

GALERIES DE SEL SOUTERRAINES AUX MDPA : SUIVI DE LA DÉFORMATION ET MODÉLISATION GÉOMÉCANIQUE

UNDERGROUND SALT GALLERIES AT MDPA: DEFORMATION MONITORING AND GEOMECHANICAL MODELING

Guillaume Modeste¹, Frédéric Masson², Cécile Doubre², François Cornet²

¹ GéoRessources – École des Mines de Nancy, France

² Institut Terre Environnement Strasbourg (ITES), France

RÉSUMÉ – Des acquisitions lidar ont été réalisées dans deux galeries de sel à 550m de profondeur dans le bassin potassique alsacien, tous les deux à trois mois entre avril 2017 et avril 2019. La déformation horizontale après deux ans est comprise entre 0.15% et 0.70% $\pm$ 0.08%. Ces valeurs sont constantes dans une galerie et graduelles dans l'autre. Ces résultats sont ensuite utilisés pour paramétrer la loi de comportement mécanique du sel.

ABSTRACT – Lidar acquisitions are carried out in two underground salt galleries at 550m deep in the Alsatian potassic basin, every two to three months between April 2017 and April 2019. After two years, the horizontal deformation ranges from 0.15% to 0.70% $\pm$ 0.08%. These values are constant in one gallery and gradual in the other. These results are then used to parameterise the mechanical behaviour law of the rock salt

1. Introduction

Le suivi des infrastructures souterraines est nécessaire pour s'assurer de leur viabilité sur le long terme. En effet, celles-ci sont susceptibles de se déformer sous l'effet des contraintes ambiantes. Ceci est d'autant plus probable lorsque ces infrastructures sont creusées dans des matériaux connus pour fluer. Outre l'aspect sécuritaire, les données ainsi collectées lors des suivis constituent une riche source d'information pour caractériser l'encaissant. Par exemple, une loi de comportement mécanique spécifique au milieu peut être paramétrée à partir de ces données.

Depuis quelques années, les appareils lidar, pour « *Light Detection And Ranging* », sont devenus des outils incontournables de la télésurveillance. Ces appareils acquièrent des nuages de point, qui sont une représentation 3D du volume étudié. En répétant les acquisitions au cours du temps, il est possible de détecter, de suivre et de quantifier les déformations. Par ailleurs, le succès de ses appareils s'explique en partie par la précision millimétrique qu'atteignent les données acquises (Lichti et Licht, 2006).

En Alsace, suite à l'arrêt programmé de l'activité aux Mines Domaniales de Potasse d'Alsace (MDPA), un site de stockage de déchets a été creusé afin de conserver le bassin d'emploi. Le site est situé à 550 m de profondeur, dans une couche de sel de 20 m d'épaisseur. Toutefois, le site a été fermé à cause d'un incendie survenu en 2002. Depuis, le site est régulièrement surveillé et fait l'objet de nombreuses études, pour notamment déterminer son avenir.

Dans ces travaux, la déformation de deux galeries de sel, connectées au site de stockage, a été suivie par des acquisitions régulières lidar. Après deux ans, la déformation horizontale est comprise entre 0.15 et 0.70 $\pm$ 0.08 %. Toutefois, elle est homogène le long d'une galerie alors qu'elle est graduelle dans l'autre. Cette différence s'expliquerait soit par la présence d'un stot résiduel de l'exploitation minière, soit par l'orientation des galeries relativement au champ de contraintes régional. Enfin, les séries temporelles de la déformation horizontale sont utilisées pour paramétrer la loi de comportement mécanique du sel. Les résultats sont conformes aux estimations déduites des essais en laboratoire.

2. Données

Les campagnes d'acquisition lidar ont été conduites avec un Riegl VZ-2000 (Toth et Petrie, 2018 ; Figure 1.a) entre avril 2017 et avril 2019 avec une campagne tous les deux à trois mois. Sur les onze campagnes possibles, dix ont pu être réalisées. Les campagnes ont concerné deux galeries connectées au site de stockage (Figure 1.b), les galeries 11 et 12 toutes les deux hautes de 2.2 à 3 m et larges de 4 m. Néanmoins, la galerie 11 est orientée N008°W et longue de 100 m alors que la galerie 12 est orientée N040°E et longue de 80 m. Ensuite, chaque campagne se constitue de huit acquisitions afin de couvrir l'ensemble des deux galeries (Figure 1.b). Pour faciliter le suivi de la déformation, des réflecteurs spécifiques ont été installés le long des deux galeries sous forme d'arche. Ces derniers ont été fixés aux toits (plafond) et aux parements (parois) des galeries par trois (Figure 1.c), tous les 10 m dans la galerie 11 et tous les 8 m dans la galerie 12. Les réflecteurs n'ont pu être fixés au mur (sol) des galeries, nous empêchant de suivre aisément la déformation verticale.

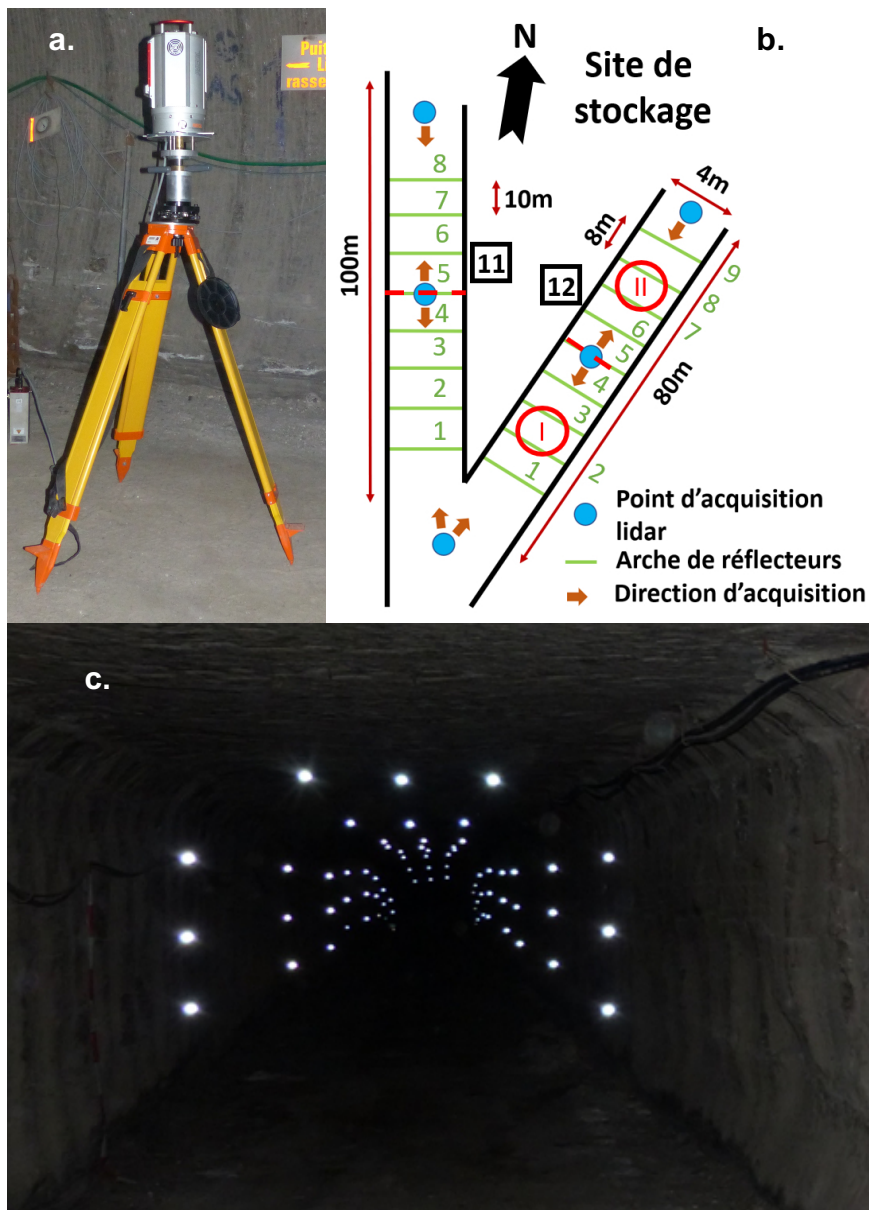


Figure 1. Présentation d'une campagne d'acquisition avec l'appareil utilisé (a), le schéma des galeries et des points d'acquisitions (b) ainsi qu'une photo de la galerie 11 avec les réflecteurs installés (c) (d'après Modeste et al., 2022 ; Modeste, 2020).

3. Résultats

3.1. Séries temporelles de déformation horizontale

Après l'acquisition des nuages de points, la déformation horizontale est obtenue en suivant la variation de distance entre deux réflecteurs situés à même hauteur, au sein d'une même arche et sur des parements opposés. Après deux ans, la déformation horizontale est comprise entre 0.15% et 0.70% (Figure 2). L'amplitude de la déformation horizontale dépend de la galerie, elle est deux à quatre fois plus importante dans la galerie 12 que dans la galerie 11. De plus, la déformation horizontale semble linéaire au cours du temps. Toutefois, la période d'observation (2 ans) est relativement courte pour conclure sur ce point.

L'incertitude sur la déformation horizontale est estimée entre 0.05 et 0.10%. Ainsi, la déformation horizontale est significative et sort du bruit de mesure.

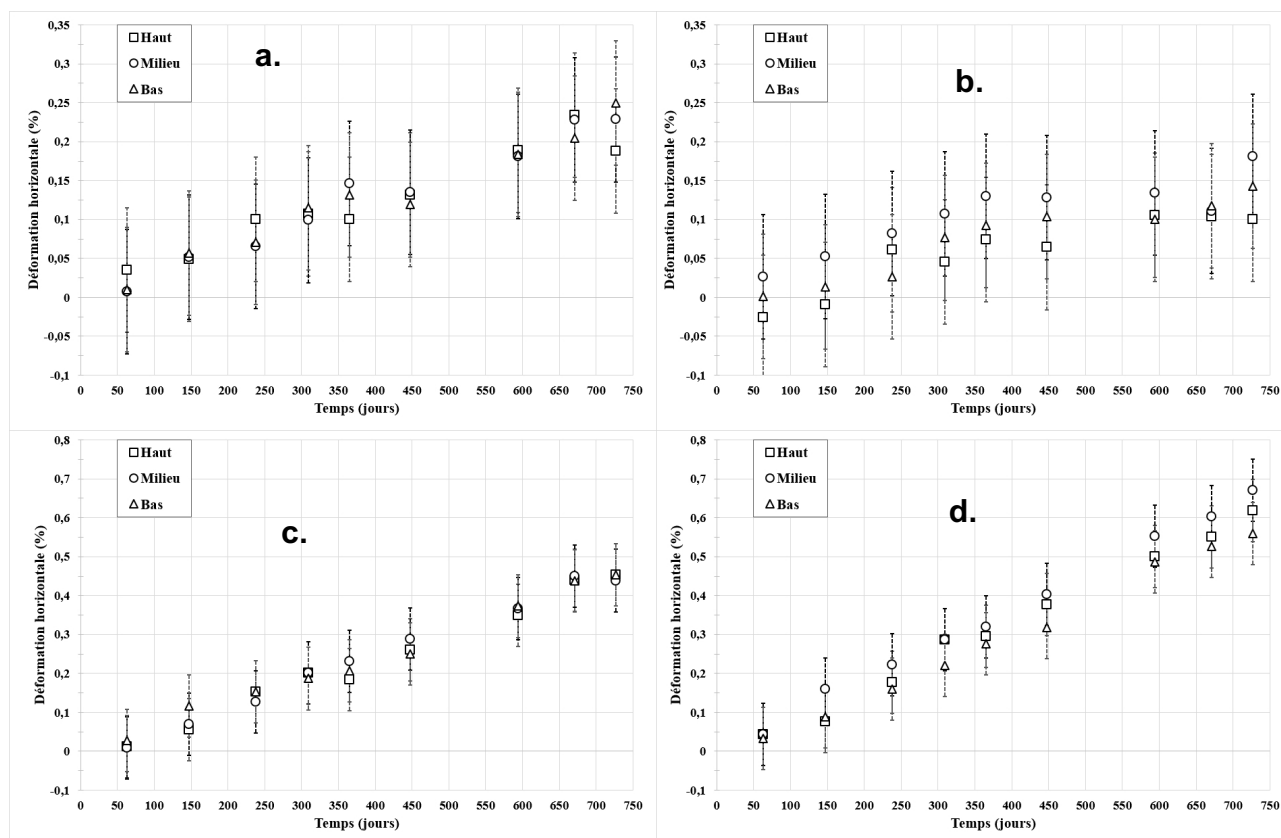


Figure 2. Série temporelle de la déformation horizontale au niveau des arches 3 et 7 de la galerie 11 (a et b), et au niveau des arches 3 et 7 de la galerie 12 (c et d) (d'après Modeste et al., 2022 ; Modeste, 2020).

3.2. Comparaisons aux données des MDPA

Avant notre étude, la déformation horizontale des galeries du site de stockage a été suivie avec une règle graduée de juin 2007 à juin 2013, soit une période 6 ans. Les taux de déformation horizontale annuels provenant de ce suivi sont similaires à ceux déduits de nos données lidar (Figure 3.a).

Ensuite, nos séries temporelles sont comparées à celles communiquées par les MDPA. Afin de réaliser la comparaison, la date de référence est fixée au 1^{er} juin 2007 pour les mesures du site et au 6 avril 2017 pour nos données. Les comparaisons ont été faites entre les séries temporelles du site de stockage et de l'arche 8 des galeries, l'arche la plus proche pour laquelle les séries temporelles sont disponibles. Une bonne adéquation est observable entre les deux jeux de données (Figure 3.b et c). Les sauts observés dans les séries

temporelles des MDPa sont dus à la perte des points de repères (clous) lors de leur suivi, le suivi ayant été poursuivi avec un point similaire.

Ces comparaisons valident nos résultats. Toutefois, elles mettent aussi en avant l'aspect graduels du taux de déformation horizontale, croissant en approchant du site de stockage (Figure 3.a). Deux hypothèses sont avancées pour expliquer cette observation : la présence d'un stot résiduel au-dessus du site de stockage, perturbant ainsi localement le champ de contraintes, et l'orientation des galeries relativement au champ de contraintes. En effet, bien que le site et les galeries soient creusées dans une épaisse couche de sel, les contraintes ne sont pas isotropes à cause de la présence de bancs de marnes anhydritiques à l'origine d'un déviateur de contraintes dans le massif salifère (Cornet et Burlet, 1992).

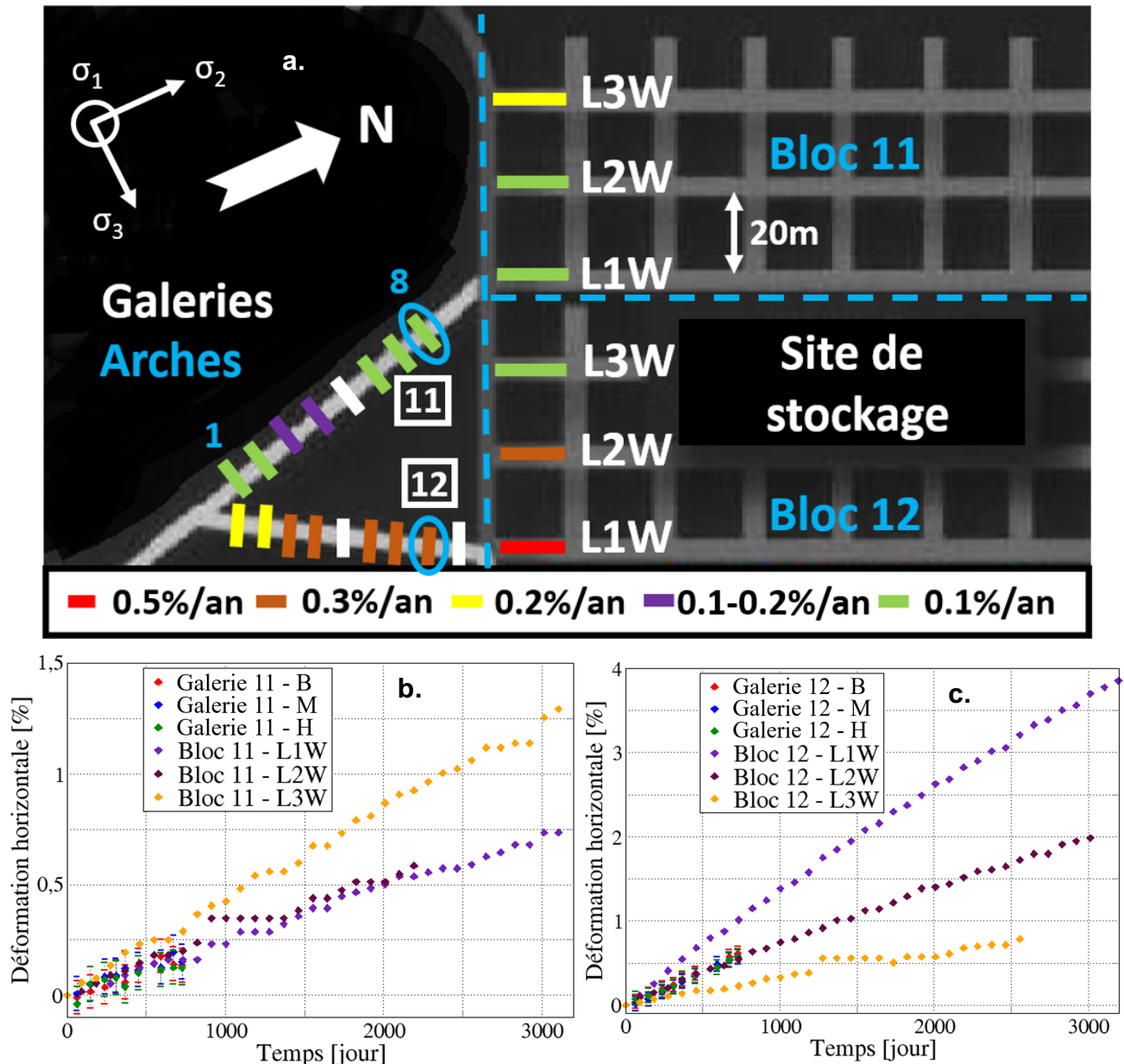


Figure 3. Comparaison des déformations horizontales suivies par lidar et par les MDPa avec une carte des vitesses annuelles (a), les séries temporelles de l'arche 8 de la galerie 11 et du bloc 11 (b) et les séries temporelles de l'arche 8 de la galerie 12 et du bloc 12 (c) (d'après Modeste et al., 2022 ; Modeste, 2020).

4. Modélisation géomécanique

À la suite d'essais de déformation en laboratoire avec différentes températures et contraintes déviatoriques, la loi de comportement mécanique du sel du bassin potassique alsacien est une loi de Norton (Ghoreychi, 1991 ; Equation 1 à 3) :

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^v = \left(\frac{3}{2}\right) \dot{\varepsilon}_{cr} \left(\frac{\sigma_{ij}^d}{\bar{\sigma}}\right) \quad (1)$$

où

$$\dot{\varepsilon}_{cr} = \begin{cases} A\bar{\sigma}^n & \bar{\sigma} \geq \sigma_1^{ref} \\ 0 & \bar{\sigma} < \sigma_1^{ref} \end{cases} \quad (2)$$

et

$$A = \frac{A_s}{\sigma_0^n} \exp\left(-\frac{B}{T}\right) \quad (3)$$

où $\dot{\varepsilon}_{ij}^v$ est le tenseur du taux de déformation lié au fluage, $\dot{\varepsilon}_{cr}$ la vitesse de fluage, σ_{ij}^d la contrainte déviatorique, $\bar{\sigma}$ la contrainte de Von Mises, σ_1^{ref} le seuil de contrainte de Von Mises, n l'exposant des contraintes (4), A_s la vitesse de référence (0.005 %/jour), T la température (298 K), B le ratio entre l'énergie d'activation et la constante des gaz parfait (4700 K), and σ_0 la contrainte de normalisation (1.0 MPa). Dans le cas du sel, le seuil est choisi nul, le sel fluant en présence d'un déviateur de contraintes (Carter et al., 1993). Toutefois, dans des travaux de modélisation du site de stockage, des valeurs différentes de la vitesse de référence A_s sont retenues pour retrouver les déformations observées à travers le site (Laouafa et al., 2010 ; Camusso et Billaux, 2017). En effet, l'INERIS et Itasca utilisent une valeur de 0.022 et 0.015 %/jour, respectivement, dans leurs travaux.

Afin de déterminer laquelle des valeurs de vitesse de référence est correcte, une modélisation géomécanique sous Flac3D est réalisée (Itasca, 2002). Le modèle est un parallélépipède de 26.4 m de haut, large de 24 m et long de 52 m. Il est constitué d'éléments parallélépipédique haut de 0.6 m, long et large de 0.8 m. Ainsi, l'ouverture de la galerie correspond à quatre éléments en hauteur et 5 en largeur. En outre, de cette manière, chaque réflecteur de la galerie est associé à un nœud du modèle. La densité du géomatériau, son module d'Young et son coefficient de Poisson sont indiqués dans le Tableau 1 avec les paramètres de la loi de Norton.

Tableau 1. Tableau récapitulatif des paramètres utilisés pour la modélisation (d'après Modeste et al., 2022 ; Modeste, 2020).

Paramètre	Valeur
Module d'Young	28.3 GPa
Coefficient de Poisson	0.25
Densité	2.31 g.cm ⁻³
Exposant des contraintes	4
Seuil de contraintes de Von Mises	0 MPa
Contraintes de normalisation	1.0 MPa
B	4700 K

Après avoir initialisé les contraintes dans le modèle, la galerie est excavée. Une première période de 20 ans est modélisée, correspondant au temps entre l'excavation de la galerie et le début de nos acquisitions. Puis, une seconde période de deux ans est modélisée, correspondant à notre période d'observation. Pendant cette seconde période, la distance entre les nœuds sélectionnés est extraite du modèle pour en déduire la déformation horizontale.

La loi de comportement utilisée dans la modélisation est la loi de Norton (Equation 1 à 3). La modélisation est conduite avec différentes valeurs de vitesse de référence et seuls les résultats provenant de la galerie 11 sont utilisés. Une bonne adéquation est obtenue entre le modèle et les observations (Figure 4). Pour déterminer laquelle des vitesses satisfait au mieux les données, le déterminant *R-square* est calculé pour chacune des comparaisons. Le déterminant *R-square* moyen est de 0.54 pour 0.004 %/jour, 0.62 pour 0.005 %/jour et 0.51 pour 0.006 %/jour. Des déterminants moyens ressort que la valeur 0.005 %/jour satisfait au mieux nos données. Ainsi, l'estimation basée sur les données de laboratoire est retrouvée.

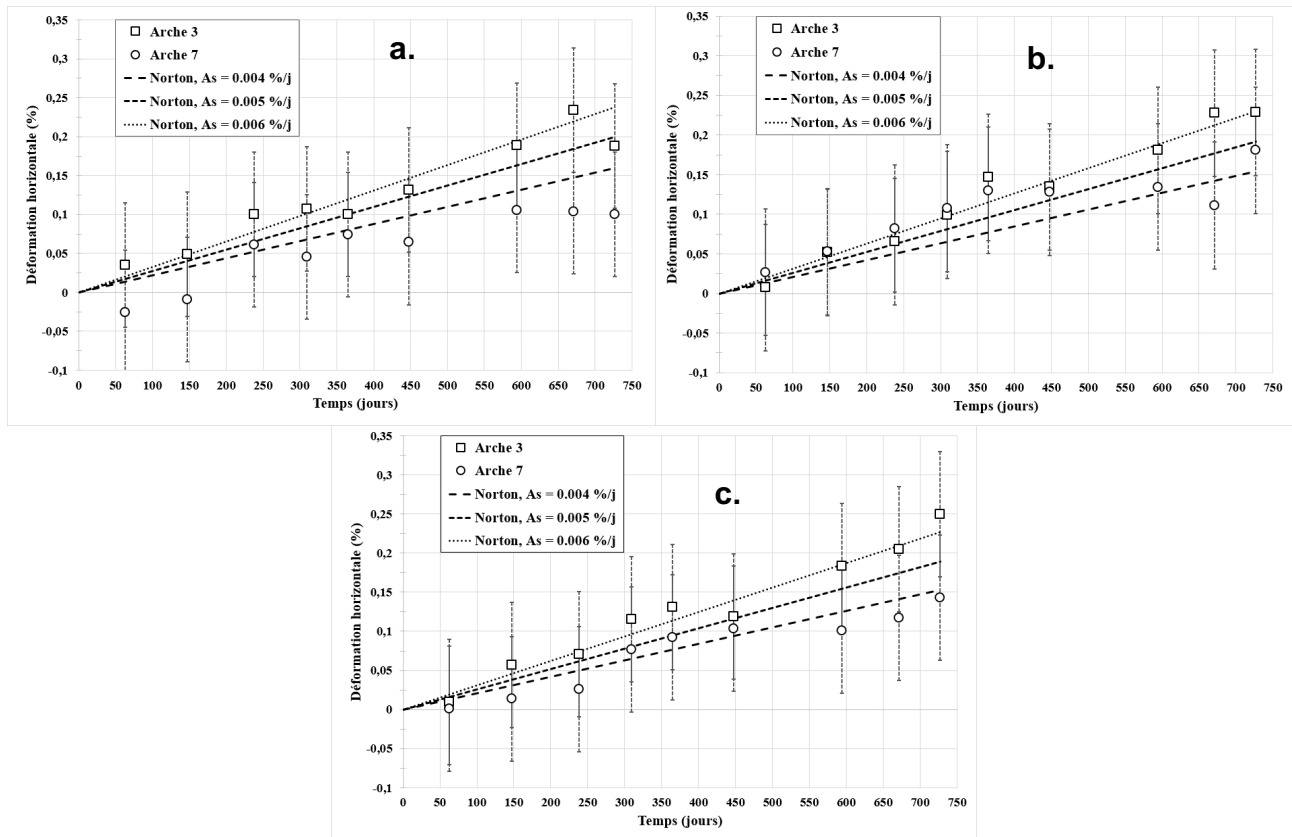


Figure 4. Comparaison des déformations horizontales déduites des campagnes d'acquisition lidar et celles modélisées. Les observations proviennent des arches 3 et 7 (a. haut, b. milieu, c. bas) (d'après Modeste et al., 2022 ; Modeste, 2020).

5. Conclusion

Dans cette étude, la déformation de deux galeries de sel à 550 m de profondeur est suivie par des acquisition lidar répétées entre avril 2017 et avril 2019. Après deux ans d'acquisition, la déformation horizontale est comprise entre 0.15 et 0.70 ± 0.08 % dans les deux galeries. Dans l'une des deux galeries, la déformation est homogène alors qu'elle est graduelle dans l'autre. Cette différence pourrait s'expliquer soit par la présence d'un stot résiduel perturbant localement les contraintes du milieu, soit par l'orientation des galeries relativement au champ de contraintes régional. Ensuite, les données sont utilisées afin de paramétrer la loi de comportement mécanique du massif salifère. Les paramètres obtenus expérimentalement en lien avec des essais en laboratoire sont retrouvés. Ainsi, à travers cette étude, une nouvelle application illustre l'utilité et la polyvalence du lidar pour surveiller les infrastructures souterraines et caractériser mécaniquement le milieu encaissant.

6. Références bibliographiques

- Camusso M., Billaux D. (2018). Etude de l'évolution de la subsidence en surface au-dessus du stockage. Rapport technique, Itasca.
- Carter N.L., Horseman S.T., Russell J.E., Handin J. (1993). Rheology of rocksalt. *Journal of Structural Geology* 15, pp. 1257–1271. [https://doi.org/10.1016/0191-8141\(93\)90168-A](https://doi.org/10.1016/0191-8141(93)90168-A)
- Cornet F., Burlet D. (1992). Stress field determinations in france by hydraulic tests in boreholes. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 97(B8) : pp. 11829–11849. <https://doi.org/10.1029/90JB02638>
- Ghoreychi M. (1991). Behavior of crushed salt under heat source in boreholes in a salt mine (amélie mine, alsace potash mines, france). Rapport technique, Commission de la Communauté Européenne.
- Itasca (2002). Flac3D User's Guide.
- Laouafa F., Pinte J., Ghoreychi M. (2010). Étude géomécanique du stockage de StocaMine (No. DRS10 – 108130– 14273A). Rapport technique, INERIS. <https://www.mdpa-stocamine.org/documentation/index.php/s/swBHeewPtXftoHz#pdfviewer>
- Lichti D. D., Licht M. G. (2006). Experiences with terrestrial laser scanner modelling and accuracy assessment. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.*, 36(5) : pp. 155– 160.
- Modeste G. (2020). Estimation et évolution des vides miniers aux Mines Domaniales de Potasse d'Alsace (MDPA) par mesures géodésiques et modélisation géomécanique. Thèse de doctorat, Université de Strasbourg. <https://www.theses.fr/2020STRAH004>
- Modeste G., Masson F., Doubre C., Cornet F. (2022). Repeated lidar acquisitions in an underground salt gallery in the Alsatian potassic basin (France): Monitoring and geomechanical modelling. *Tunnelling and Underground Space Technology* 123, 104406.
- Toth C. K., Petrie G. (2018). Terrestrial laser scanners. In *Topographic Laser Ranging and Scanning*. CRC Press, pp. 29-88.