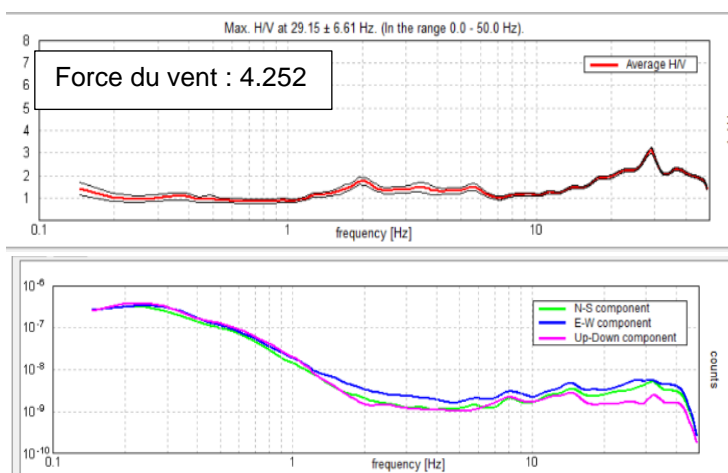


Le profil 1 et 2 sont les deux lignes que forment les points tromino figure 12. Seuls les points au-dessus des zones de faible résistivité ont été sélectionnée.

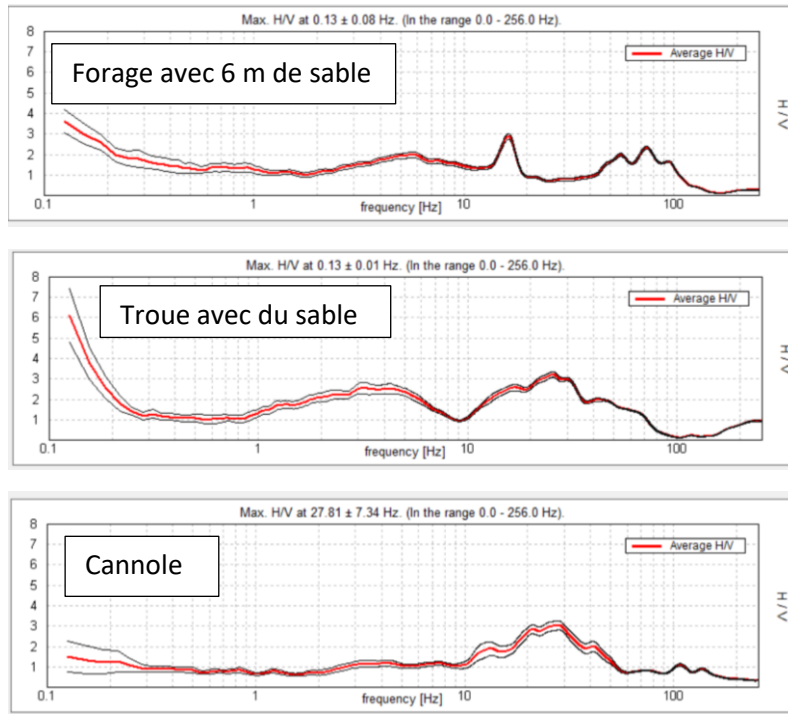
Annexe 5 : Exemple de graphique pour chercher une influence des zones fantômes.



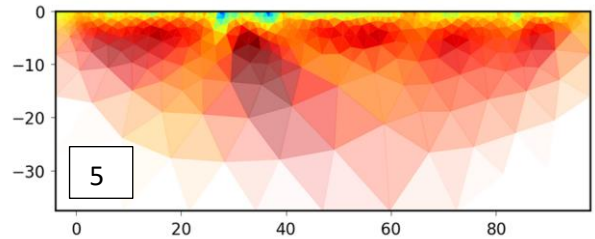
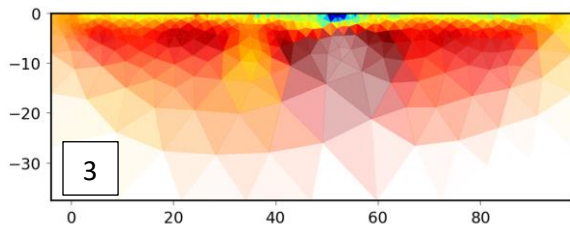
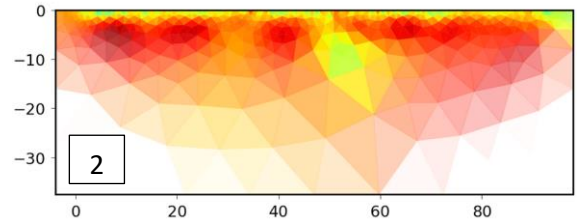
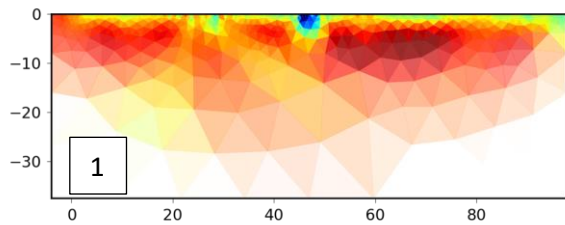
Annexe 6 : Données tromino à un même point dans de la dolomie, à gauche jour avec vent, à droite jour sans vent.

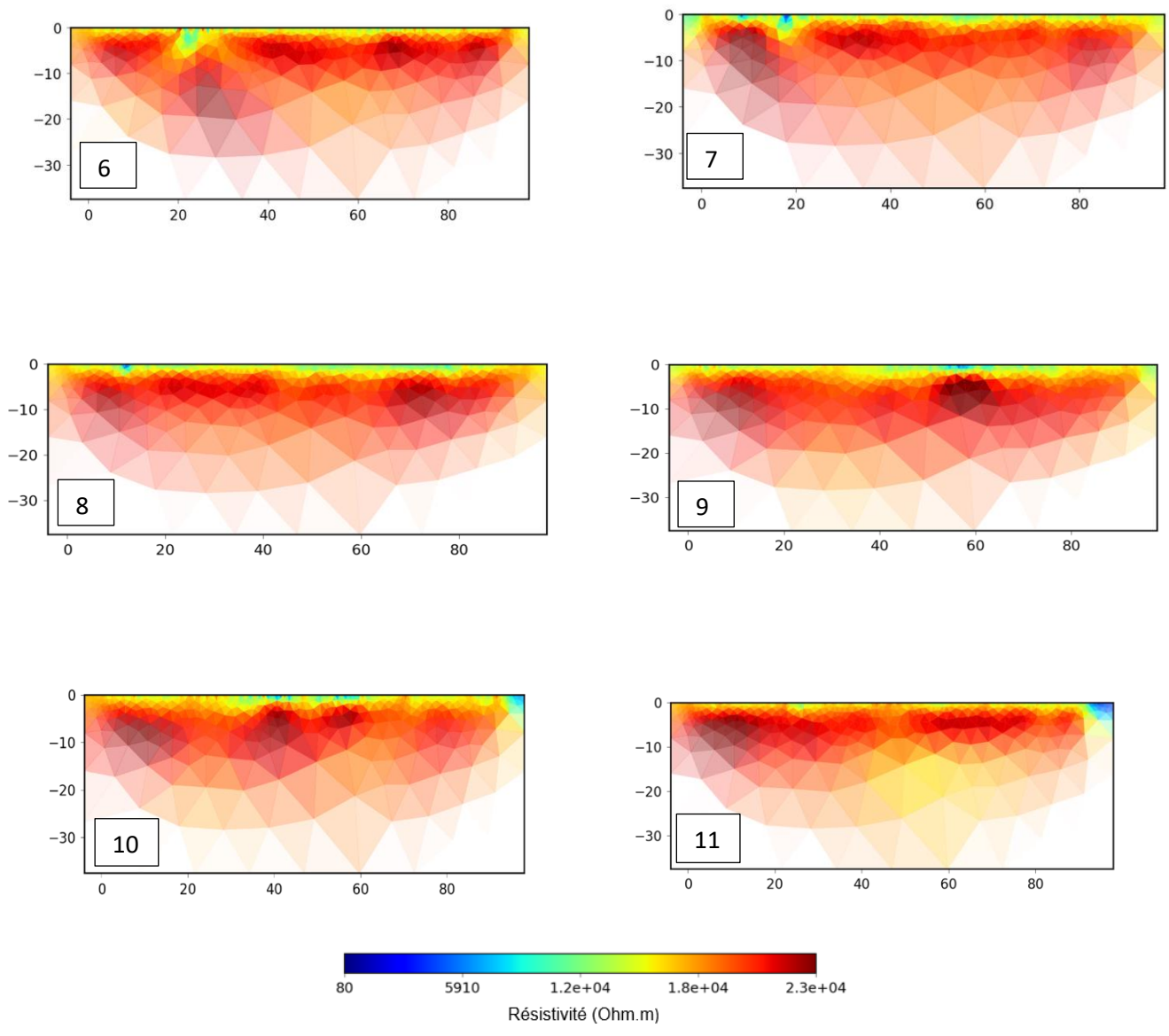


Annexe 7 : H/V du sismomètre placé à l'observatoire, à gauche jour de vent à droite jour sans vent.

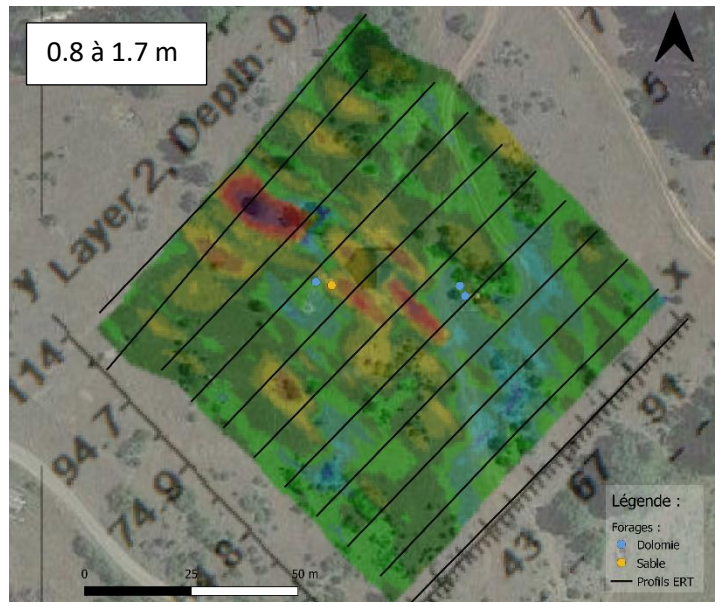
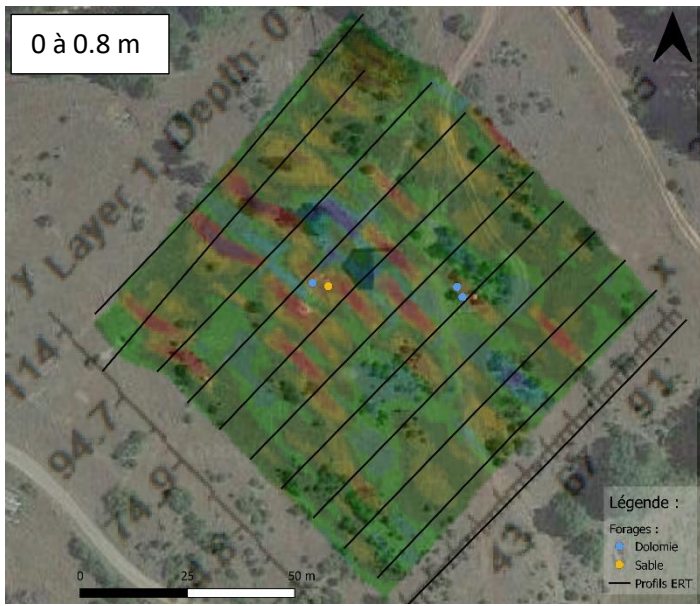


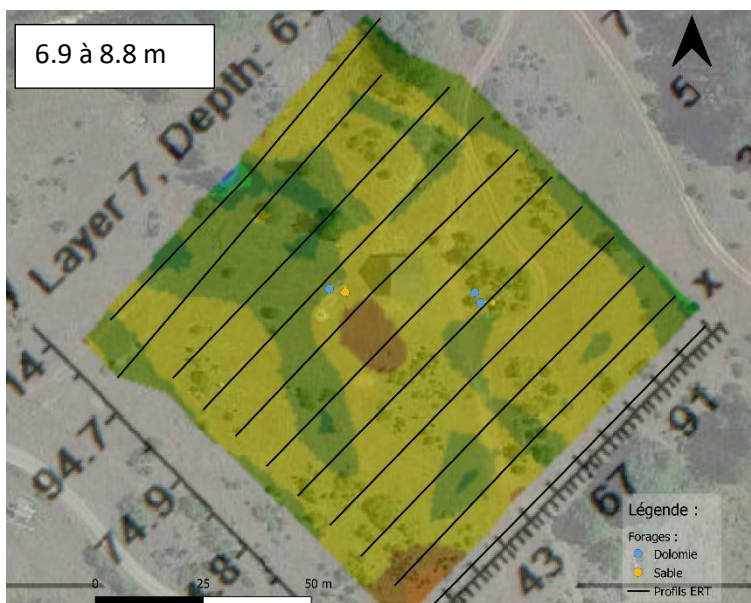
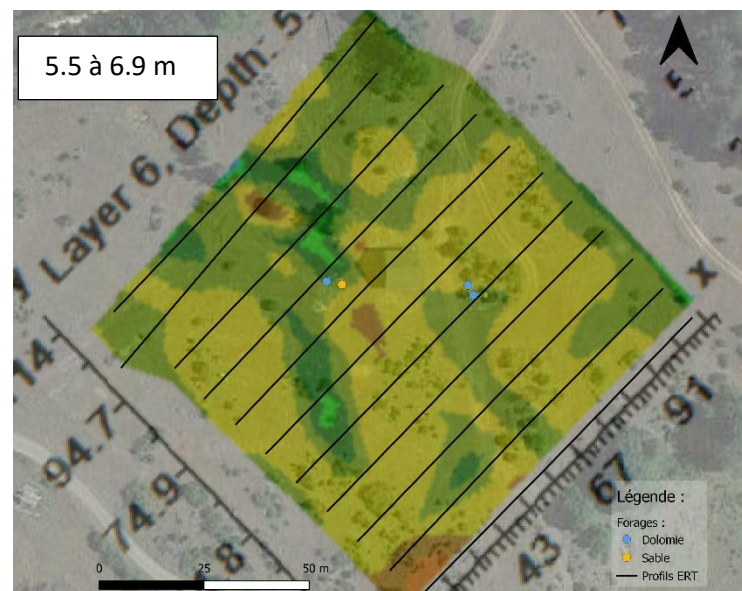
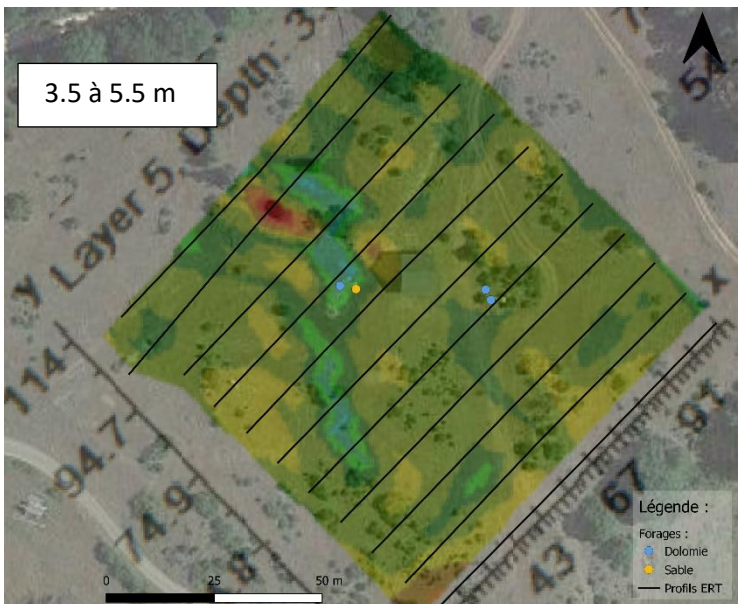
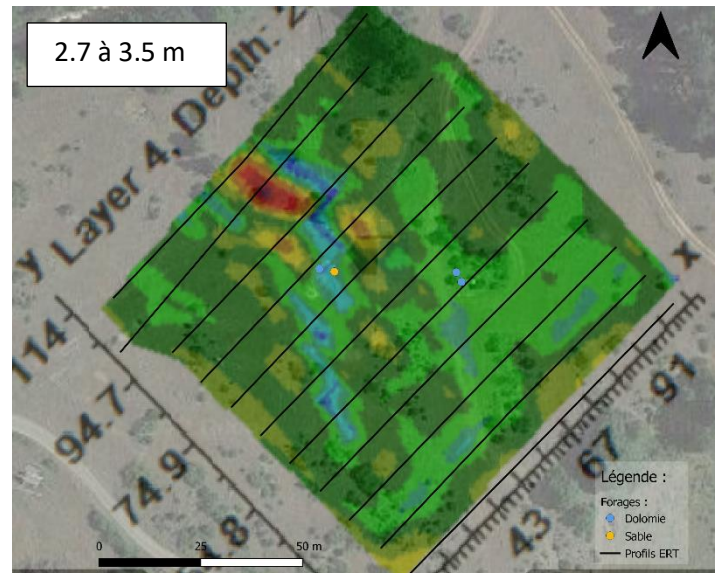
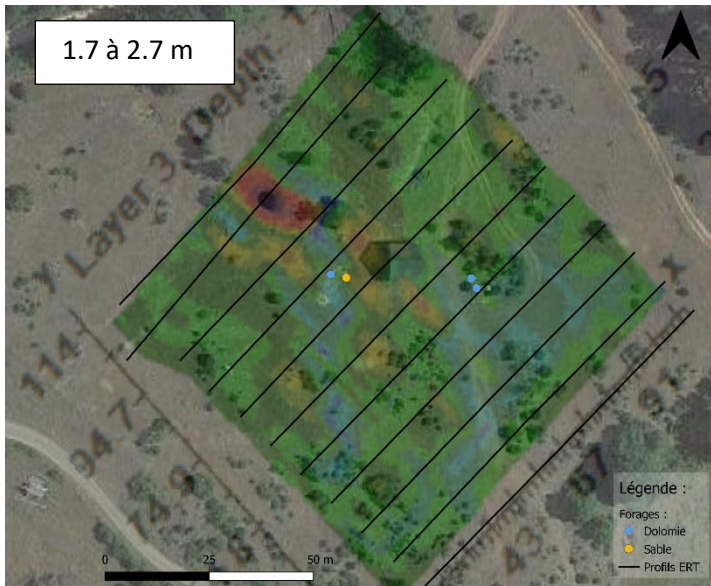
Annexe 8 : Point H/V du 23 avril 2022 sur des zones de sable affleurantes, les bourrasques atteignaient jusqu'à 80 km/h.



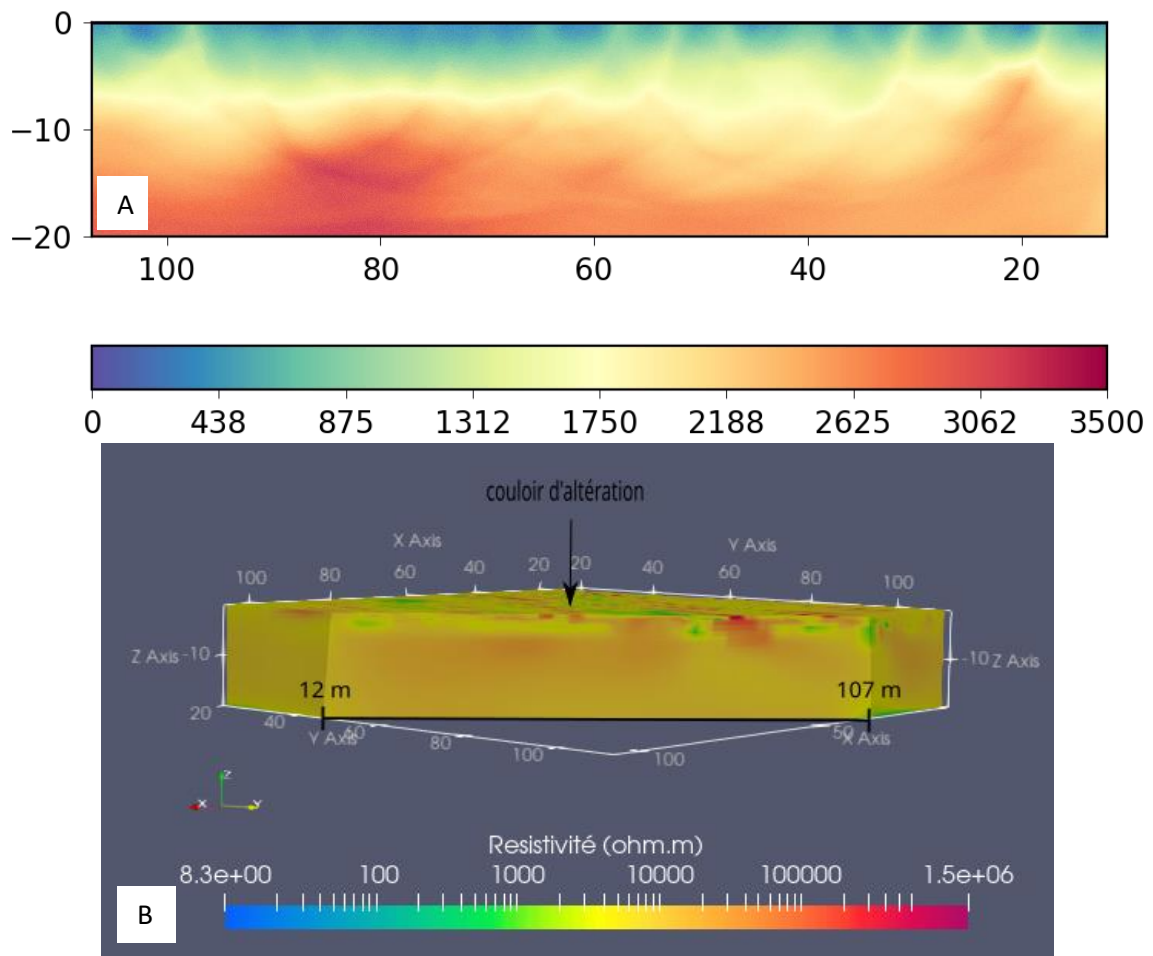


Annexe 9 : Profils ERT sur le site de l'observatoire du Larzac, le numéro des profils est indiqué en bas à gauche de chaque figure.



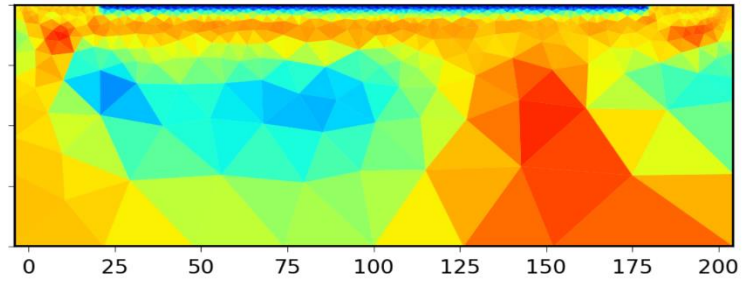
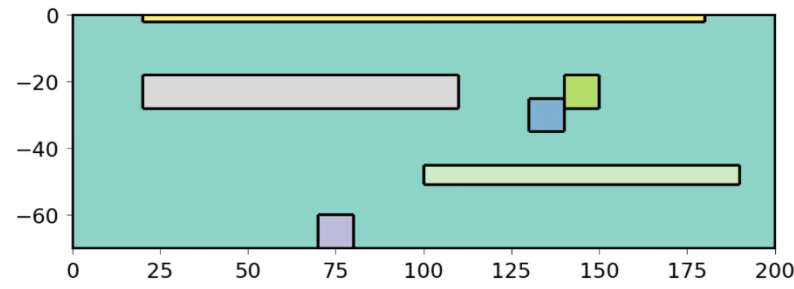


Annexe 10 : Coupe pour chacune des profondeurs 3D.

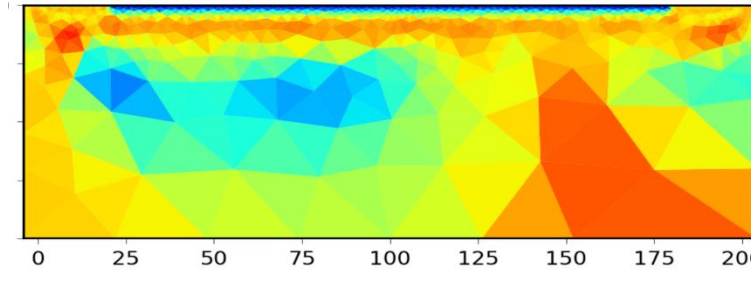
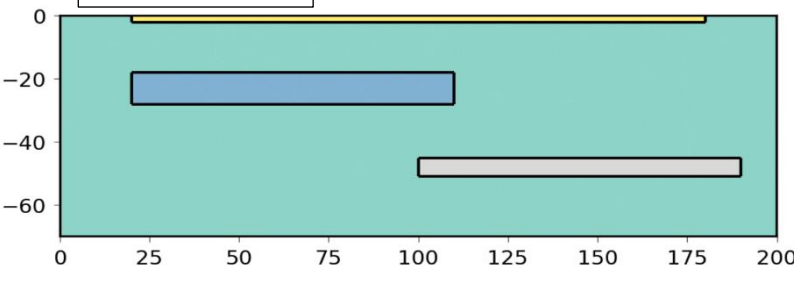


Annexe 11 : Figure A profil sismique, figure B coupe dans le modèle de pseudo 3D.

Avec les cavités



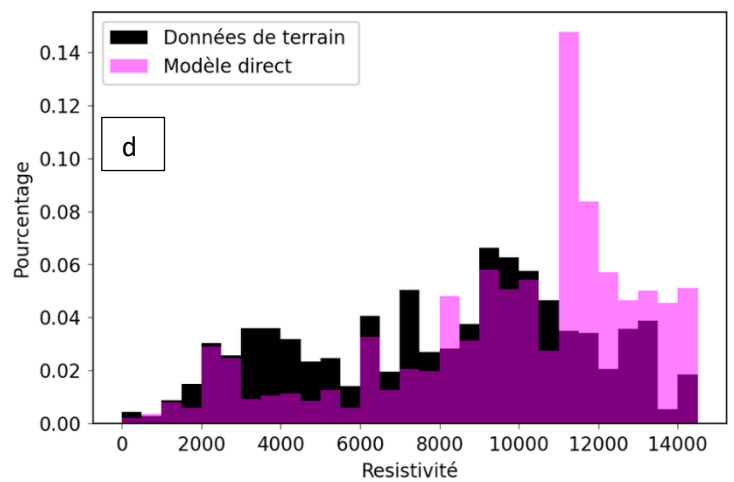
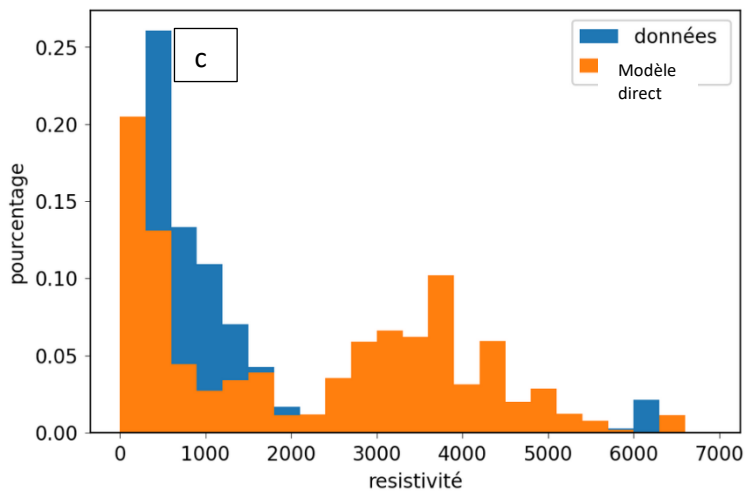
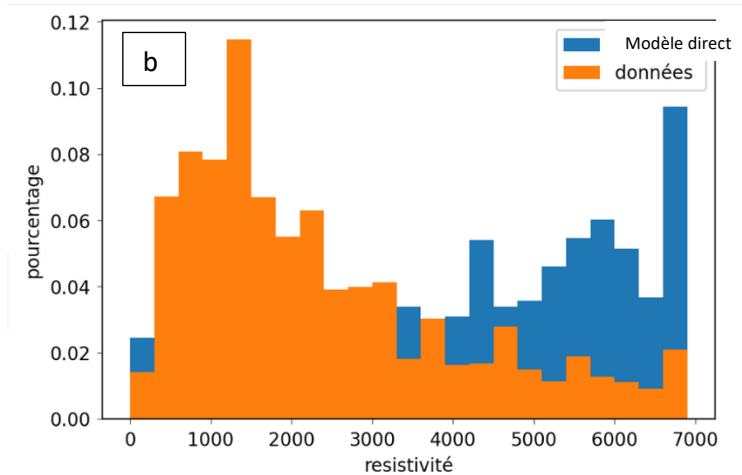
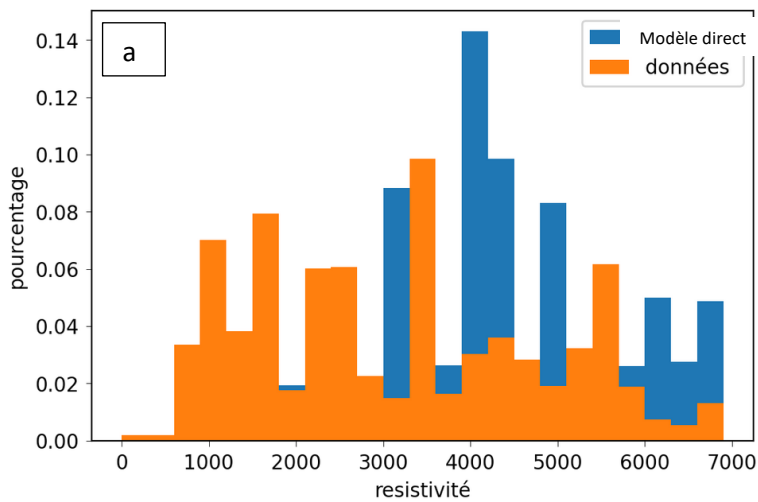
Sans les cavités



Annexe 12 : Différence des inversions en présence des cavités et sans les cavités.

Date expéri		Nom		CALCUL POROSITÉ ET MASSE VOLUMIQUE																
		Dimensions			Volume théorique	Volume cellules (calibrage)		Pressions mesurées		Cales								Volume solide	Porosité	
Echantillon	Forage	Diamètre	Longueur	Masse solide		Date	Mesure	Référence	P ₁	P ₁₂	N°									V _{calT}
Nom	Nom	Profondeur	d	L	M _s	V _T	V ₁	V ₂	P ₁	P ₁₂	2	3	4	5	6	7	8	V _{calT}	V _s	φ
		m	mm	mm	g	cm ³	cm ³	cm ³	bar	bar								cm ³	cm ³	%
4.1			24.57	25.8	30.365	12.233	23.899	6.907	10.390	4.330	0	1	1	0	0	0	0	7.4370	11.527	5.77
4.1			24.57	25.8	30.365	12.233	23.899	6.907	10.339	4.401	0	1	1	0	0	0	0	7.4370	11.343	7.27
4.1			24.57	25.8	30.365	12.233	23.899	6.907	10.336	4.386	0	1	1	0	0	0	0	7.4370	11.371	7.05
4.1			24.57	25.8	30.365	12.233	23.899	6.907	10.338	4.478	0	1	1	0	0	0	0	7.4370	11.184	8.57
4.2			24.37	23.42	27.720	10.924	23.899	6.907	10.334	4.170	0	1	1	1	0	1	0	8.9600	10.266	6.02
4.2			24.37	23.42	27.720	10.924	23.899	6.907	10.333	4.117	0	1	1	1	0	1	0	8.9600	10.364	5.12
4.2			24.37	23.42	27.720	10.924	23.899	6.907	10.333	4.158	0	1	1	1	0	1	0	8.9600	10.288	5.82
7			25.02	38.45	47.962	18.904	23.899	6.907	10.331	3.930	0	0	0	1	0	1	0	1.5230	18.135	4.07
7			25.02	38.45	47.962	18.904	23.899	6.907	10.330	3.948	0	0	0	1	0	1	0	1.5230	18.103	4.24
7			25.02	38.45	47.962	18.904	23.899	6.907	10.330	3.947	0	0	0	1	0	1	0	1.5230	18.105	4.23
8			24.80	26.78	33.549	12.936	23.899	6.907	10.330	3.670	0	1	1	0	0	0	0	7.4370	12.656	2.17
8			24.80	26.78	33.549	12.936	23.899	6.907	10.330	3.640	0	1	1	0	0	0	0	7.4370	12.704	1.79
8			24.80	26.78	33.549	12.936	23.899	6.907	10.329	3.675	0	1	1	0	0	0	0	7.4370	12.647	2.23
9			24.61	24.8	17.618	11.797	23.899	6.907	10.329	5.860	0	1	1	0	1	0	0	8.2420	6.600	44.05
9			24.61	24.8	17.618	11.797	23.899	6.907	10.329	5.870	0	1	1	0	1	0	0	8.2420	6.564	44.35
9			24.61	24.8	17.618	11.797	23.899	6.907	10.330	5.870	0	1	1	0	1	0	0	8.2420	6.566	44.34
15			25.05	16.8	18.757	8.280	23.899	6.907	10.380	5.004	0	1	1	1	1	1	1	10.1610	7.309	11.72
15			25.05	16.8	18.757	8.280	23.899	6.907	10.328	5.039	0	1	1	1	1	1	1	10.1610	7.157	13.55
15			25.05	16.8	18.757	8.280	23.899	6.907	10.328	5.019	0	1	1	1	1	1	1	10.1610	7.208	12.94
21.1			24.57	35.87	40.469	17.007	23.899	6.907	10.326	4.734	0	0	1	0	0	0	1	2.8441	15.208	10.58
21.1			24.57	35.87	40.469	17.007	23.899	6.907	10.326	4.775	0	0	1	0	0	0	1	2.8441	15.113	11.13
21.1			24.57	35.87	40.469	17.007	23.899	6.907	10.326	4.804	0	0	1	0	0	0	1	2.8441	15.046	11.53
21.2			24.34	20.2	22.438	9.399	23.899	6.907	10.327	4.560	0	1	1	1	1	1	1	10.1610	8.277	11.94
21.2			24.34	20.2	22.438	9.399	23.899	6.907	10.325	4.461	0	1	1	1	1	1	1	10.1610	8.484	9.74
21.2			24.34	20.2	22.438	9.399	23.899	6.907	10.325	4.603	0	1	1	1	1	1	1	10.1610	8.182	12.95
21.3			25.54	24.4	27.644	12.500	23.899	6.907	10.325	4.260	0	1	1	1	0	0	0	8.5490	10.499	16.01
21.3			25.54	24.4	27.644	12.500	23.899	6.907	10.324	4.311	0	1	1	1	0	0	0	8.5490	10.398	16.82
21.3			25.54	24.4	27.644	12.500	23.899	6.907	10.327	4.320	0	1	1	1	0	0	0	8.5490	10.383	16.94

Annexe 13 : tableau des mesures de porosité réalisé par Manon Doucet sur des zones fantômes proche du Rocas.



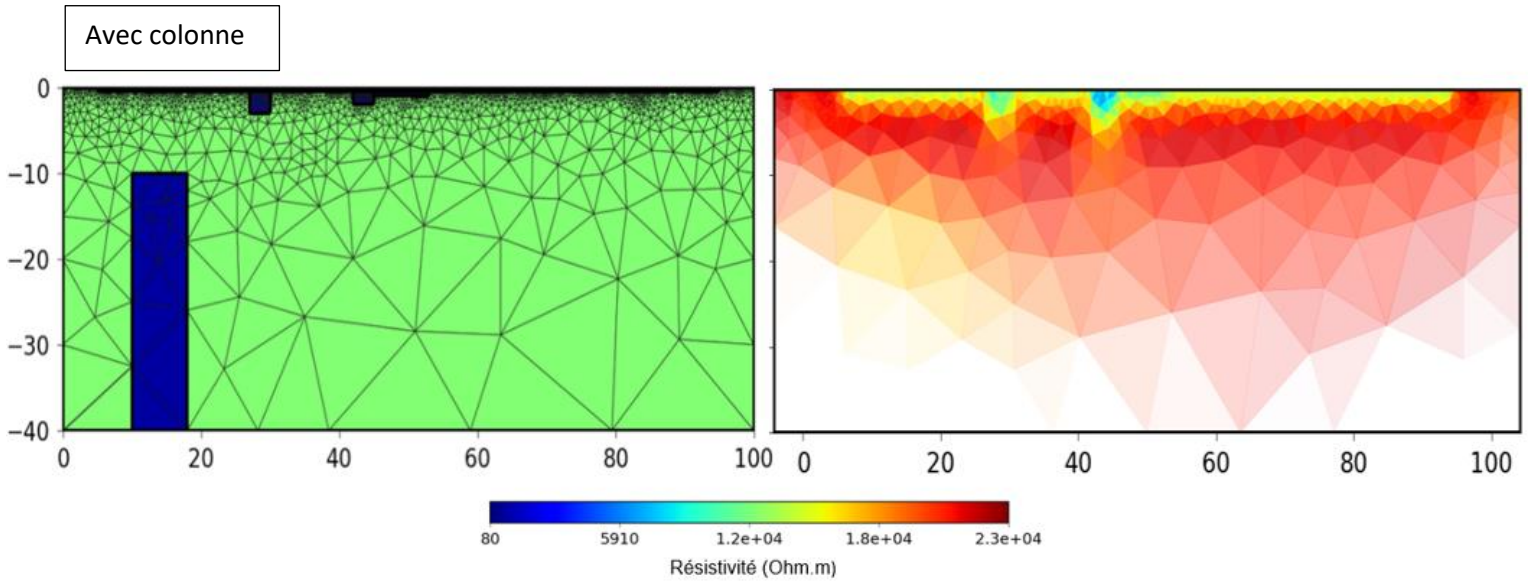
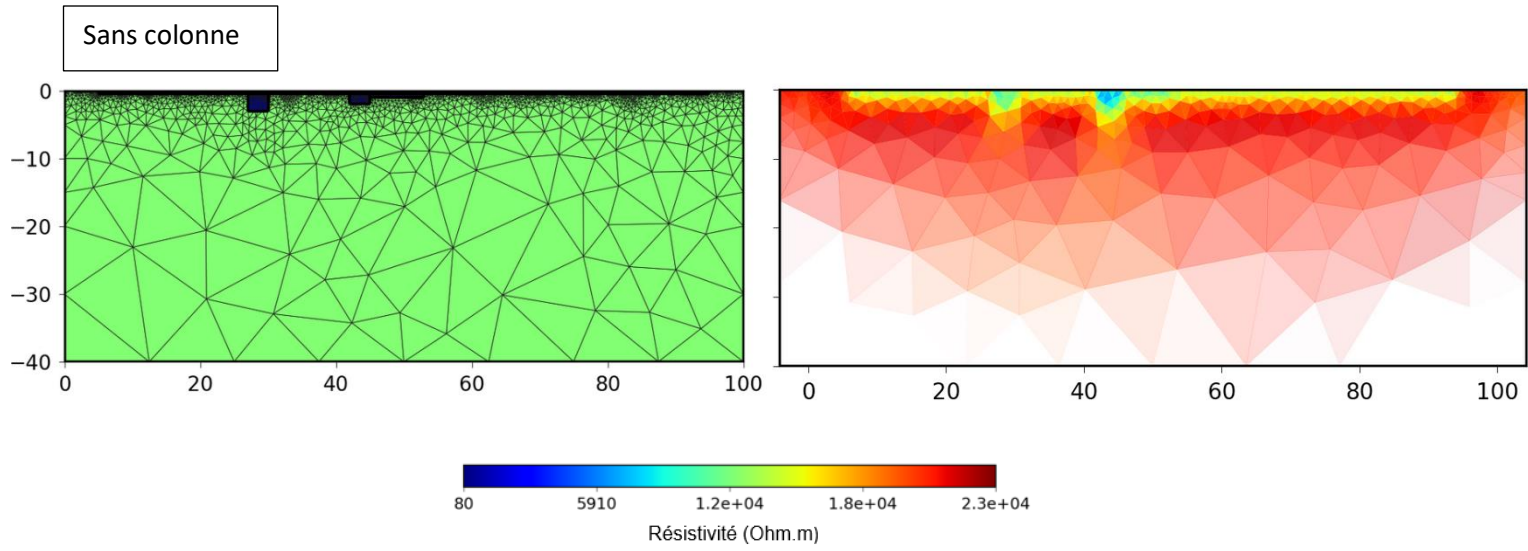
Annexe 14 : Histogramme des résistivités à la suite de l'inversion pour les données acquises sur le terrain et du modèle direct.

A) Aven du cochon avec un espacement entre les électrodes de 2.5 m

B) Aven du cochon avec un espacement entre les électrodes de 5 m

C) Aven du fonctionnaire

D) Site de l'observatoire



Annexe 15 : Variation du volume de fantômes pour des inversions similaires.

Géométrie du bassin versant		
air du bassin versant km ²	100	
profondeur km	0.05	
Volume du bassin versant km ³	5	
Eau srotie du bassin versant	3600*24*365*1	
Eau srotie du bassin versant km ³ /s	0.03	
Cas annexe 15 ci-dessus	Sans colonne	Avec colonne
pourcentage de vide	0.01	0.2
Pourcentage de vide sur la bassin versant	0.05	0.1
Cacul du temps pour vider les vides	0.03/0.05	0.03/0.1
Temps pour vider les fantômes (mois)	20	40

Annexe 16 : Tableau du calcul du volume d'eau dans le fantôme.