

OUTIL INTEGRE DANS UN SIG : CARTOGRAPHIES DES DEFORMATIONS INDUITES PAR LES OUVRAGES SOUTERRAINS ET EVALUATION DE LA VULNERABILITE DES AVOISINANTS

GIS INTEGRATED MODELLING TOOL: MAPPING OF SETTLEMENTS INDUCED BY UNDERGROUND STRUCTURES AND DAMAGE ASSESSMENT

Francesc RICH¹, Barbara BITETTI¹, Roberto SCHUERCH²

¹ PINI France Engineers, Paris, France

² PINI Swiss Engineers, Zurich, Suisse

RÉSUMÉ – Cet article se focalise sur l'application « TUNNELContour », un outil de modélisation intégré SIG qui s'inscrit complètement dans l'approche de la recommandation de l'AFTES GT16R2F1. Cet outil permet de calculer les déformations induites par les travaux de réalisation d'ouvrages souterrains, d'en évaluer l'impact sur les avoisinants existants situés dans leur zone d'influence géotechnique et de réaliser des cartographies des déformations et de la vulnérabilité des avoisinants.

ABSTRACT – This article focuses on the application of “TUNNELContour”, a GIS integrated modelling tool in line with the AFTES recommendation GT16R2F1. This application is used to calculate the deformations induced by construction works of underground structures, to assess the potential induced damages and to carry out the deformations and vulnerability mapping.

1. Introduction

Cet article se focalise sur l'outil « TUNNELContour », une application développée par Pini France Engineers, qui s'inscrit complètement dans l'approche de la recommandation de l'AFTES GT16R2F1. Cet outil permet de calculer les déformations par ouvrage et les déformations cumulées (tunnels, puits et gares) induites par la réalisation de plusieurs ouvrages souterrains, d'intégrer les résultats de l'enquête « bâti, caves et fondation », d'évaluer l'impact sur les avoisinants existants se situant dans la zone d'influence géotechnique et de réaliser les cartographies des déformations et de la vulnérabilité des avoisinants. Les calculs et les analyses sont réalisés sur une application de système d'information géographique (SIG) permettant de réaliser des analyses croisées avec les données disponibles. Cet article présente un exemple d'application de cet outil de calcul pour l'évaluation de la vulnérabilité dans le cadre du projet de création liaison souterraine constituée de câbles 380 kV, en suisse (Figure 1). Le tunnel est creusé avec une machine AVN (fonçage de tubes sous abattage mécanique continu avec confinement du front par pression de boue.

2. Méthodologie générale

Le cadastre du projet, les réseaux enterrés, les informations de l'enquête bâti et le tracé du tunnel sont importés dans l'application SIG. Les déformations induites par le tunnel sont ensuite calculées conformément aux méthodes de calcul choisies (cf. §3). Les déformations sont calculées initialement dans un système local du logiciel puis converties dans le système global correspondant au système de référence du projet (CH1903/LV03). Les déformations maximales obtenues dans les emprises des bâtiments se situant dans la zone d'influence géotechnique sont utilisées pour évaluer la classe de dommage des avoisinants en fonction du critère de déformation considéré et de la sensibilité du bâtiment.

Cette analyse spatiale permet ainsi d'évaluer la vulnérabilité (cf. § 4) des avoisinants en cohérence avec la matrice de vulnérabilité du projet. Trois types de cartes de déformations peuvent être réalisées : tassements, mises en pente et déformations horizontales. Les cartographies obtenues montrent aussi la classe de dommage et la vulnérabilité évaluées pour chaque avoisinant.

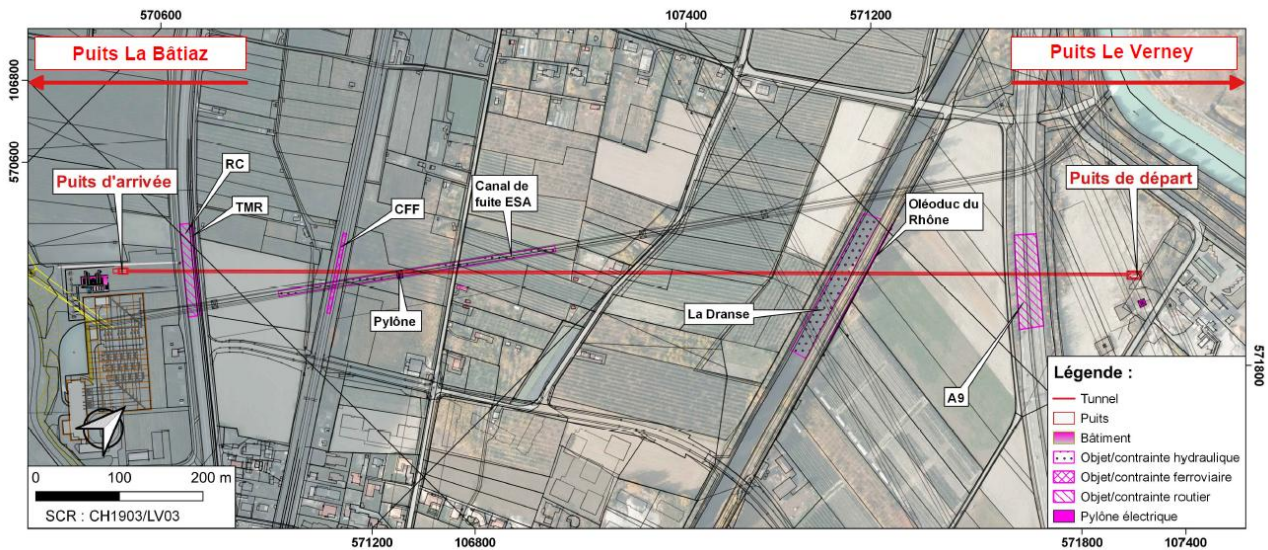


Figure 1 : Tracé du projet liaison haute tension souterraine

3. Estimation des déformations induites

3.1. Tunnel

3.1.1. Tassements

La Figure 2 présente la cuvette de tassements tridimensionnelle induite en surface par le creusement d'un tunnel, en conditions de champ libre, et obtenue numériquement avec l'application TUNNELContour.

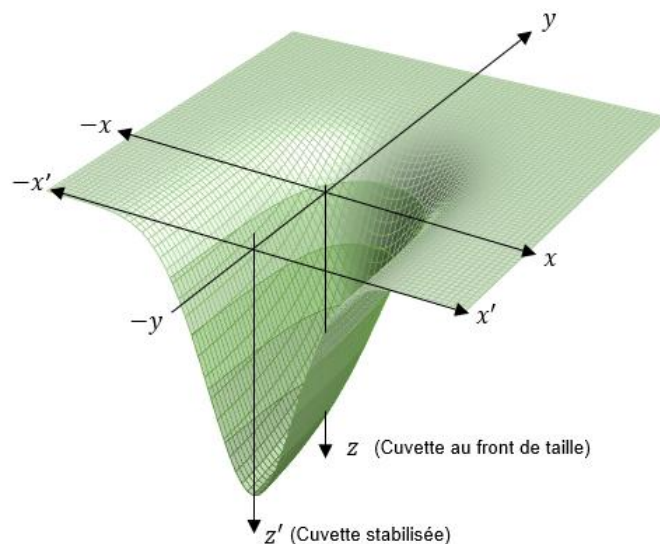


Figure 2 : Cuvette de tassements tridimensionnelle en surface, en champ libre.

Conformément à la formalisation proposée par Peck (1969), la cuvette de tassement transversale est modélisée par une courbe de Gauss (loi normale standard). La Figure 3

et Figure 4 présentent la forme de la cuvette de tassement transversale par rapport à l'axe du tunnel, définie par l'équation suivante :

$$S_v(x) = S_{max} \cdot \exp\left(-\frac{x^2}{2 \cdot i^2}\right) = \frac{V_s}{\sqrt{2\pi} \cdot i} \cdot \exp\left(-\frac{x^2}{2 \cdot i^2}\right) = \frac{V_L \cdot A}{\sqrt{2\pi} \cdot i} \cdot \exp\left(-\frac{x^2}{2 \cdot i^2}\right)$$

Où :

- S_{max} : tassement maximal à l'axe du tunnel en conditions de champ libre ($x = 0$) ;
- V_s : volume de la cuvette de tassement transversale ;
- A : aire d'excavation ;
- V_L : perte de volume relative à l'excavation, définie comme ratio entre V_s et A ;
- i : distance du point d'inflexion par rapport à l'axe du tunnel. Ce paramètre permet de définir la forme de la cuvette. Il existe plusieurs approches pour déterminer le point d'inflexion, la plus utilisée par la profession est celle définie par (O' Reilly & New, 1982) :

$$i = k \cdot z_0 ,$$

dont z_0 est la profondeur de l'axe du tunnel et k le paramètre empirique qui décrit la largeur de la cuvette de tassement. Ce paramètre adimensionnel dépend de la nature et des caractéristiques du terrain excavé. La zone d'influence géotechnique est définie comme une bande de largeur $5 \cdot i$ centrée sur l'axe du tunnel. Cette distance correspond à la distance où les déplacements du terrain sont négligeables et n'ont plus d'impact sur les avoisinants existants. La valeur de 1 mm proposée par Giardina (2013) peut-être aussi retenue pour définir les limites de la ZIG. Autres que les tassements en surface, la mise en pente transversale est aussi évaluée pour étudier l'endommagement des avoisinants. Elle est définie par la dérivée de la cuvette de tassements :

$$\beta(x) = \frac{dS_v(x)}{dx}$$

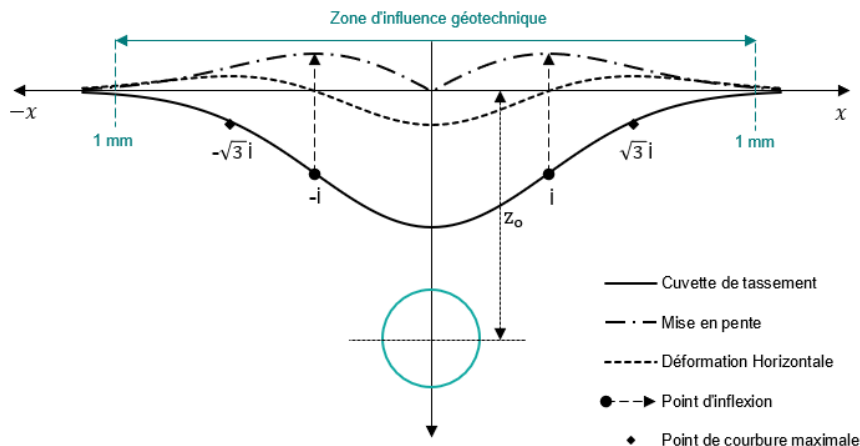


Figure 3 : Mouvements transversaux en surface.

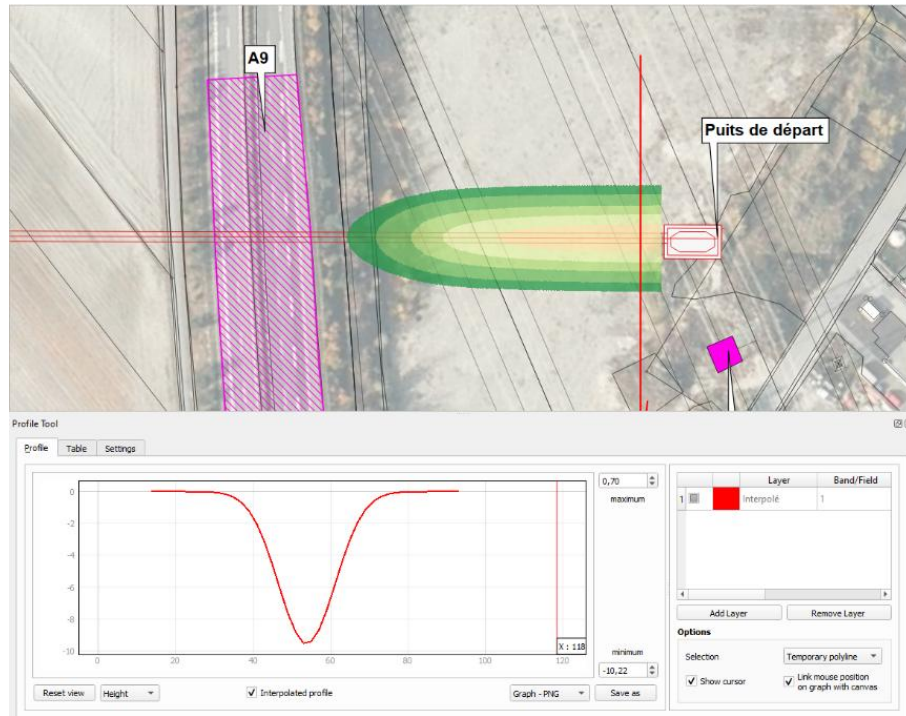


Figure 4 : Visualisation des mouvements transversaux en surface - TUNNELContour.

3.1.2. Déplacements horizontaux et déformations horizontales

La méthode de (O' Reilly et New, 1982) permet de calculer les déplacements horizontaux et les déformations horizontales induits par le creusement du tunnel. Ceux-ci sont calculés en fonction du tassement induit à la distance x de l'axe du tunnel et de la couverture à l'axe z_0 du tunnel, par les équations ci-après :

$$S_h(x) = -\frac{x}{z_0} S_v(x)$$

$$\varepsilon_h(x) = \frac{S_{max}}{z_0} \cdot \left(1 - \frac{x^2}{i^2}\right) \cdot \exp\left(-\frac{x^2}{2 \cdot i^2}\right)$$

La Figure 3 permet d'observer que la déformation horizontale est nulle au niveau du point d'inflexion i et maximale pour $x = 0$ (compression) et $x = \sqrt{3} \cdot i$ (traction).

3.1.3. Déformations horizontales

(Attewell et Woodman, 1982) ont proposé des équations pour estimer les tassements et les déformations longitudinaux. Les tassements en direction longitudinale sont définis comme suit :

$$S_v(y) = \frac{V_s}{\sqrt{2\pi i}} \cdot \left\{ G\left[\frac{y-y_i}{i}\right] - G\left[\frac{y-y_f}{i}\right] \right\} = S_{max} \cdot (G_1 - G_2)$$

$$G = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\frac{y-y_i}{i}} \exp\left[-\frac{\left(\frac{y-y_i}{i}\right)^2}{2}\right] d\left(\frac{y-y_i}{i}\right)$$

La Figure 5 présente le profil de tassement longitudinal. Le tassement au droit du front de taille est usuellement égal à $0.5 \cdot S_{max}$ ($G(0) = 0.5$ lorsque $y = y_f$). Le tassement maximal théorique est obtenu à une distance infinie par rapport au front de taille ($G(\infty) =$

1 lorsque $(y - y_i) \rightarrow \infty$). L'axe des ordonnées, situé au niveau du front de taille, sépare les zones de traction situées au front de la machine AVN des zones tractions situées à l'arrière de la tête d'abattage.

Les déformations horizontales dans la direction longitudinale sont définies par l'équation suivante :

$$\varepsilon_L(y) = \frac{V_L D^2}{8i^2 z_0} \cdot y \cdot \exp\left(-\frac{x^2}{2 \cdot i^2}\right)$$

La déformation longitudinale est nulle au droit du front de taille et maximale au niveau des points d'inflexion. La mise en pente longitudinale est définie par la dérivée du profil de tassement longitudinal:

$$\beta(y) = \frac{dS_v(y)}{dy}$$

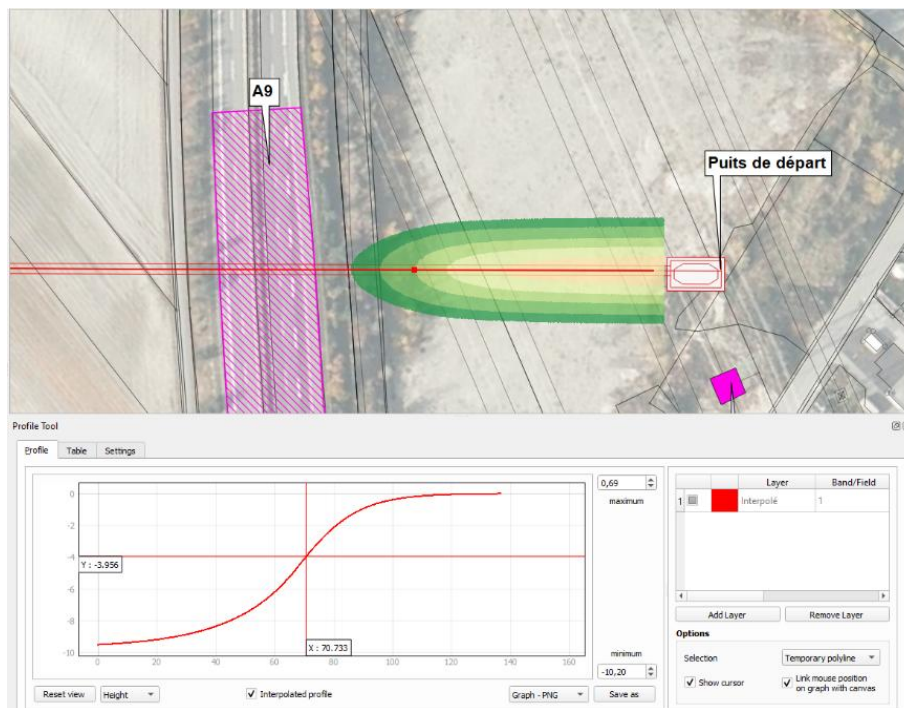


Figure 5 : Visualisation des mouvements longitudinaux en surface - TUNNELContour.

3.2. Puits et gares

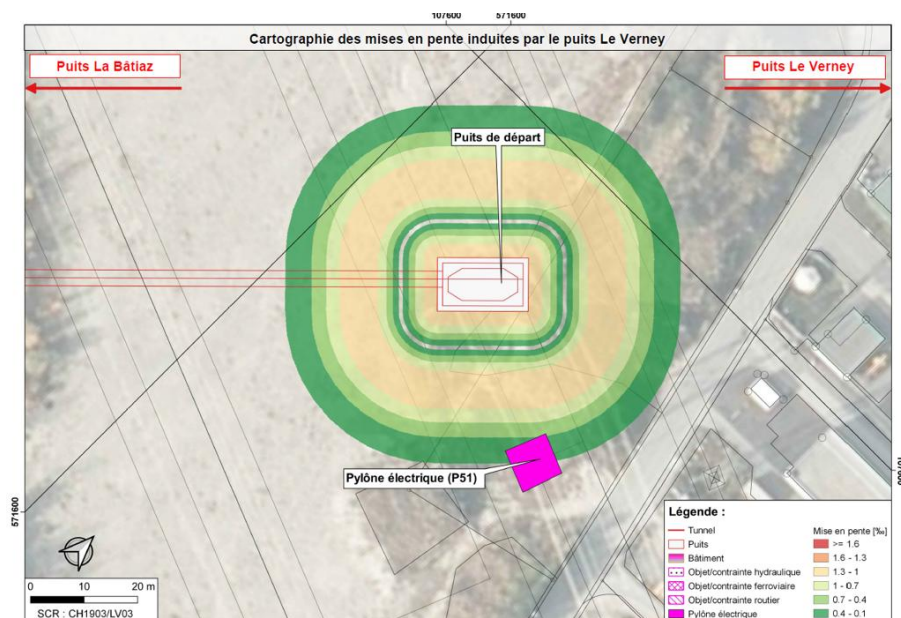
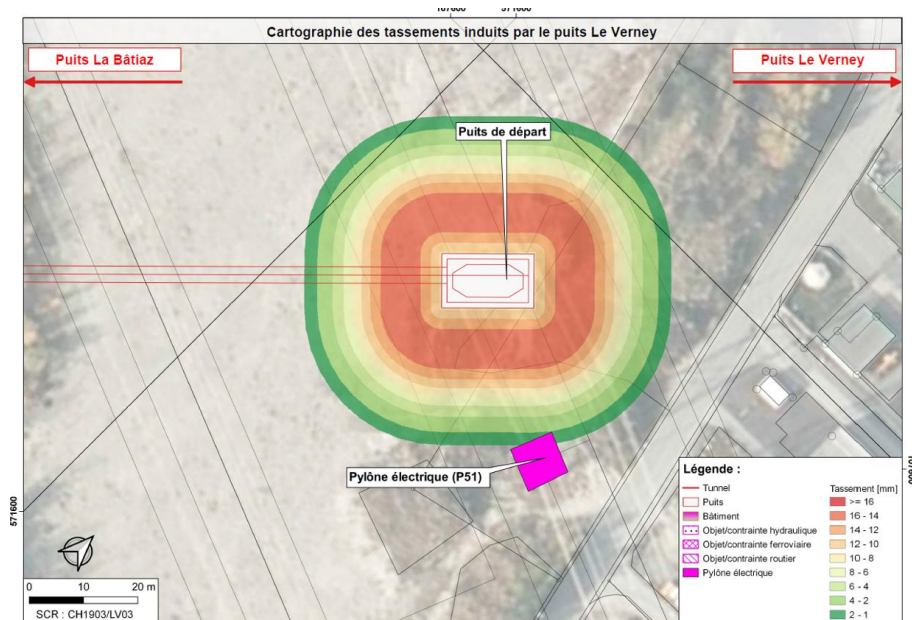
Pour l'estimation des déformations induites par la construction des puits trois méthodes sont proposées dans l'application TUNNELContour :

- La méthode de (Bowles, 1988), est basée sur l'estimation des mouvements latéraux de l'écran. A partir de ces déformations, la perte de volume due au mouvement latéral de la paroi est calculée. Le tassement maximal engendré par la paroi est ensuite lié à la perte de volume et à la zone d'influence calculée selon la méthode de (Caspé, 1966). Cette méthode prend comme principale hypothèse que le tassement maximal se produit au niveau de l'écran de soutènement.
- La méthode de (Hamza, 1999), qui introduit deux courbes de tassements : la « courbe S », où le tassement maximal se produit au droit de l'écran, typique d'une déformée en console de l'écran de soutènement, et la « courbe S1 », où le tassement maximal se produit à une certaine distance de l'écran, typique des écrans butonnés en tête. En plus du type de déformée latérale de l'écran, cette

méthode est basée sur deux paramètres empiriques, R_v et R_s , dont les valeurs de base retenues sont respectivement 0,75 et 1,40 ;

- La méthode de (Hsieh et Ou, 1998), qui distingue deux courbes de tassements : la courbe type « spandrel », observée notamment dans le cas de déformée des parois de type console, et la courbe type « concave », qui se produit notamment lorsque les déplacements latéraux en tête des parois sont bloqués par des butons ou une dalle.

La Figure 6 et Figure 7 illustrent les tassements et les mises en pente induits calculés avec les formulations de Hamza.



3.3. Cumul des déformations induites

L'outil TUNNELContour permet aussi d'estimer les déformations cumulées induites par le creusement des puits et par le creusement du tunnel.

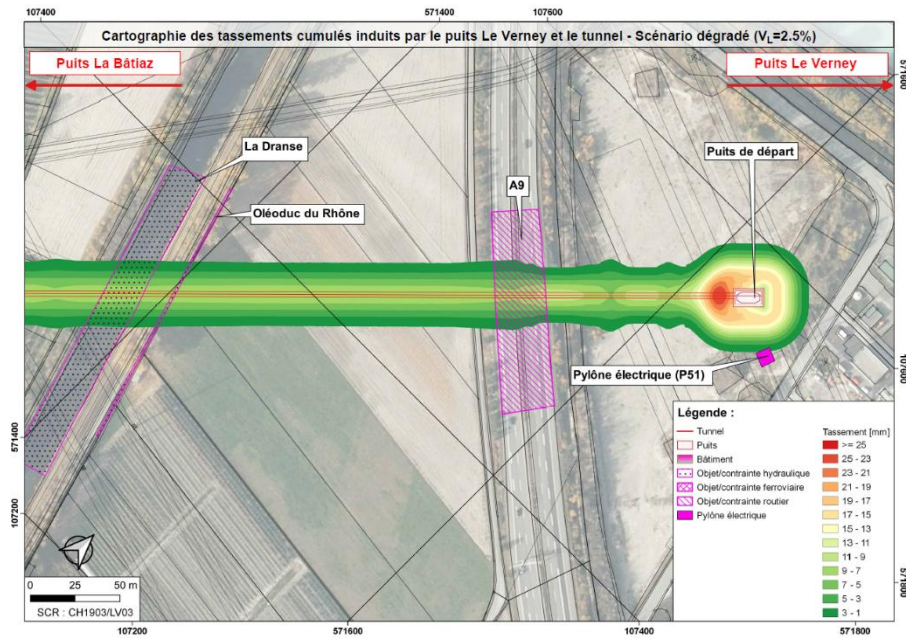


Figure 8 : Visualisation du cumul de tassements induits par le tunnel et le puits.

4. Evaluation de la vulnérabilité

Les déformations maximales des empreintes des bâtiments sont couplées avec les sensibilités intrinsèques de chaque avoisinant pour estimer la classe de dommage et évaluer par la suite la vulnérabilité des avoisinants en cohérence avec la matrice de vulnérabilité du projet. La Figure 9 illustre un exemple de l'évaluation de la vulnérabilité des avoisinants.

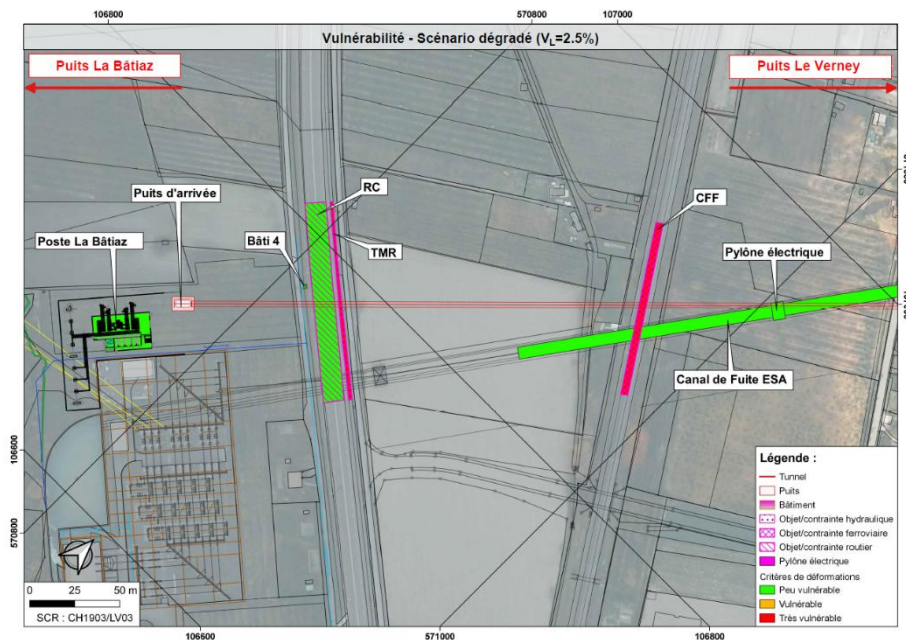


Figure 9 : Evaluation de la vulnérabilité des avoisinants.

5. Cartographie et analyse spatiale

A partir des données importées dans l'application sous forme d'attributs pour chaque avoisinants (sensibilité des bâtiments et seuils de déformation), de l'estimation des déformations, de l'évaluation de la classe de dommage pour chaque avoisinants en

fonction des seuils retenus, il est possible d'évaluer la vulnérabilité des bâtiments en cohérence avec la matrice de vulnérabilité par le biais d'une analyse croisée à partir de toutes les données utilisées. La Figure 9 au-dessus présente un exemple de l'évaluation de la vulnérabilité permettant de discerner par la suite le besoin ou non de confortements ou des interventions spécifiques. Afin de maîtriser les tassements au droit des ouvrages vulnérables, les interventions suivantes sont retenues :

- Augmentation locale de la pression de confinement (mitigation du risque de tassements sur le court terme) ;
- Augmentation locale des volumes du lubrifiant et, si nécessaire, de la pression d'injection de boue de lubrification autour des tubes (mitigation du risque de tassements sur le moyen terme) ;
- Injection locale du vide annulaire avec du mortier compatible avec les exigences du projet (mitigation du risque de tassements sur le long terme).

6. Conclusion et perspectives

L'outil de modélisation intégré dans un SIG "TUNNELContour" permet d'estimer les déformations induites par plusieurs ouvrages souterrains et d'en évaluer la vulnérabilité en cohérence à la recommandation de l'AFTES GT16R1F1. L'outil permet d'évaluer de façon semi-automatique les déformations induites sur chaque avoisinants et d'en évaluer leur vulnérabilité. Le logiciel permet d'effectuer des analyses de vulnérabilité pour un linéaire de 10 km de tunnel dans un milieu urbain dense en quelques jours. Le fait d'automatiser un certain nombre d'étapes permet d'éviter des erreurs que peuvent être réalisées manuellement. Cet outil permet aux utilisateurs de réaliser des cartographies géoréférencées de toute information souhaitée (déformations, sensibilité des avoisinants, vulnérabilité). Pour les ouvrages type puits non circulaires un nouveau module du logiciel sera créé pour estimer les déformations induites par des puits en considérant la rigidité des coins.

7. Références bibliographiques

- AFTES GT16R1F1, (2018). Tassements et vibrations induits par le creusement des ouvrages souterrains.
- Attewell, P. B. & Woodman, J. P. (1982). Predicting the dynamics of ground settlement and its derivatives by tunnelling in soil. *Ground Engineering* 15, 13-22.
- Bowles J.E. 1988. *Foundation analysis and design*. 4th ed. McGraw-Hill Book Company, New York.
- Caspe, M.S. 1966. Surface settlement adjacent to braced open cuts *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, 92(SM4) : 51-59.
- Giardina, G. (2013). *Modelling of settlement induced building damage*. Ph.D thesis, TU Delft.
- Hamza, M. (1999). *Ground movements due to the construction of cut-and-cover structures and slurry shield tunnel of the Cairo Metro*. Tunnelling and Underground Space Technology.
- Hsieh P.G et Ou C.Y. 1988. Shape of ground surface settlement profiles caused by excavation, *Can. Geotech. J*35: 1004-1017.
- M.P. O'Reilly and B.M. New, (1982), *Settlements above tunnels in the United Kingdom – Their magnitudes and predictions*, Tunnelling 1982, pp 179-181.
- Peck R.B. 1969. *Deep Excavation and Tunneling in Soft Ground*. State-of-the-Art Report. Proceedings of the 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Mexico, 1969, pp 225-290.