

COMPARAISON DE 2 METHODES GEOPHYSIQUES POUR L'AUSCULTATION D'UN PILIER DE CARRIERE SOUTERRAINE

COMPARISON OF 2 GEOPHYSICAL METHODS FOR THE ASSESSMENT OF AN UNDERGROUND QUARRY PILLAR

Ludovic DORE¹, Yannick FARGIER^{1,2}, Sérgio PALMA LOPES³, Raphael ANTOINE⁴, Cyrille FAUCHARD⁴

¹ Cerema, DTer Normandie Centre, Blois, France

² Ifsttar, GERS, Bron, France

³ LUNAM Université, Ifsttar, GERS, Nantes, France

⁴ Cerema, DTer Normandie Centre, Rouen, France

RÉSUMÉ – Les méthodes géophysiques permettent d'évaluer l'état de santé des piliers de carrières souterraines. Deux méthodes d'imagerie de résistivité électrique sont employées sur un pilier de carrière souterraine à Vendôme, France. La première méthode est dite à haute résolution alors que la seconde est à haut rendement. Les résultats sont cohérents et mettent en évidence une zone potentiellement plus faible dans le pilier.

ABSTRACT – Geophysical methods can assess the health of underground quarry pillars, the failure of which can lead to a collapse. Two Electrical Resistivity imaging approaches are used on an underground quarry located in Vendôme, France. The first is high-resolution while the second is a high-output technique. The two results are consistent: both detect a potentially weaker area in the pillar.

Introduction

En France, la dégradation naturelle des cavités souterraines peut mener à leur effondrement, provoquant ainsi des dommages potentiellement très importants. Ces événements sont considérés comme un enjeu sociétal majeur (Collectif, IFSTTAR 2014). Récemment, une nouvelle méthode d'auscultation de piliers de carrières a été proposée (Fargier et al, 2017), basée sur l'usage séquentiel de la photogrammétrie et de la Tomographie de Résistivité Electrique 3D (TRE). Ces travaux ont montré qu'une mauvaise prise en compte de la géométrie du pilier lors de l'inversion peut provoquer d'importants artefacts. L'étude montre également que l'utilisation de la photogrammétrie (Chandler et al., 2005 ; Fauchard et al., 2013) pour obtenir une description précise du pilier permet d'atténuer grandement ces artefacts.

Les deux inconvénients principaux de cette méthode d'auscultation sont son coût important et la possibilité d'obtenir des artefacts résiduels dans le résultat de la tomographie. En raison de ces inconvénients, une seconde méthode a également été testée sur le même pilier de carrière (située à Vendôme, Loir-et-Cher). Elle est basée sur l'utilisation d'un appareil de mesure de résistivité de surface constitué de 4 électrodes espacées d'environ 5 cm et permettant une profondeur d'investigation d'environ 3 cm.

La première partie de cet article présente les campagnes d'acquisition mises en œuvre pour les deux méthodes, la seconde compare les résultats obtenus.

Campagnes d'acquisition

La Glacière est une ancienne carrière souterraine de calcaire située à Vendôme (Loir-et-Cher) et exploitée du XVII^e au XIX^e siècle. La figure 1 présente le plan de la carrière ainsi qu'un grossissement du pilier sur lequel est réalisé les campagnes d'acquisition.

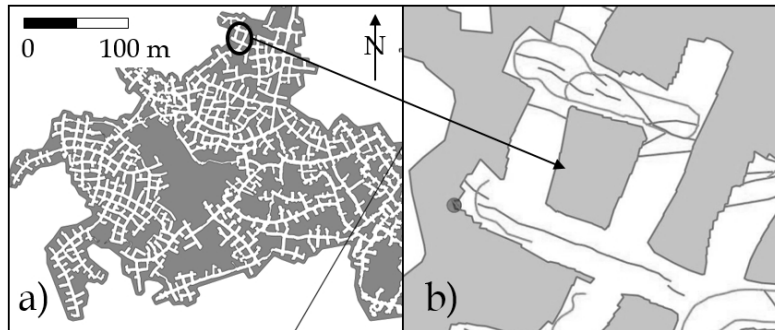


Figure 1 : a) Plan de la carrière de Vendôme avec b) un élargissement au niveau du pilier ausculté

La Tomographie de Résistivité Electrique a été menée en plaçant trois ceintures d'électrodes autour du pilier, à 1 m, 1.5 m et 2 m de hauteur (appelées respectivement H1, H2 et H3 sur la figure 2). Chaque ceinture comprend 63 électrodes, l'espacement entre chaque étant d'environ 40 cm. La figure 2 présente une photo du pilier ausculté avec la position de ceintures d'électrodes sur le pourtour du pilier. La ligne verticale sur cette figure montre la position de l'électrode numéro 33 sur les trois hauteurs, la ligne pointillée est le tracé d'une fissure. Le temps total d'acquisition et de traitement est estimé à 10 jours environ.

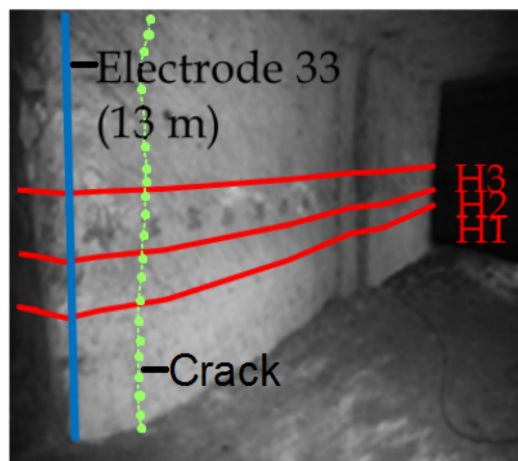


Figure 2 : Photographie d'un côté du pilier avec position des ceintures d'électrode.

La résistivité de surface a été mesurée à sept hauteurs différentes espacées de 25 cm. Pour chaque hauteur, 64 mesures ont été effectuées à intervalles réguliers tout autour du pilier avec un espacement d'environ 40 cm. La figure 3 présente une vue éclatée de la surface du pilier avec la position des mesures de résistivité de surface. Elle présente également les limites de chaque côté du pilier (pointillés verticaux), ainsi que la fissure évoquée sur la figure 2 (trait plein à proximité de l'électrode 33). L'appareil de mesure de résistivité de surface possède un espacement inter-électrodes de 5 cm, permettant une profondeur d'investigation d'environ 3 cm. A chaque emplacement, la mesure a été réalisée horizontalement et verticalement et chaque mesure a été effectuée trois fois (afin

d'estimer l'erreur liée à la mesure). Le temps d'acquisition et de traitement est estimé à 1 jour environ.

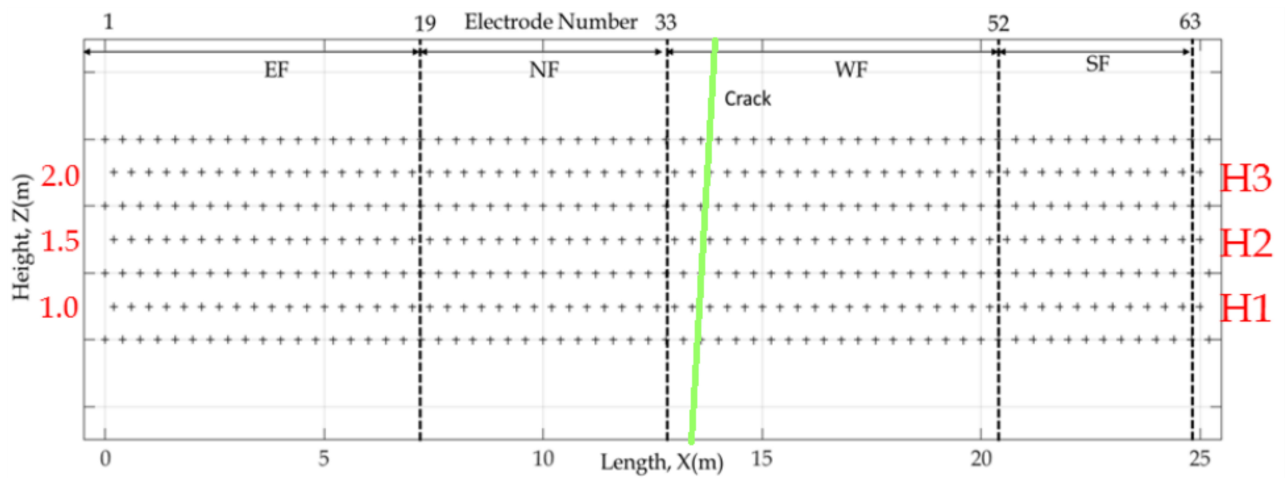


Figure 3 : Emplacement des mesures de résistivité de surface.

La Tomographie de Résistivité Electrique a été mise en œuvre en février 2016, tandis que les mesures de résistivité de surface ont été réalisées en novembre de la même année.

Résultats et discussion

Le traitement photogrammétrique nécessaire à la méthode 3D a été effectué avec le logiciel open source MicMac (Pierrot-Deseilligny et Clery, 2011) à partir d'une centaine de photographies. Le modèle obtenu a été calibré en utilisant 183 points de contrôle obtenus par mesure laser. La figure 4 présente le modèle 3D du pilier, ainsi que la densité de points sur une partie du modèle.

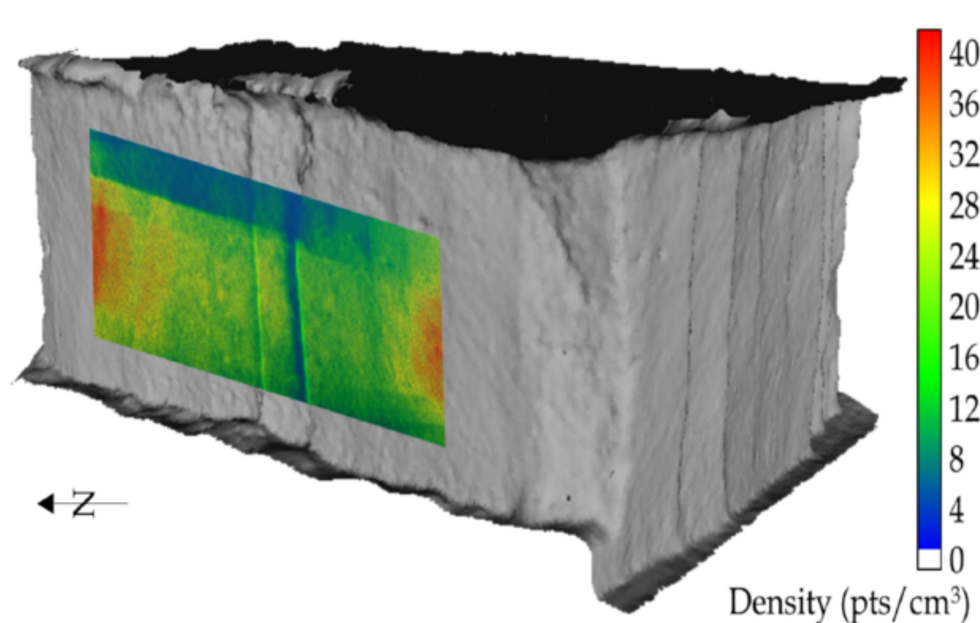


Figure 4 : modèle photogrammétrique du pilier

L'inversion des données de résistivité apparente a été réalisée grâce au code ERESI (Fargier et al. 2017) avec l'aide du modèle photogrammétrique précédent. La figure 5 montre trois coupes horizontales du résultat de cette inversion, extraites au niveau des trois ceintures d'électrodes.

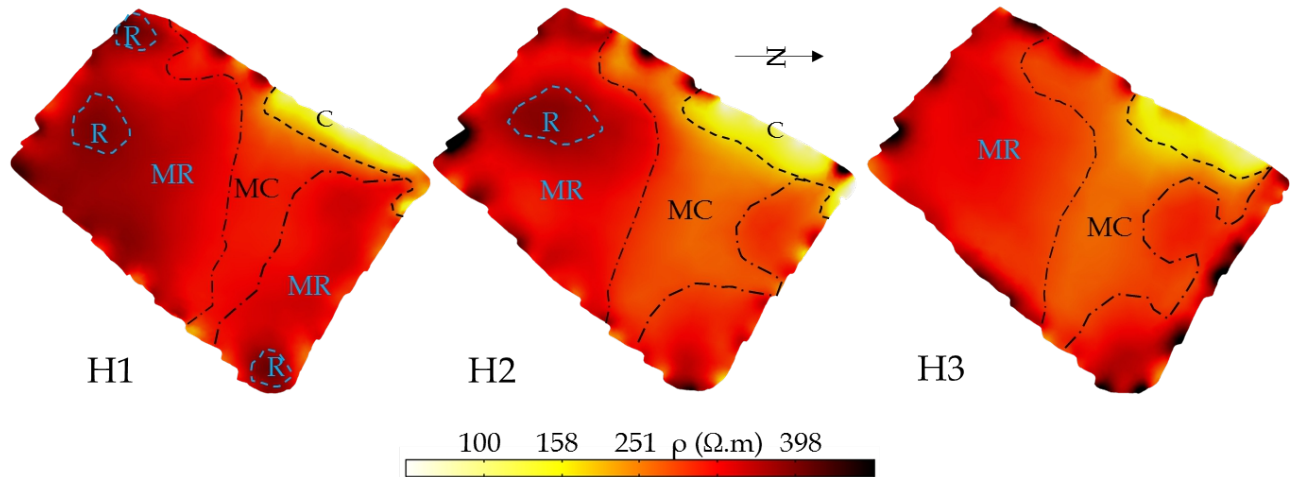


Figure 5 : coupes extraites du résultat de l'inversion

Les résistivités obtenues sont comprises entre 80 et 500 $\Omega.m$. Quelques artefacts résistants sont observés à proximité des électrodes ; ils peuvent s'expliquer par de légères imprécisions dans le modèle 3D et/ou par du bruit dans les données mesurées. Une zone de faible résistivité (environ 160 $\Omega.m$) se situe au nord-est du pilier (zone appelée « C » sur la figure 5).

Elle suggère une teneur en eau plus haute à cet endroit et donc des propriétés mécaniques plus faibles (Kortnik, 2009 ; Fauchard et Pothérat, 2004). Cette interprétation est confortée par le fait que la fissure évoquée précédemment (cf figure 2) se trouve dans cette zone. Une zone de résistivité moyenne (autour de 250 $\Omega.m$) peut être observée à l'est de la zone de faible résistivité. De manière générale, la résistivité semble plus forte en bas du pilier : alors qu'une large zone de forte résistivité (au-dessus de 390 $\Omega.m$) peut être observée au sud de la coupe H1 (zone notée « R » sur la figure 5), seule une petite partie de H2 présente de telles valeurs. A l'exception des artefacts à proximité des électrodes, elles sont absentes de la coupe H3. Malgré cette tendance générale, la zone de faible résistivité est clairement observée sur les trois coupes.

La figure 6 présente les interpolations obtenues à partir des mesures de résistivités de surface. La figure 6.a montre le résultat pour les mesures effectuées horizontalement, la figure 6.b celui pour les mesures effectuées verticalement. On remarque que ces deux résultats sont très proches. Les résistivités obtenues varient entre 80 et 350 $\Omega.m$. Sur ces deux résultats, on observe une zone de faible résistivité (autour de 100 $\Omega.m$) entre 13 et 17 m.

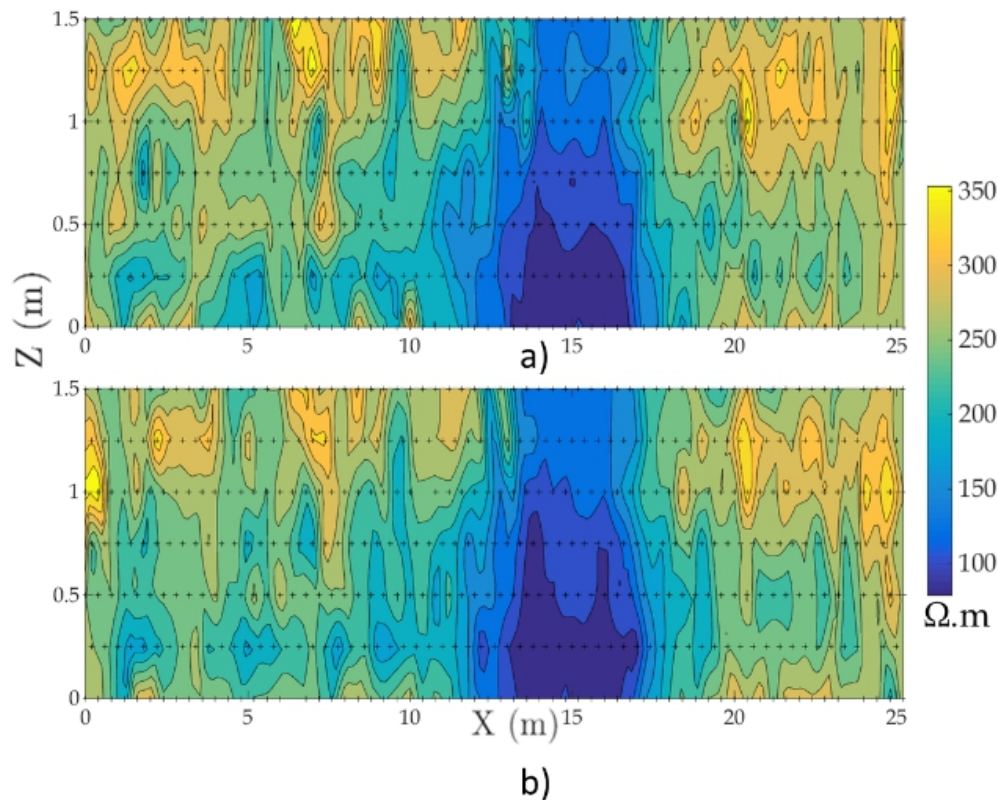


Figure 6 : Interpolation des valeurs obtenues en résistivité de surface. a) valeurs mesurées horizontalement b) valeurs mesurées verticalement

La comparaison entre les figures 5 et 6 montre que la résistivité en surface semble assez bien corrélée avec les résultats d'imagerie interne du pilier. Ainsi, la zone de faible résistivité observée en surface entre 13 et 17 m correspond à la zone conductrice décrite précédemment sur les coupes de la figure 5, ce qui indique la fiabilité de l'inversion précédemment réalisée. On remarque toutefois que, contrairement à ce qui est observé sur ces coupes, les résistivités de surface sont légèrement plus fortes en haut du pilier qu'en bas.

Les zones de fortes résistivité ($> 350 \Omega.m$) localisées à proximité des électrodes sur les coupes extraites de l'inversion ne sont pas retrouvées par les mesures de surface. Ceci tend à confirmer l'hypothèse d'artefacts résiduels dans le résultat d'inversion. Ces artefacts peuvent en partie s'expliquer (Fargier et al, 2017) par des variations de géométrie à proximité des électrodes non prises en compte lors de la procédure d'inversion.

Une zone significativement plus conductrice est détectée par les deux méthodes entre 14 et 16 m. Cette zone possède en son centre la fissure verticale visible à la surface du pilier. La diminution de résistivité à proximité de la fissure peut s'expliquer par une teneur en eau supérieure du matériau. Nous estimons que ce phénomène pourrait être lié à la fracturation et micro fracturation de la zone dont la fracture visible en surface trahit la présence (cf. Figure 7).

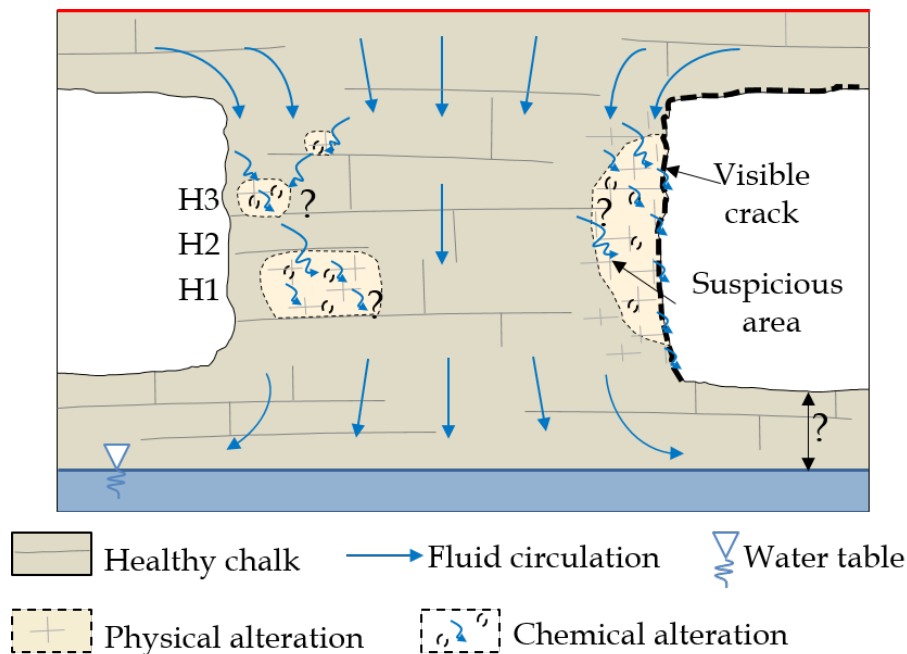


Figure 7 : Représentation schématique de l'état du pilier

Conclusion

Le développement d'outils d'auscultation non destructive des piliers de carrières souterraine est de première importance. Deux méthodes d'auscultation d'un pilier de carrière souterraine basées sur les propriétés de résistivité électrique du matériau sont étudiées.

La première consiste à combiner photogrammétrie et tomographie de résistivité électrique pour obtenir une image de l'intérieur du pilier. Cette méthode est précise et fournit de nombreuses informations sur la composition interne des piliers, notamment sur la présence de zones à forte teneur en eau. Cependant, sa mise en œuvre est complexe, coûteuse et chronophage (le temps total d'acquisition et de traitement est estimé à 10 jours).

La seconde méthode utilise un appareil de mesure de résistivité de surface dont le design a été optimisé pour notre problématique. Elle est plus rapide, moins coûteuse et plus simple à mettre en œuvre (le temps total de traitement et d'acquisition est estimé à 1 jour), mais ne permet d'obtenir des informations que sur la surface du pilier.

La comparaison des résultats obtenus par les deux méthodes sur un même pilier montre que les résistivités observées sont tout à fait corrélées.

Les résultats montrent que les deux techniques permettent la détection d'une zone significativement plus conductrice. Une fissure passe à travers cette zone, ce qui suggère que cette faible résistivité peut être associée à des propriétés mécaniques de la roche plus faibles.

Les avantages et inconvénients des deux méthodes suggèrent que la méthode de surface pourrait être utilisée en première approche sur de nombreux piliers d'une même carrière. Les piliers les plus exposés seraient ensuite étudiés avec la méthode plus complexe de tomographie de résistivité électrique 3D.

Références bibliographiques

Chandler, J.H., Fryer, J.G., Jack, A., 2005. Metric capabilities of low-cost digital cameras for close range surface measurement. *Photogramm. Rec.* 20, 12–26.

- Fargier, Y., Antoine R., Dore L., Fauchard C., Palma Lopes S. 2017. 3D assessment of an underground mine pillar by combination of photogrammetric and geoelectric methods, *Geophysics*, 82(4), E143-E153.
- Fauchard, C., Pothérat P., 2004. Détection de cavités souterraines par méthodes géophysiques. *Projet National CriTerre*, Co-édition LCPC. 170 pages.
- Fauchard, C., Antoine, R., Bretar, F., Lacogne, J. Fargier, Y., Maisonnave, C., Guilbert, V., Marjerie, P., Thérain, P., Dupont, J.-P., Pierrot-Deseilligny, M. (2013). Assessment of an ancient bridge combining geophysical and advanced photogrammetric methods: Application to the Pont De Coq, France, *Journal of Applied Geophysics*. 98, 100-112.
- Collective, Ifsttar, 2014. Le diagnostic de stabilité des carrières souterraines abandonnées, *Guide méthodologique*, 111 pages.
- Kortnik, J., 2009. Optimization Of The High Safety Pillars For The Underground Excavation Of Natural Stone Blocks. *acta geotechnica slovenica*, 1.
- Pierrot Deseilligny, M., Clery, I., 2011. Apero, an open source bundle adjustment software for automatic calibration and orientation of set of images. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.* XXXVIII-5 (W16), 269–276.