

OPTIMISATION DE METHODES GEOPHYSIQUES POUR LA RECONNAISSANCE D'ANCIENNES GALERIES DE MINES

Julien HABERT, Grégory BIEVRE, Vilma ZUMBO.
CETE de Lyon, LR Autun, France.

RÉSUMÉ – Pour détecter les carrières souterraines abandonnées sur la commune d'Ivry-en-Montagne, une étude-test a été réalisée sur une zone restreinte, consistant à mettre en œuvre différentes techniques d'investigations géophysiques, afin de définir un programme ultérieur de reconnaissances optimisé sur l'ensemble de la commune, intégrant les méthodes identifiées comme les plus pertinentes.

1. Introduction

La commune d'Ivry-en-Montagne (région de Beaune, Côte d'Or) a connu jusque dans les années 1960 une activité minière liée à l'extraction souterraine de gypse. Les carrières, situées à environ 40 m de profondeur sous le village et en partie sous la Route Nationale 6, sont aujourd'hui abandonnées et ennoyées. Leurs caractéristiques (extension, taux de défrètement, techniques de soutènements, etc.) sont très mal connues. Ces carrières sont à l'origine de plusieurs effondrements qui ont soulevé la nécessité de déterminer précisément le risque concomitant. Pour cela, la connaissance précise de leur géométrie est une étape préalable indispensable à toute réflexion sur la caractérisation de l'aléa.

Suite à une première phase de synthèse bibliographique, il s'est avéré impossible de dresser une cartographie précise des galeries. Celles-ci sont de plus ennoyées, ce qui interdit tout accès direct. Les contraintes du site (inaccessibilité des carrières, toit de l'exploitation à 40 m de profondeur) imposent alors une méthodologie de reconnaissance indirecte et la moins invasive possible. Dans ce cadre, l'emploi des méthodes géophysiques semble adapté.

Afin de tester la pertinence des techniques géophysiques, une phase de test s'est déroulée au droit d'une zone restreinte, aux caractéristiques géométriques relativement bien connues. La suite de ce document présente les méthodes mises en œuvre dans le cadre de ce test et expose les résultats obtenus.

2. Contexte

Le village d'Ivry-en-Montagne est en partie situé sur un plateau calcaire d'âge sinémurien parcouru par un faisceau de failles (cf. Fig. 1). Les niveaux gypsifères se trouveraient entre 30 et 40 mètres de profondeur dans les formations argilo-évaporitiques du Trias (COUREL, 1980 ; DEBRAND-PASSARD et al, 1984). L'épaisseur de la couche exploitée serait variable (entre 1m à 9m). D'un point de vue hydrogéologique, le site comporte deux nappes perchées.

Les carrières de gypse étaient exploitées par chambres et piliers. Pour le site d'Ivry-en-Montagne, le taux de défrètement est estimé à 70%, ce qui est élevé pour ce genre de formations, où le taux habituel et moyen est de l'ordre de 50%. Les carrières sont aujourd'hui ennoyées, ce qui les rend inaccessibles et laisse craindre une dissolution du gypse constitutif des piliers (dont la concentration peut atteindre 2.6 g.l^{-1}).

Une première phase d'étude a consisté à rassembler les informations disponibles et à consulter, notamment, les archives départementales et les propriétaires des anciennes exploitations. Ceci a permis de recenser et de situer approximativement plusieurs exploitations industrielles (cf. Fig. 2). Le toit des exploitations a pu être estimé à 40 m de profondeur, pour une épaisseur des galeries variant entre 1 et 9 m.

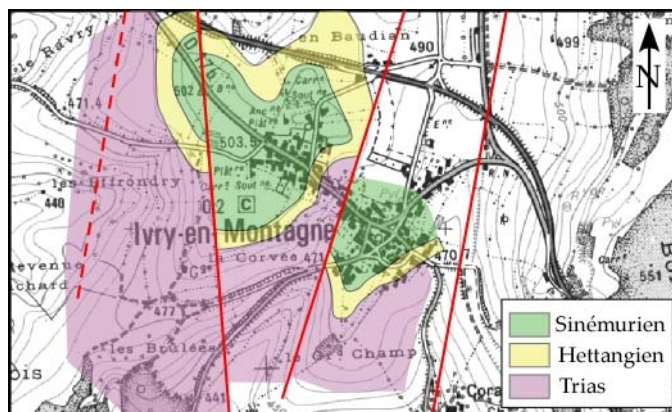


Figure 1. Carte géologique interprétative du site d'Ivry-en-Montagne. L'accident le plus oriental correspond à une grande faille normale qui sépare deux compartiments structuraux.

Néanmoins, certaines galeries ne sont pas encore connues, car relevant d'exploitations privées (cf. Fig. 2) elles nécessitent une reconnaissance approfondie pour permettre de dresser la cartographie complète des cavités sur la commune d'Ivry-en-Montagne.

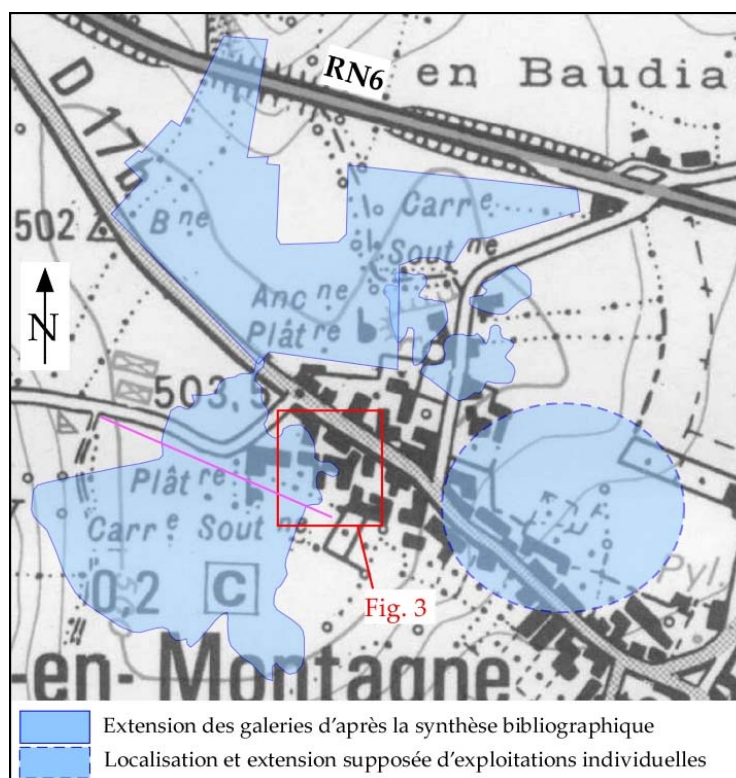


Figure 2. Cartographie synthétique des galeries souterraines d'Ivry-en-Montagne suite à la consultation d'archives. Le trait mauve indique la position d'un panneau électrique.

3. Méthodologie retenue

Afin de tester la pertinence des méthodes géophysiques, une phase de test a été réalisée au droit d'une zone restreinte aux caractéristiques géométriques *a priori* connues (relevé géomètre à la fermeture d'une des exploitations). Au vu des contraintes imposées par la position des galeries (profondeur, diamètre supposé, etc.) ainsi que des contextes géologique (niveaux

argilo-évaporitiques) et hydrogéologique (2 nappes perchées, galeries ennoyées), les méthodes de surface semblent peu adaptées et la préférence est allée vers des techniques en forage.

Parmi les différentes techniques envisagées, les méthodes de reconnaissance suivantes ont été retenues :

- Le **panneau électrique** est une technique géophysique de surface qui détermine les répartitions latérales et verticales de la résistivité. L'écartement des électrodes du dispositif, le choix du protocole de mesures et la résistivité du sous-sol ont une influence sur la profondeur d'investigation et la résolution.
- Le **cylindre électrique** est une technique qui permet une reconnaissance radiale des terrains autour du forage. Des électrodes d'émission et de réception disposées dans le trou du forage sont utilisées pour mesurer des différences de potentiels électriques. Cette méthode permet de savoir s'il y a une cavité à proximité du forage mais pas de la localiser. Elle est susceptible également de localiser une zone de décompression du calcaire.
- Une cartographie localisée par **mise à la masse** a été testée autour de deux forages. Ces derniers ont servi à descendre une électrode d'injection au niveau des galeries ennoyées et à utiliser ces dernières comme corps conducteur. Des électrodes implantées en surface mesurent les différences de potentielles induites.
- La **tomographie électrique** est une méthode qui détermine des variations de résistivité apparente entre deux forages (un forage sert à l'émission et un forage sert à la réception) par le biais de lignes d'électrodes. Il est à noter que la résolution de cette technique dépend de la distance entre les forages et de l'espacement des capteurs dans les forages.
- Le **sonar** en forage était initialement prévu. Pour des questions de sédimentation à l'intérieur de la colonne de forage puis d'impossibilité d'enlever le tubage, cette auscultation n'a pu être réalisée. Elle a été remplacée par du **radar** en forage.
- La diagraphie de **radioactivité naturelle** (RAN ou gamma-ray) a été systématiquement mise en œuvre. Ceci permet de caler les différents niveaux lithologiques entre eux et de vérifier l'absence de faille (cf. Fig. 1) au droit du site-test.

Pour mettre en œuvre ces différentes techniques, il reste indispensable d'effectuer des forages, ce qui a conduit à réaliser 2 sondages carottés et 3 sondages destructifs profonds de 50 m chacun. Ces sondages ont été espacés de 25 m les uns des autres afin de conserver un pouvoir de détection et une résolution suffisants pour caractériser les cavités. Les différents sondages ont été équipés de tubage PVC crépiné. L'implantation définitive des forages est reportée sur la figure 3.

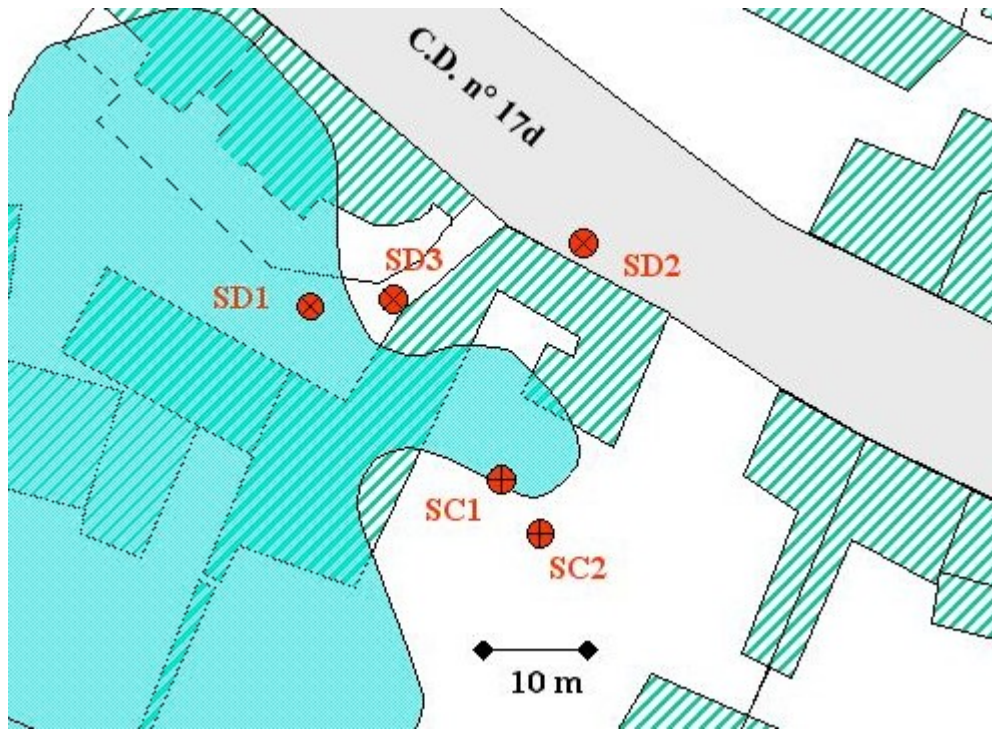


Figure 3. Implantation des sondages sur la zone test et position de la cavité connue. Il est à noter que, suite à la réalisation des reconnaissances mécaniques, il existe une légère différence entre les géométries supposées et réelles.

4. Résultats

4.1. Sondages mécaniques

D'un point de vue géologique, on trouve du remblai et/ou des terrains déstructurés sur les 3 premiers mètres. Puis, de 3 à 19 m, on se situe dans des terrains rhétiens (grès, mudstones, marnes, argiles) qui surmontent les formations du Keuper terminal (Carnien supérieur et Norien), constitués d'argiles et de dolomies principalement, que l'on rencontre jusqu'à 24 m de profondeur environ. En dessous se trouvent les formations salifères qui contiennent les niveaux de gypse exploité.

Les sondages montrent que le toit des cavités se situe à une profondeur de 30 m, indication étonnante par rapport à la profondeur attendue de 40 m résultant de l'analyse bibliographique et de l'interview des anciens exploitants. Ces valeurs sont d'autant plus surprenantes que les forages ont été effectués au « sommet » du village, c'est à dire à l'endroit où la profondeur devait être la plus importante (cf. Figs. 1 & 2).

L'épaisseur moyenne des cavités traversées lors des sondages est de 4 m. Ces sondages étant réalisés en bordure d'exploitation, il n'est pas surprenant que les épaisseurs exploitées ainsi trouvées soient inférieures à celles annoncés par l'étude bibliographique (à comparer aux 8-9 m initialement annoncés pour cette partie de la carrière).

4.2. Panneau électrique

Un panneau électrique de 290 m de long avec un espacement unitaire d'électrodes de 5 m et réalisé en protocole pôle-dipôle est présenté sur la figure 4. Sa position est précisée sur la figure 2. Il a été réalisé au droit d'une zone anciennement exploitée.

Les résultats indiquent une répartition sub-tabulaire selon 3 niveaux principaux : conducteurs (20-60 ohm.m) de 0 à 15 m et de 40 à 60 m de profondeur, puis un niveau plus résistant (100-150 ohm.m) de 15 à 40 m. Ces résultats sont contradictoires par rapport à la réalité puisque les

galeries, ennoyées avec de l'eau chargée en minéraux, et situées de 30 à 35 m de profondeur ressortent ici comme un niveau résistant. Il semble alors que cette technique de prospection depuis la surface n'est pas adaptée à la caractérisation des galeries souterraines sur le site étudié.

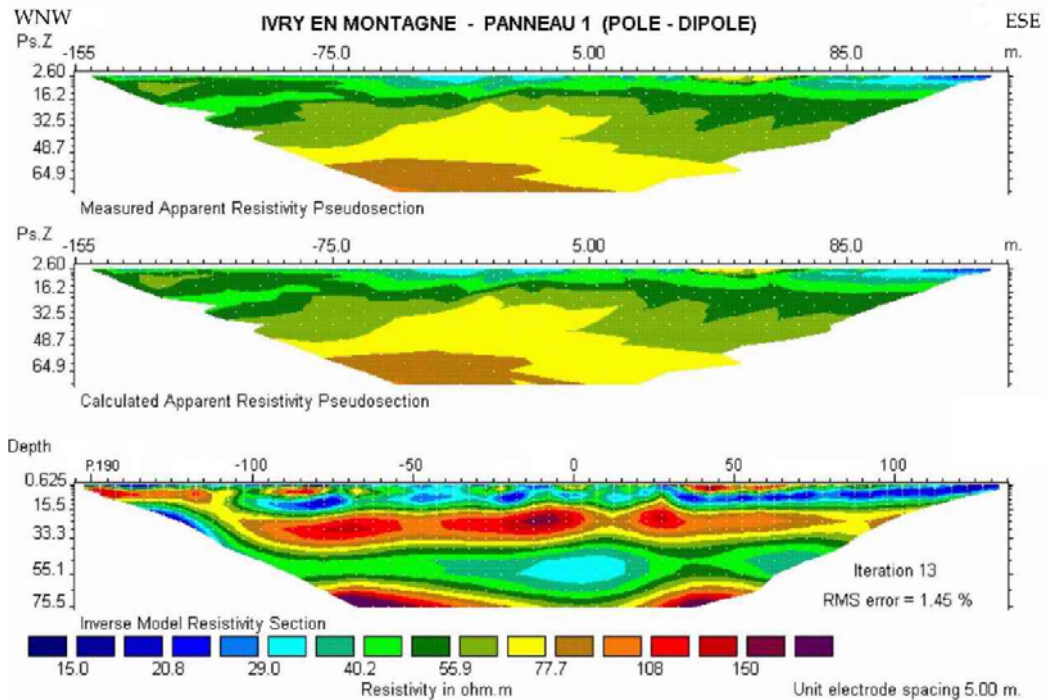


Figure 4. Panneau électrique réalisé à Ivry-en-Montagne. L'implantation est précisée sur la figure 2 (Document DDE21 ; mesures réalisées par EDG).

4.3. Cylindre électrique

La figure 5 présente 3 cylindres électriques réalisés sur le site-test (position des forages sur Fig. 3). Les valeurs de résistivité apparente fournies ici sont des moyennes sur l'ensemble de l'auscultation 3D autour de la colonne de forage.

La mesure étalon, dans le forages SD2 (*i.e.* sans cavité), indique une séparation en deux niveaux, les terrains au-dessus de 25 m étant globalement plus conducteurs que les niveaux sous-jacents. Ceci correspond à la réalité géologique (cf. paragraphe 4.1) et permet de préciser que cette méthode fournit une très bonne résolution verticale.

La mesure dans un forage ayant rencontré une cavité indique une très bonne définition du toit et de la base de la galerie (forage SC1, Fig. 5). Finalement, la mesure dans un forage situé à proximité d'une cavité montre l'influence des niveaux conducteurs de cette dernière sur la mesure.

Le cylindre électrique fournit une très bonne résolution verticale, il permet de définir précisément le toit ainsi que la base des cavités. Son utilisation semble intéressante dans le cas où un forage n'a pas rencontré de vide (rempli d'eau dans le cas présent) et que l'on veut s'assurer de la présence, ou non, d'une cavité dans son proche environnement.

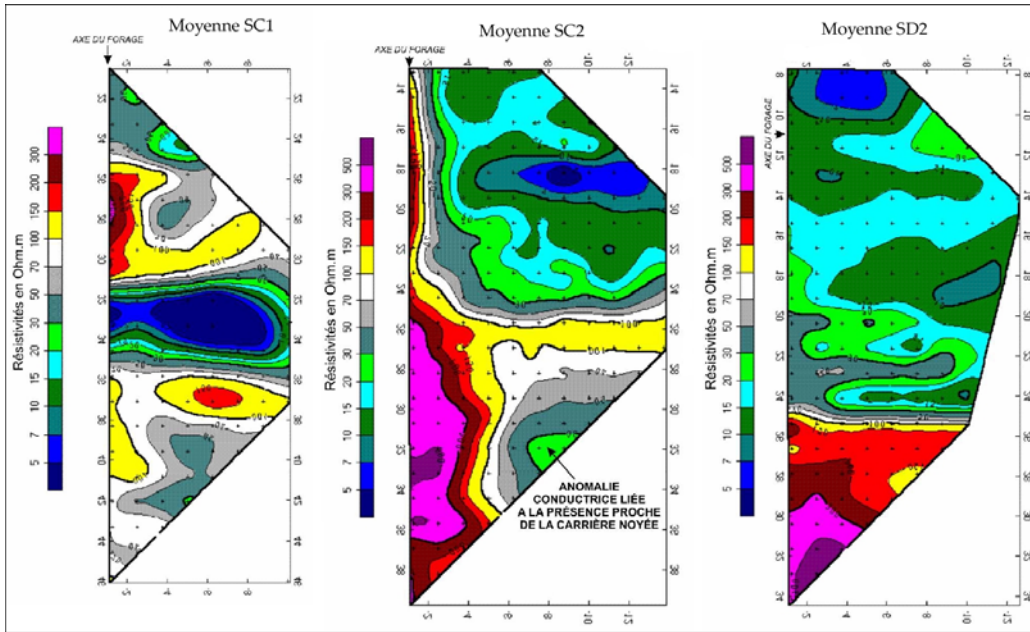


Figure 5. Cylindres électriques réalisés sur le site-test dans 3 forages (Document DDE21 ; mesures réalisées par EDG).

4.4. Les tomographies

La figure 6 présente les résultats de deux tomographies électriques réalisées dans des configurations différentes. La tomographie de gauche a été réalisée entre les forages SD2 et SD3, entre lesquels il n'y pas de cavité a priori (cf Fig. 3). La tomographie de droite a été réalisée entre les forages SC2 et SD3, entre lesquels se trouve la cavité, ce qui donne une anomalie conductrice beaucoup plus marquée retrouvée entre 30 et 36 m de profondeur.

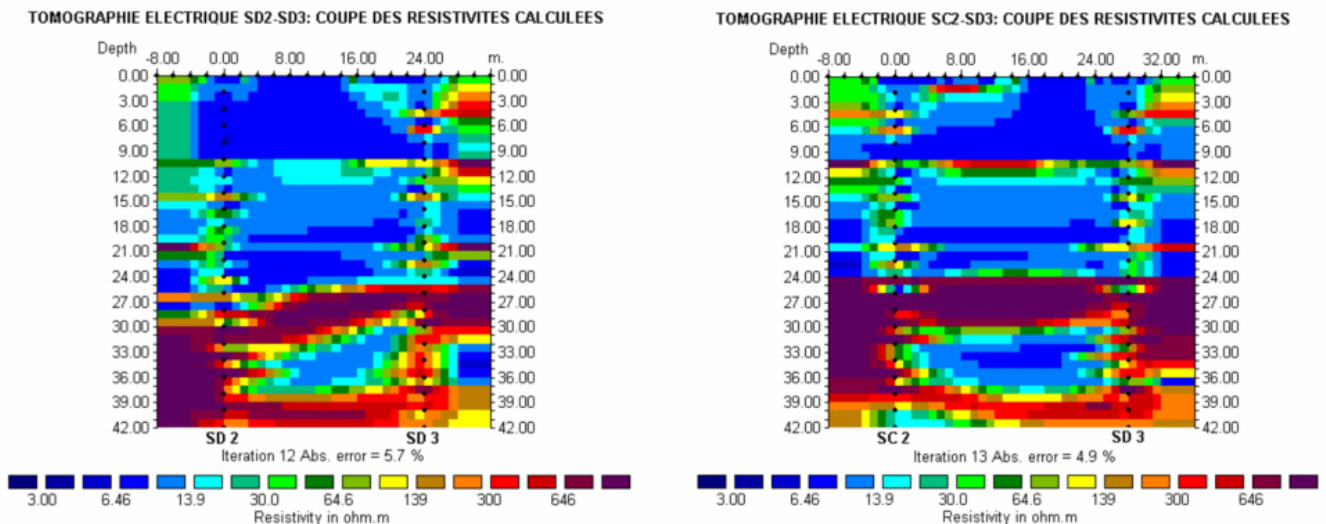


Figure 6. Comparaison de tomographies électriques entre les forages SC2 et SD2 ; mesures électriques réalisées par EDG. Document DDE21.

Il est à noter que cette méthode ne retransmet pas le profil électrique réel d'un plan passant par les deux sondages, mais bien une intégration volumique autour de ce plan, ce qui explique l'anomalie conductrice retrouvée entre les forages SD2 et SD3, bien qu'il n'y ait pas de cavité directement entre les deux forages.

4.5. Sonar et radar en forage

Pour des questions d'impossibilité de retirer le tubage provisoire et de sédimentation dans la colonne de forage, il n'a pas été possible de mettre en œuvre le sonar. Néanmoins, cette technique reste intéressante dans la mesure où elle est réalisée immédiatement après la fin de foration, ou bien si le tubage installé ne descend pas plus bas que le toit des galeries repérées.

Afin de trouver une technique de remplacement, le radar en forage a été testé. Les fréquences d'auscultation utilisées (400 et 100 MHz) n'ont pas permis de mettre en évidence une quelconque réflexion. Ceci est vraisemblablement à mettre sur le compte d'une eau très conductrice (d'un point de vue électrique) empêchant la propagation des ondes électromagnétiques dans la structure à reconnaître.

4.6. Mise à la masse

Le forage SC2 a permis de descendre une électrode d'injection au niveau des galeries ennoyées et à utiliser celles-ci comme conducteur. Des électrodes implantées en surface mesurent la différence de potentiel suite à l'injection du courant. Les résultats se présentent sous la forme de cartes de potentiel (Fig. 7). Les résultats indiquent une bonne adéquation générale entre la géométrie supposée des galeries et la carte des potentiels (cf. Fig. 3)

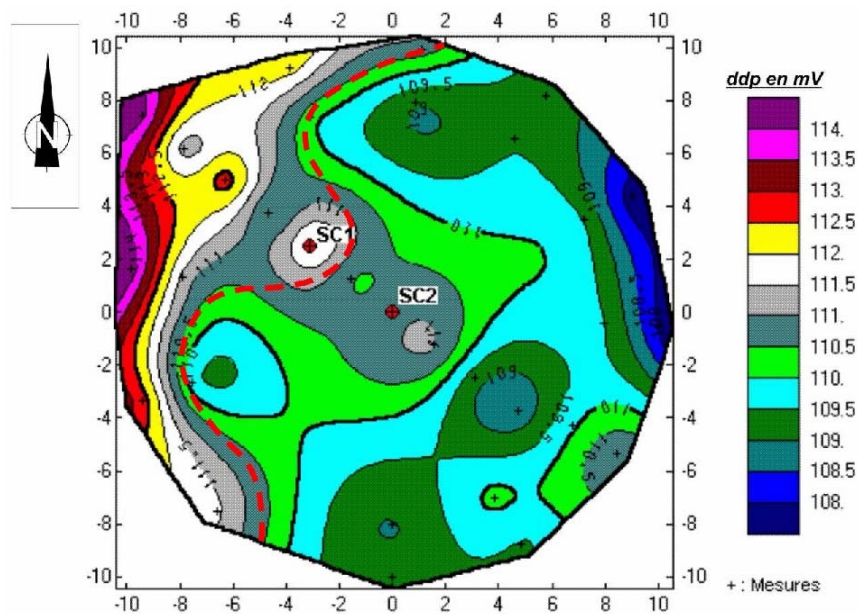


Figure 7. Cartographie par mise à la masse. Mesures réalisées par EDG, document DDE21.

5. Synthèse et conclusions

Au vu des différentes méthodes testées, les conclusions suivantes peuvent être établies :

- Les mesures par panneau électrique se révèlent peu adaptées aux cibles recherchées. De même, le radar en forage semble inopérant sur le site,
- Les mesures de cylindre électrique se sont révélées intéressantes pour préciser la présence d'une cavité ennoyée dans le proche environnement d'un forage,
- Les tomographies électriques mettent en évidence la présence de galeries ennoyées, dans le plan situé entre les deux forages (forte anomalie conductrice) ou dans le proche environnement de ce plan (anomalie plus réduite). Ceci est dû au fait que les méthodes

électriques sont généralement intégrantes. Toutefois, l'absence d'anomalie conductrice sur les mesures peut indiquer qu'aucune galerie ennoyée n'est présente dans la « région » de mesures.

- L'essai de cartographie par mise à la masse s'est révélé pertinent, avec une localisation relativement précise d'anomalies qui correspondent aux galeries,

Enfin la résolution attendue par les tomographies électriques s'est révélée assez sensible. En effet la distance entre forages (25 m) avait été choisie pour détecter des carrières épaisses de 8m. Avec ce maillage, des carrières épaisses de 4 m ont pu être effectivement détectées.

Cette phase de test préliminaire, sur une zone *a priori* connue, s'est révélée indispensable : elle a permis de préciser la profondeur du toit des galeries, d'identifier les méthodes adaptées au site et d'écartier d'autres moyens de reconnaissances, qui pourraient être mis en oeuvre dans un autre contexte (panneaux électriques difficiles à interpréter, notamment en raison du contexte hydrogéologique complexe, etc.).

Cette étude a débouché sur la proposition d'un programme de reconnaissances sur l'ensemble de la commune, pour cartographier la totalité des galeries souterraine.

6. Références bibliographiques

COUREL L. (1970) - Trias et Rhétien de la bordure nord et est du Massif Central français. Modalités de la transgression mésozoïque. - Thèse de Doctorat, Université de Bourgogne, Dijon.

DEBRAND-PASSARD S., COURBOULEIX S. & LIENHARDT M.-J. (1984) - Synthèse géologique du sud-est de la France - Stratigraphie et paléogéographie. - Mémoires du BRGM, vol. 125, BRGM Editions, Orléans.