



HAL
open science

Sinkhole Collapse Detection Method

Christelle Nadine Abadie, Gianluigi Della Ragione, Yuanguo Kuang, Talia da Silva Burke, Sivasakthy Selvakumaran, Xiaoming Xu, Tobias Möller, Emilio Bilotta

► **To cite this version:**

Christelle Nadine Abadie, Gianluigi Della Ragione, Yuanguo Kuang, Talia da Silva Burke, Sivasakthy Selvakumaran, et al.. Sinkhole Collapse Detection Method. Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur, Jun 2024, Poitiers, France. hal-04617560

HAL Id: hal-04617560

<https://hal.science/hal-04617560>

Submitted on 19 Jun 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

SYSTEME DE DETECTION D'EFFONDREMENT DE FONTIS

Sinkhole Collapse Detection Method

Christelle N. Abadie^{1*}, Gianluigi Della Ragione⁴, Nick Kuang³, Talia S. da Silva Burke², Sivasakthy Selvakumaran³, Xiaomin Xu^{5,3}, Tobias Möller⁶ and Emilio Bilotta⁴

¹ Université Gustave Eiffel, Nantes, France

² Université de Stellenbosch, Stellenbosch, Afrique du Sud

³ Université de Cambridge, Royaume-Uni

⁴ Université de Naples Federico II, Naples, Italie

⁵ Université de Manchester, Manchester, UK

⁶ Transport for Greater Manchester, Manchester, Royaume-Uni

*christelle.abadie@univ-eiffel.fr;

RÉSUMÉ – Cet article présente les résultats préliminaires de recherches sur le développement d'un système de détection des effondrements de fontis combinant la technologie des fibres optiques et les images satellites. Les expériences réalisées démontrent l'efficacité de la fibre optique dans la détection des affaissements du sol, tandis que les analyses par éléments finis mettent en lumière les avantages et les limites de cette technique. De plus, l'article explore le potentiel de l'imagerie satellite MTInsar pour renforcer la surveillance des fontis autour des infrastructures équipées de fibres optiques.

ABSTRACT – This paper presents preliminary research results on sinkhole collapse detection, combining fibre optic sensing and satellite imaging. The laboratory experiments demonstrate the effectiveness of fibre optics in detecting ground subsidence, while finite element analyses highlight the advantages and limitations of this technique. The article also explores the potential use of MTInsar satellite imagery to enhance monitoring of sinkholes around infrastructure equipped with fibre optics.

1. Introduction

1.1. 1.1 Contexte et motivation

Les effondrements de fontis, aussi connus sous le nom de dolines, sont parmi les géohazards les plus courants et les plus perturbateurs. Un fontis se produit lorsque le sol s'effondre en surface, généralement suite à l'apparition d'une cavité souterraine en expansion entraînant un effondrement progressif des terrains souterrains porteurs. Les fontis peuvent également être le résultat de l'effondrement de mines souterraines. L'effondrement d'un fontis peut être déclenché par des pluies abondantes, des inondations ou des fuites de canalisations, provoquant l'effondrement d'une cavité préalablement stable. Le changement climatique accroît la probabilité d'événements météorologiques extrêmes, ce qui pourrait entraîner une augmentation de la formation de fontis.

La construction d'infrastructure sur un fontis actif comporte le risque d'une instabilité progressive du sol, et peut entraîner des coûts de réparation post-effondrement allant de 10,000€ à plusieurs millions d'euros. La détection suffisamment tôt d'un début d'affaissement offre la possibilité d'entreprendre des travaux correctifs avant que des dommages importants ne se répercutent sur les infrastructures. Cependant, jusqu'à présent, aucune méthode efficace ne se distingue pour prédire l'effondrement de fontis actifs. Les techniques actuelles matures (quatre premières lignes du Tableau 1) nécessitent souvent une surveillance manuelle et périodique de toutes les fissures et cavités en profondeur de sol et sur une grande surface, et/ou n'offrent qu'une faible résolution.

Tableau 1. Techniques de détection des dolines (adapté de Möller *et al.*, 2022)

Technique	Fréquence temporelle	Zone de Couverture	Résolution	Coût	Sous la surface
Propagation des ondes sismiques	T. Faible	T. Faible	Faible	Elevé	✓
Réflectométrie du domaine temporel	T. Elevé	Moyen	T. Faible	Moyen	✓
Géoradar	T. Faible	Faible	Faible	Moyen	✓
Balayage laser aéroporté	T. Faible	Moyen	Moyen	T. Elevé	
Topographie de précision	T. faible	T. Faible	Elevée	Moyen	✓
Caméra descendue en forage	T. faible	T. Faible	T. Elevée	Elevé	✓
Radar interférométrique à synthèse d'ouverture basé au sol	Elevé	Moyen	Faible	Moyen	
Radar Interférométrique multi-temporelle à synthèse d'ouverture (MTInSAR)	Moyen	T. Elevé	Faible	Faible	
Détection de contrainte à fibre optique distribuée (DFOS)	T. Elevé	Moyen	T. Elevé	Moyen	✓

La surveillance par images satellite (Radar à Synthèse d'Ouverture Interférométrique multi-temporelle, MTInsar) est un outil puissant pour le suivi des affaissements provoqués par des fontis, avec l'avantage de couvrir des zones extrêmement vastes. Cependant, la technologie MTInsar repose sur le cycle de répétition en orbite du satellite pour sa fréquence temporelle (typiquement 7 jours), ne fournit pas d'informations sur la déformation du sol en profondeur, et est actuellement coûteuse en termes de traitement informatique si cette technologie est utilisée sans cibler une zone spécifique d'intérêt. Par conséquent, cette technologie pourrait être mieux exploitée en conjonction avec une autre technique de surveillance en profondeur de sol, plus fréquente et localisée.

Les technologies de détection distribuée par fibre optique (Distributed Fibre Optic Sensing - DFOS) offrent la capacité de mesurer de petites déformations, sont économiquement intégrables dans la construction de nouvelles infrastructures linéaires, et permettent des mesures de déformation en subsurface. L'utilisation de la fibre optique serait donc adaptée à la détection de fontis. Cependant, se pose la question de savoir si cette technologie est en mesure de détecter les fontis suffisamment tôt. Offre-t-elle un profil de déformation suffisamment clair pour prédire l'emplacement d'un fontis actif ? Les limitations d'utilisation de la DFOS, telles que le couplage entre le sol et le câble, peuvent-elles entraver l'interprétation des résultats ? En outre, comment cette technologie peut-elle être intégrée aux techniques de surveillance par satellite ?

1.2. Le Projet SINEW

Le projet SINEW a pour objectif de déterminer si l'utilisation conjointe de la surveillance par fibre optique (DFOS) et de la Détection Interférométrique Multi-Temporelle par Radar à Synthèse d'Ouverture (MTInsar) peut constituer une méthode efficace pour détecter les fontis actifs en expansion, permettant ainsi la mise en œuvre de travaux de consolidation du sol à un stade suffisamment précoce. Ces deux technologies relativement nouvelles se complètent parfaitement pour cette application (Tableau 1). Ensemble, elles peuvent offrir une méthode très précise et relativement économique pour détecter suffisamment tôt les fontis sur une très grande superficie et avec une fréquence temporelle satisfaisante.

Le projet est particulièrement pertinent pour les infrastructures linéaires nouvellement construites, telles que les routes ou les voies ferrées, pour lesquelles l'utilisation de la fibre optique est particulièrement adaptée. L'utilisation combinée de la MTInsar permet d'étendre la surveillance à (i) la détection continue des fontis lorsque l'interrogateur DFOS n'est pas disponible et (ii) une zone plus étendue, loin de l'infrastructure linéaire, facilitant l'identification de fontis qui ne se forment pas directement sous la DFOS, mais qui représentent toujours une menace potentielle pour l'infrastructure. L'utilisation combinée de

la fibre optique et des images satellites permet également de surveiller l'impact de la formation d'un fontis sur les infrastructures critiques avoisinantes, par exemple, un hôpital.

2. Méthodologie

Cet article allie modélisation physique et numérique ainsi qu'une analyse d'image satellites afin d'établir la faisabilité de la méthodologie sus décrite pour la détection des fontis.

2.1. Campagne expérimentale sur fibre optique

Le papier présente ainsi une série de tests en laboratoire à 1g réalisée pour comprendre de manière systématique la réponse d'un câble DFOS installé dans un sol sableux à plusieurs altitudes au-dessus d'une subsidence en expansion simulé par un mécanisme de trappe. L'étude expérimentale a été réalisée à l'aide d'un conteneur rectangulaire de 790 x 200 mm, équipé d'une trappe de largeur $B = 100$ mm, asservie en déplacement à l'aide d'un vérin hydraulique et capable de reproduire la formation d'un fontis (Figure 1 (a,b)). La hauteur de l'échantillon est de $H = 200$ mm ($H/B = 2$), et un tiers du sable est ici teint en bleu foncé pour augmenter le contraste entre particules de sable dans le but d'utiliser la Vélocimétrie par Images de Particules (PIV) pour suivre les déformations du sable. Ce montage permet ainsi d'observer rigoureusement (i) les mécanismes de rupture et déformation causés par la formation du fontis (Möller et al. 2022) et (ii) le profil des déformation du sol le long d'un câble DFOS (pour être ensuite comparé à celui de la fibre optique). Les images pour l'analyse PIV ont été acquises à l'aide de deux appareils photo Canon Powershot G10.

Les câbles utilisés pour cette étude sont des câbles de détection de contrainte en fibre optique de 2 mm de diamètre, revêtus de polyuréthane. Ils sont connectés à l'analyseur Luna ODiSI 6100, qui offre une résolution spatiale de 2,6 mm. L'analyseur mesure la déformation sur une plage de ± 12000 $\mu\epsilon$ avec une précision de ± 30 $\mu\epsilon$.

La campagne d'essais comprend des tests avec différentes conditions de sol, décrits en détail dans Möller *et al.* 2022, ainsi que diverses hauteur et techniques de pose de câble (Xu *et al.* 2022). Ces conditions furent par la suite rigoureusement analysées pour identifier le profil de déformation caractéristique de la DFOS et son interprétation par rapport à la géomécanique de la formation d'un fontis (Möller *et al.* 2022). Compte tenu des limitations liées aux faibles niveaux de contrainte sur ce type d'expériences à 1g, il est entendu que les résultats, et en particulier les valeurs numériques, sont indicatifs uniquement.

2.2. Modélisation numérique

Les résultats de ces expériences, bien que très informatifs sur le comportement général de la fibre, sont rapidement affaiblis par des incertitudes dues aux niveaux de contrainte faibles des expériences à 1g. Afin d'assurer un niveau de contrainte représentatif, des tests en centrifugeuses seraient requis. Cependant, au moment où cette étude fût réalisée, l'analyseur Luna ODiSi 6100, instrumental dans cette étude, ne pouvait pas être utilisé en vol sur centrifugeuse géotechnique.

Afin d'approfondir l'analyse du comportement du sol à proximité du câble, des analyses éléments finis (FE) en 3D ont donc été réalisées en complément de l'étude expérimentale, permettant une mises à l'échelle à des niveaux de contrainte réalistes pour des applications sur le terrain (Figure 1(c)). Les règles de similitudes décrites dans Möller et al. (2022) et Della Ragione et al. (2023b) ont été rigoureusement suivies afin que les résultats numériques et expérimentaux correspondent à la même géophysique. Le modèle est décrit en détail dans Della Ragione et al. (2023b) et reproduit ainsi la formation d'un gouffre de 2 m de largeur dans des conditions de contrainte plane, situé à 4 m sous le niveau du sol dans un sable à $D_R=87,5$ %.

L'analyse par éléments finis permet également d'étendre facilement les résultats au cas d'un fontis circulaire en 3D, où les câbles seraient disposés en grille, à une distance plus

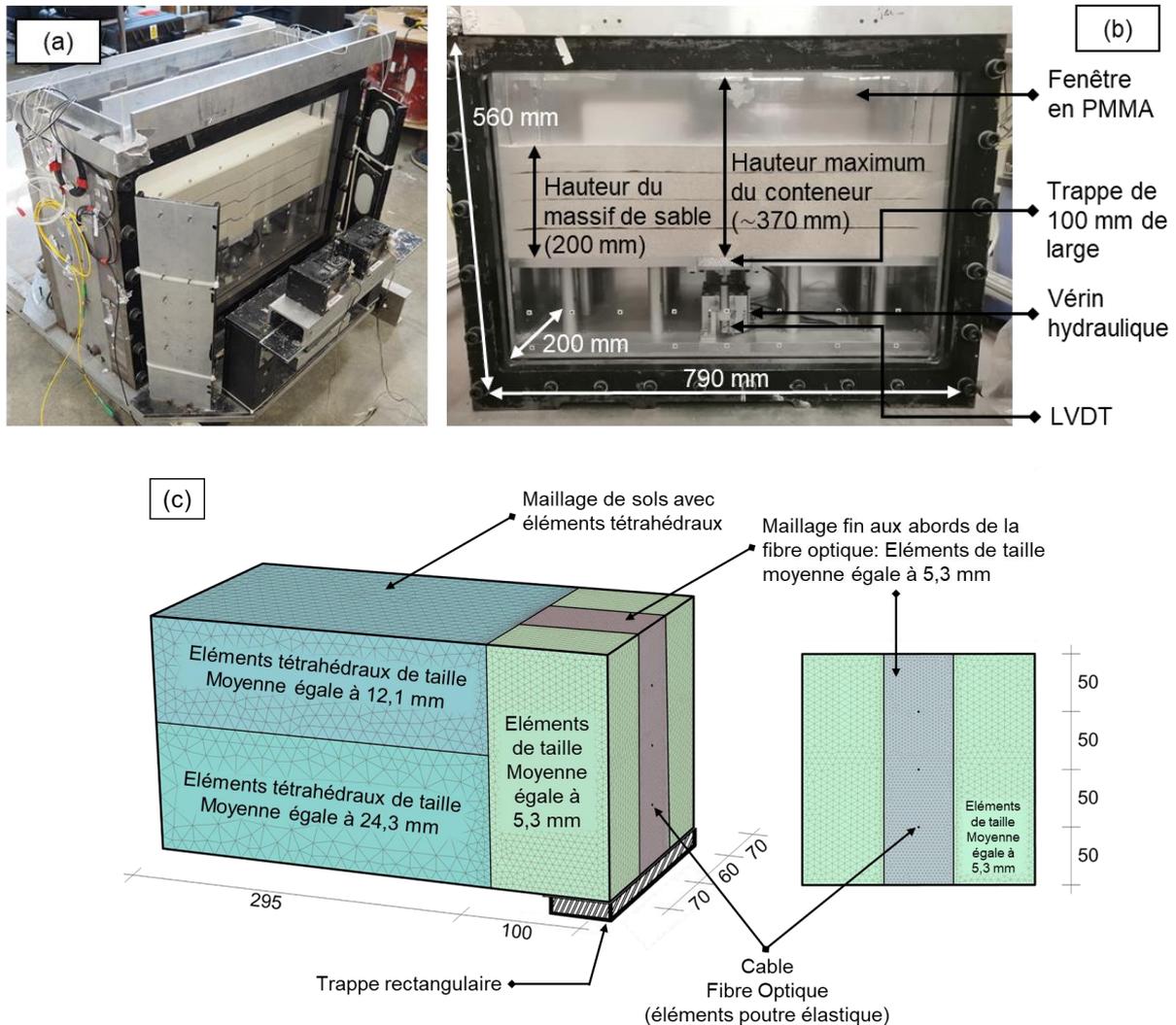


Figure 1 (a, b) Photos du montage expérimental à 1g (Photo 1(b) adaptée de Möller et al., 2022) et (b) Modèle numérique éléments finis reproduisant le massif de sol expérimental (adapté de Della Ragione et al., 2023b)

ou moins excentrée de l'axe central du câble. Cette étude permet d'étudier le cas d'un fontis se formant à une certaine excentricité par rapport à l'infrastructure surveillée.

2.3. Radar à Synthèse d'Ouverture Interférométrique Différentiel (MTInsar)

La technologie de Radar à Synthèse d'ouverture Interférométrique Différentielle par Satellite (MTInsar) est une technique de télédétection qui utilise des systèmes radar embarqués sur des satellites pour générer des images haute résolution de la surface de la Terre et mesurer les changements du terrain au fil du temps. Les techniques MTInsar pour la surveillance des déformations exploitent les informations contenues dans la phase d'au moins deux images SAR complexes acquises dans la même géométrie d'imagerie (direction de passage ascendant/descendant, angle d'incidence, polarisation, etc.) à différents moments sur la même zone, en formant un interféro-gramme (Bamler and Hartl, 1998; Rosen et al., 2000). En exploitant une pile d'images SAR multiples, les techniques InSAR peuvent permettre la mesure de mouvements à l'échelle du millimètre sur une longue période de temps. La technique Interférométrie de Scintillement Persistant (Persistent Scatter Interferometry, PSI), employée dans ce papier, utilise des réflecteurs dont la réponse au radar est dominée par un objet réfléchissant fort et reste constante au fil du temps (Ferretti et al., 2000, 2001). Elle est particulièrement adaptée aux zones urbaines.

Cet article démontre la possibilité d'utiliser les techniques MTInsar pour la détection de formation de fontis, en ciblant une zone d'intérêt. La zone sélectionnée ici est le parking de l'hôpital de Naples (Italie), où un fontis de 20 mètres de profondeur s'est ouvert le 8 janvier 2021, affectant une zone de 2 000 mètres carrés. Le fontis s'est effondré suite à deux semaines de fortes pluies, engloutissant quelques voitures et entraînant la fermeture temporaire de l'un des bâtiments de l'hôpital, en pleine pandémie Covid-19. Les données satellites disponibles pour cette zone remontent à 2016, permettant un suivi très précis de la déformation du sol au fil du temps. Cette étude permet de valider l'utilisation potentielle de la technologie MTInsar pour le suivi de l'effondrement d'un fontis en zone urbaine, près d'infrastructure critique qui auraient potentiellement pu être instrumentée avec de la fibre optique. Dans cette étude, une série d'images du satellite radar C-band Sentinel-1 de l'Agence spatiale européenne (ESA) du 2 janvier 2018 au 4 janvier 2021 (juste avant la date d'effondrement du sinkhole) ont été traitées.

3. Détection précoce de l'expansion des fontis par DFOS

3.1. Profil caractéristique des contraintes optiques de la fibre

Les Figures 2(a,b) présentent les résultats du câble supérieur DFOS pour un échantillon de densité moyenne, comparés au profil de contrainte obtenu à partir de la PIV, à un stade très précoce de la formation du fontis ($\delta \leq 2\%$ de la largeur de la trappe, da Silva *et al.*, 2021). Ces résultats démontrent un profil de contrainte caractéristique clair, avec un pic situé à l'épicentre du fontis. Ce signal peut donc être utilisé pour détecter l'expansion précoce d'un fontis. Ils confirment également que les câbles DFOS sont capables de détecter les caractéristiques clés des profils de déformation observés dans le sol, loin du câble.

Cependant, des différences dans les profils de contrainte sont ici observées, causées par la réalisation des tests à faible niveaux de contrainte : (i) l'amplitude de la contrainte est beaucoup plus faible ; (ii) la largeur des profils de contrainte est beaucoup plus importante, et (iii) la contrainte ne retourne pas à zéro aux bords du massif pour des échantillons peu denses à moyennement denses. Ceci nécessite une validation supplémentaire.

Les Figures 2(c,d) étendent ces conclusions à des niveaux de contrainte réalistes, obtenus lors d'un test en centrifugeuse à 40g pour un déplacement équivalent de la trappe de $\delta = 2\%$ de B. Les graphes comparent la déformation du sol obtenue à partir de l'analyse numérique aux données expérimentales PIV issues d'un test en centrifugeuse publié par da Silva (2018), mais sans câble DFOS. Les résultats montrent une bonne concordance avec les expériences, validant le modèle. La Figure 2(d) illustre les résultats qui pourraient être obtenus si la fibre optique était placée dans un tel massif de sol, en considérant un cas idéal de couplage parfait sol-câble (rugueux) et le cas le pire où ce couplage serait inexistant (lisse). Les résultats montrent que les problèmes observés à 1g disparaissent, en particulier dans le cas idéal d'un câble rugueux. L'évasement du profil de déformation et la diminution de l'amplitude de déformation apparaît dès lors qu'une perte de couplage câble-sol se produit, expliquant les résultats de la Figure 2(b), pour lesquels le couplage à 1g est bien plus faible qu'en conditions normales à plus grand niveaux de contrainte. Ceci est encourageant quant à la mise en place des techniques de détection par fibre optique pour la détection de l'effondrement de fontis.

3.2. Détection de cavités en 3D et couplage fibre optique-image satellites

Les résultats de l'analyse en 2D à 40g sont étendus à une analyse en 3D en utilisant un modèle similaire à celui de la Figure 1(c), mais avec une géométrie axisymétrique intégrant une trappe circulaire (Figure 3(a)). Les spécificités de ce modèle sont détaillées dans les travaux de Della Ragione *et al.* (2023a,b). Le câble a été modélisé de manière rugueuse pour représenter un scénario idéal. La Figure 3(b) illustre l'impact de l'excentricité de

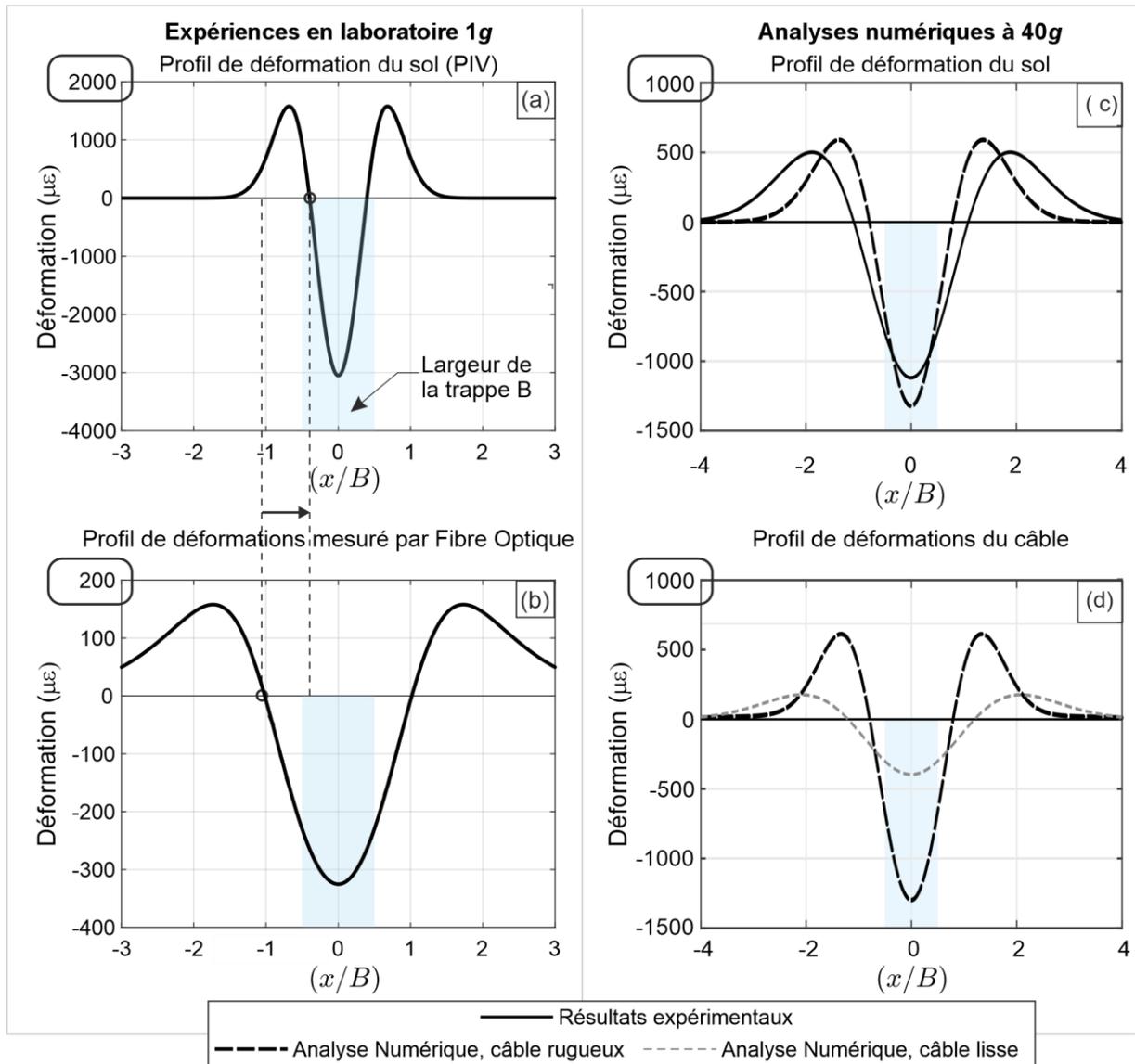


Figure 2 (Gauche) Résultats expérimentaux en 2D à 1g : Comparaison des profils de contrainte entre (a) PIV et (b) DFOS. $D_R = 52\%$, $\delta = 2\%B$, câble du haut = couche supérieure (Droite) Analyses numériques en 2D à 40g : (c) profil de déformation du sol, comparé avec les données expérimentales PIV et (d) un câble DFOS rugueux et lisse. $D_R = 87\%$, $\delta = 2\%B$, câble du haut = couche supérieure.

l'emplacement du câble y/D et montre la réduction de la courbe de déformation par rapport à cette excentricité. Les résultats révèlent une réduction abrupte de l'amplitude de la contrainte sur le bord de l'empreinte de la trappe ($y/D \geq 1$), mais étant tout de même visible sur la courbe de déformation ainsi que sur le déplacement du câble (Figures 3(b)). Ceci est possible grâce au déplacement horizontal des grains de sable en surface lors de la formation du fontis. Ce mouvement horizontal plus étendu du sol proche de la surface affecte une zone beaucoup plus large que le diamètre de la cavité, et est donc détectable par les câbles proche de la surface (Figure 3(b)), même en l'absence d'alignement direct avec l'empreinte du fontis. Le câble réagit à ce mouvement, générant ainsi un profil de contrainte caractéristique permettant une détection marginale du fontis en périphérie de la cavité (pour une analyse approfondie, voir Della Ragione et al., 2023a).

Comme indiqué dans le Tableau 1, l'utilisation combinée de la surveillance par satellite pourrait dans le cas d'une obtention de signal faible comme détaillée ci-dessus, permettre d'améliorer la surveillance par fibre optique (DFOS), en outre lorsque le fontis ne se forme

pas directement sous l'infrastructure instrumentée, et/ou à une grande profondeur, et que le profil caractéristique de contrainte obtenu le long de la fibre est faible.

Des résultats illustratifs de l'analyse par image satellite de l'effondrement du fontis de l'hôpital de Naples sont montrés en Figure 3(c). Cette image montre une formation nette d'une dépression visible au moins à partir de Juin 2018, plus de 6 mois avant l'effondrement total du fontis. Le profil correspond bien avec le profil idéal de formation d'une subsidence (Figure 3(a)), malgré un profil de sol bien différent et des conditions réelles plutôt qu'idéalisées. Ce résultat démontre un avenir prometteur pour ce type de technologie.

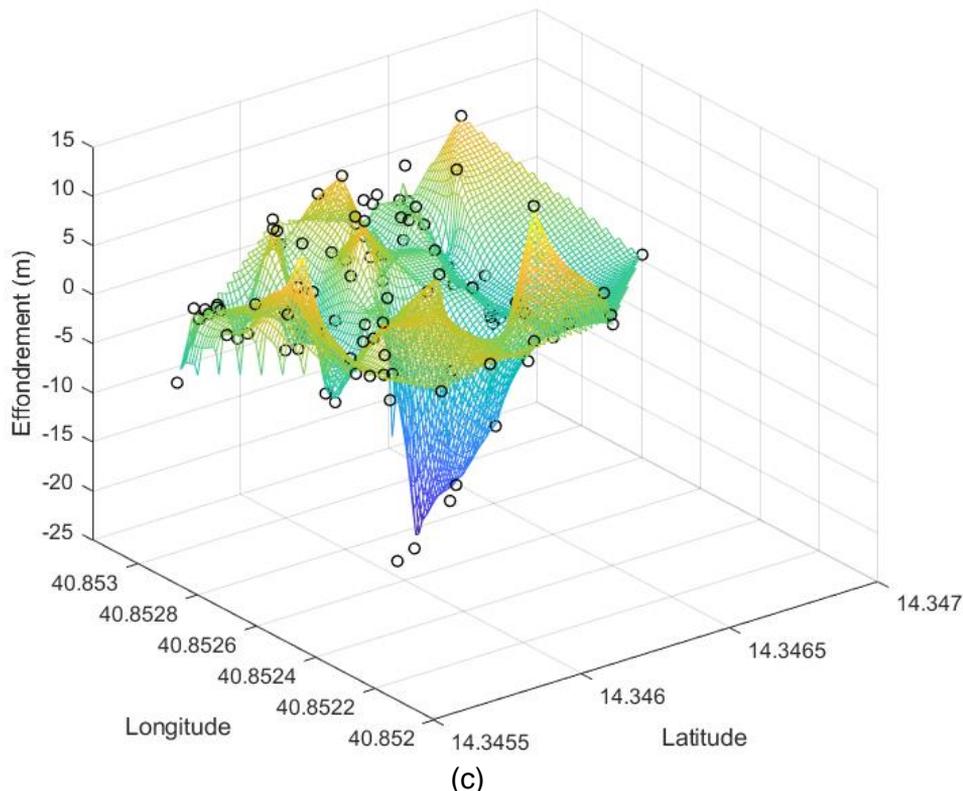
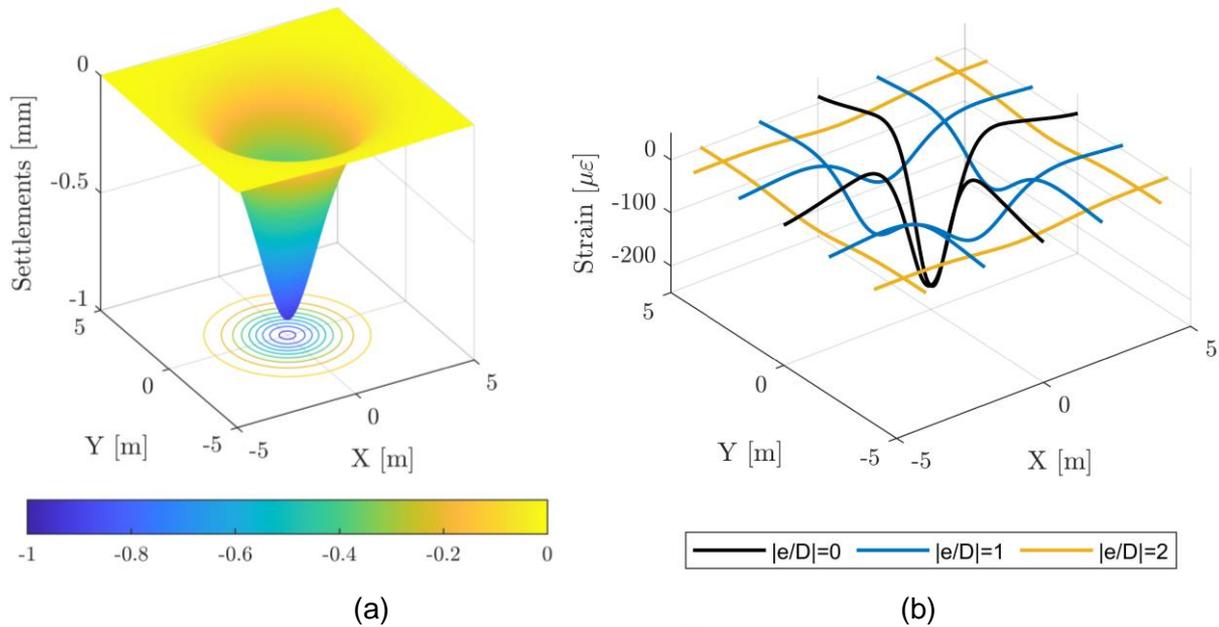


Figure 3. Cas théorique idéalisé en sol sableux : (a) Déplacement vertical du sol, (b) Déplacement et (b) profil de déformations des câbles rugueux à $z = 3$ m au-dessus de la trappe circulaire (extraits de Della Ragione *et al.* 2023a)
 Cas pratique : (c) comparaison avec les résultats d'imagerie satellite pour l'effondrement de fontis de Naples en Janvier 2021 –analyse des images de Juin 2017 au 20 juin 2020

4. Conclusions

Cette étude confirme l'efficacité de la détection précoce de l'expansion des fontis grâce à la fibre optique (DFOS), combinée à l'utilisation d'images satellites. Le papier présente des essais expérimentaux à 1g, associés à des analyses par éléments finis, ainsi que les résultats d'une surveillance par image satellite d'un vrai fontis. Les données DFOS présentent un profil caractéristique des déformations clair qui reproduit les principales caractéristiques du profil de déformation du sol. Le câble enregistre une amplitude de déformation inférieure à celles réelles dans le sol, un aspect qui s'accroît avec (i) un niveau de contrainte plus bas et (ii) un manque de couplage sol-câble. De plus, à mesure que la hauteur du câble au-dessus du fontis augmente, le signal de contrainte s'affaiblit, mais la capacité à détecter le fontis s'améliore, surtout lorsqu'il est positionné à distance de l'axe central de l'affaissement. Cela s'explique par le fait que les câbles proches de la surface du sol sont plus susceptibles d'être influencés par les mouvements horizontaux du sol générés par la largeur importante de la dépression due au mécanisme en entonnoir du fontis proche de la surface. Si un signal faible est détecté, il est envisageable d'utiliser le radar à ouverture synthétique interférométrique multi-temporel (MTInsar) pour déduire l'affaissement et la vitesse de la surface du sol, permettant ainsi de préciser la position potentielle du fontis et les dégâts potentiels sur les infrastructures avoisinantes.

5. Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier le CSIC (Centre for Smart Infrastructure and Construction, Cambridge), l'EPSRC (Engineering and Physical Sciences Research Council, référence EP/N021614/1) et Innovate UK (920035) pour le financement et le soutien de ce projet.

6. Références bibliographiques

- Bamler, R. and Hartl, P. (1998) 'Synthetic Aperture Radar Interferometry.', *Inverse Problems*, 14
- da Silva Burke, T. S. and Elshafie, M. Z. E. B. (2021) 'Arching in granular soils: experimental observations of deformation mechanisms', *Géotechnique*, 71(10), pp. 866–878. <https://doi.org/10.1680/jgeot.19.P.174>
- da Silva, T. S. (2018) Centrifuge modelling of the behaviour of geosynthetic-reinforced soils above voids. PhD thesis, University of Cambridge. <https://doi.org/10.17863/CAM.21808>
- G. Della Ragione, C. N. Abadie, X. Xu, T. S. da Silva Burke, T. Möller, and E. Bilotta (2023a) 'Fibre optic sensing for strain-field measurement in geotechnical laboratory experiments' *Géotechnique Letters* 2023 13:4, 196-203 <https://doi.org/10.1680/jgele.23.00048>
- Gianluigi Della Ragione, Emilio Bilotta, Xiaomin Xu, Talia S. da Silva Burke, Tobias Möller, and Christelle N. Abadie (2023) 'Numerical investigation of fibre optic sensing for sinkhole detection', *Géotechnique*, <https://doi.org/10.1680/jgeot.22.00241>
- Ferretti, A., Prati, C. and Rocca, F. (2000) 'Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry', *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 38(5), pp. 2202–2212. <https://doi.org/10.1109/36.868878>
- Ferretti, A., Prati, C. and Rocca, F. (2001) 'Permanent scatterers in SAR interferometry', *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(1), pp. 8–20. <https://doi.org/10.1109/36.898661>
- Gutiérrez, F. et al. (2019) 'Review on sinkhole monitoring and performance of remediation measures by high-precision leveling and terrestrial laser scanner in the salt karst of the Ebro Valley, Spain', *Engineering Geology*, 248, pp. 283–308. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.12.004>
- Möller, T. et al. (2022) 'Distributed fibre optic sensing for sinkhole early warning: experimental study', *Géotechnique*, 0(0), pp. 1–15. <https://doi.org/10.1680/jgeot.21.00154>
- Rosen, P. A. et al. (2000) 'Synthetic aperture radar interferometry', *Proceedings of the IEEE*, 88(3), pp. 333–382. <https://doi.org/10.1109/5.838084>
- Xu, X., Abadie, C. N., et al. (2022) 'On the use of high-resolution distributed fibre optic sensing for small-scale geotechnical experiments at 1g', in 10th International Conference on Physical Modelling in Geotechnics (ICPMG). Daejeon, Korea. <https://doi.org/10.17863/CAM.92635>