



**HAL**  
open science

# Photogrammétrie mobile pour la reconstruction 3D des expériences en centrifugeuse géotechnique

Cristian Soriano-Camelo, Luc Thorel, Matthieu Blanc

► **To cite this version:**

Cristian Soriano-Camelo, Luc Thorel, Matthieu Blanc. Photogrammétrie mobile pour la reconstruction 3D des expériences en centrifugeuse géotechnique. 12èmes Journées Nationales de Géotechnique et Géologie de l'Ingénieur, Comité Français de Mécanique des Sols et de Géotechnique (CFMS); Comité Français de Mécanique des Roches (CFMR); Comité Français de Géologie de l'Ingénieur et de l'Environnement (CFG); Laboratoire IC2MP (Institut de Chimie des Milieux et des Matériaux de Poitiers, UMR CNRS 7285, Jun 2024, Poitiers, France. 10.5281/zenodo.13771329 . hal-04699716

**HAL Id: hal-04699716**

**<https://univ-eiffel.hal.science/hal-04699716v1>**

Submitted on 17 Sep 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.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

# **PHOTOGRAMMETRIE MOBILE POUR LA RECONSTRUCTION 3D DES EXPÉRIENCES EN CENTRIFUGEUSE GEOTECHNIQUE**

## **MOBILE PHOTOGRAMMETRY FOR 3D RECONSTRUCTION OF CENTRIFUGE EXPERIMENTS IN GEOTECHNICAL ENGINEERING**

Cristian SORIANO-CAMELO<sup>1</sup>, Luc THOREL<sup>1</sup> et Matthieu BLANC<sup>1</sup>

<sup>1</sup> CG-Lab, Université Gustave Eiffel, Nantes, France

**RÉSUMÉ** – La technique de photogrammétrie permet de reconstruire un modèle 3D à partir d'un ensemble de photographies. On étudie la faisabilité d'utiliser des caméras de smartphones pour collecter des données pour la reconstruction 3D de modèles de surface de modèles réduits centrifugés. Le processus comprend la prise de photographies du sujet, l'alignement des photographies, l'échellement et la génération de maillage. Deux modèles 3D d'expériences menées à la Centrifugeuse Géotechnique de l'Université Gustave Eiffel, portent sur l'analyse des tassements des fondations superficielles et l'évaluation de la déformation d'un ancrage par succion sous charge latérale. Le traitement des photographies a été effectué à l'aide du logiciel Reality Capture, ce qui a révélé une bonne concordance entre les tassements mesurés et les déformations du sol dans les essais de centrifugation sélectionnés.

**ABSTRACT** – Photogrammetry is a technique employed for the reconstruction of 3D models from a set of photos. This methodology is gaining popularity in engineering applications, including geotechnical studies. This research investigates the feasibility of utilizing smartphone cameras to gather input data for reconstructing 3D models of centrifuge experiments. The workflow involves capturing images of the subject, aligning the images, scaling, and mesh generation. We propose a photogrammetry workflow, exemplified by two 3D models of centrifuge experiments conducted at the Geotechnical Centrifuge of the Université Gustave Eiffel. These models encompass settlement analysis of shallow foundations and deformation assessment of a suction anchor under lateral load. Photo processing employs Reality Capture software, revealing good agreement between measured settlements and ground deformations in the selected centrifuge tests.

### **1. Introduction**

La modélisation en centrifugeuse s'est établie comme un outil de recherche fiable permettant de clarifier le comportement géotechnique dans une grande variété de problèmes aux limites. Dans le cadre d'essais en centrifugeuse, il est possible d'installer divers types de capteurs pour étudier l'interaction entre le sol et les structures soumises à des conditions de chargement simples ou complexes. Avec les récents développements en photographie numérique et en logiciels de génération de répliques virtuelles d'objets (jumeaux numériques), la possibilité d'intégrer les techniques de photogrammétrie à la modélisation en centrifugeuse émerge comme une alternative à la visualisation et à la préservation des géométries des modèles en centrifugeuse.

La photogrammétrie a gagné en notoriété dans divers domaines de l'ingénierie, y compris les applications géotechniques, en raison de sa nature non destructive et de sa capacité à produire des modèles 3D haute résolution à faible coût (Fang et al., 2023). Les caméras de smartphones, avec leur disponibilité répandue et leur facilité d'utilisation, ont émergé comme une option viable pour capturer les images requises pour l'acquisition de données basée sur la photogrammétrie (An et al., 2024).

Cet article explore la faisabilité de l'utilisation de caméras de smartphones pour reconstruire des modèles 3D d'expériences en centrifugeuse. Le flux de travail présenté

comprend l'acquisition d'images, l'alignement des images, l'échelonnage et la génération de maillage. Pour démontrer l'efficacité de cette approche, deux études de cas portant sur des expériences en centrifugeuse réalisées à l'Université Gustave Eiffel sont présentées : l'analyse des tassements de fondations superficielles et les déplacements permanents d'une ancre à succion soumise à une charge latérale. Le logiciel de photogrammétrie RealityCapture a été utilisé pour le traitement des images et la génération des modèles 3D. Les modèles ont ensuite été exportés vers la plate-forme en ligne Sketchfab pour permettre la visualisation et l'interaction avec les modèles 3D générés. Les résultats démontrent un haut degré de corrélation entre les déformations du sol mesurées directement à partir des modèles en centrifugeuse et les mesures obtenues à partir des modèles 3D.

## 2. Matériaux et méthodes

Dans cette étude, une caméra de smartphone de 50 MP, équipée d'un capteur Sony IMX766, d'une distance focale équivalente de 23,6 mm et d'un objectif à ouverture f/1,8, a été utilisée pour la capture des données photogrammétriques. Les images des modèles ont été initialement prises au format RAW. Par la suite, lors du post-traitement, le taux de compression des images a été ajusté. Toutes les images capturées d'un modèle ont été traitées en lot à l'aide d'un processeur d'images (XnConvert de XnView Software, 2024), et la compression des images RAW a été effectuée, produisant des images JPEG (Wallace, 1992) avec un niveau de qualité de 90 %. Cette procédure garantit la cohérence en termes de qualité pour l'ensemble des photos d'un modèle.

Pour cet article, la reconstruction photogrammétrique a été réalisée pour deux expériences menées à la centrifugeuse géotechnique de l'Université Gustave Eiffel. La première expérience, réalisée dans le cadre du projet ASIRI+ (2024), consistait en un essai de charge statique à 50g visant à évaluer la capacité portante de deux fondations : l'une supportée par un profil de sol renforcé par des inclusions rigides et l'autre sur un sol mou non renforcé (Figure 1). La deuxième expérience était un essai de charge latérale sur une ancre à succion à 75g, installée dans un argile normalement consolidée (Figure 2), un essai en centrifugeuse réalisé dans le cadre du projet SHAREWIND (2024).

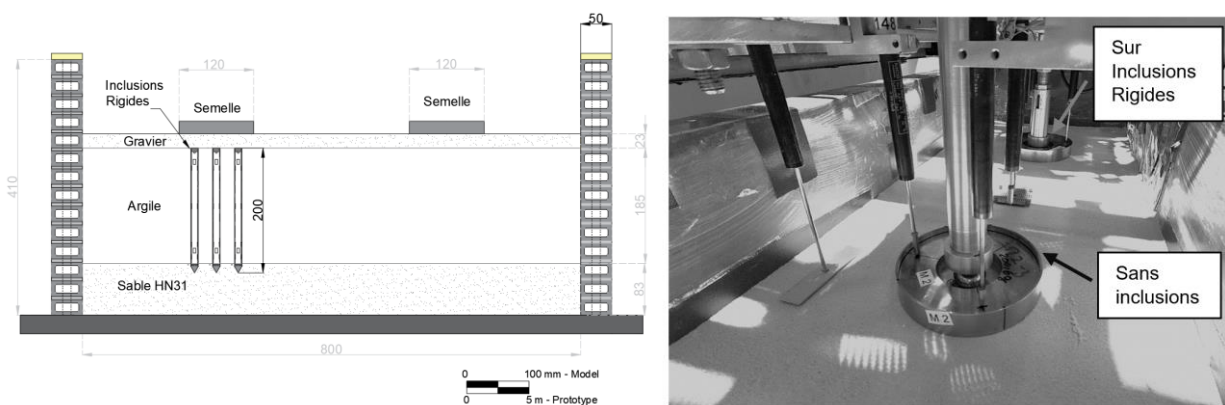


Figure 1. Essai de charge statique sur deux fondations superficielles - Projet ASIRI+

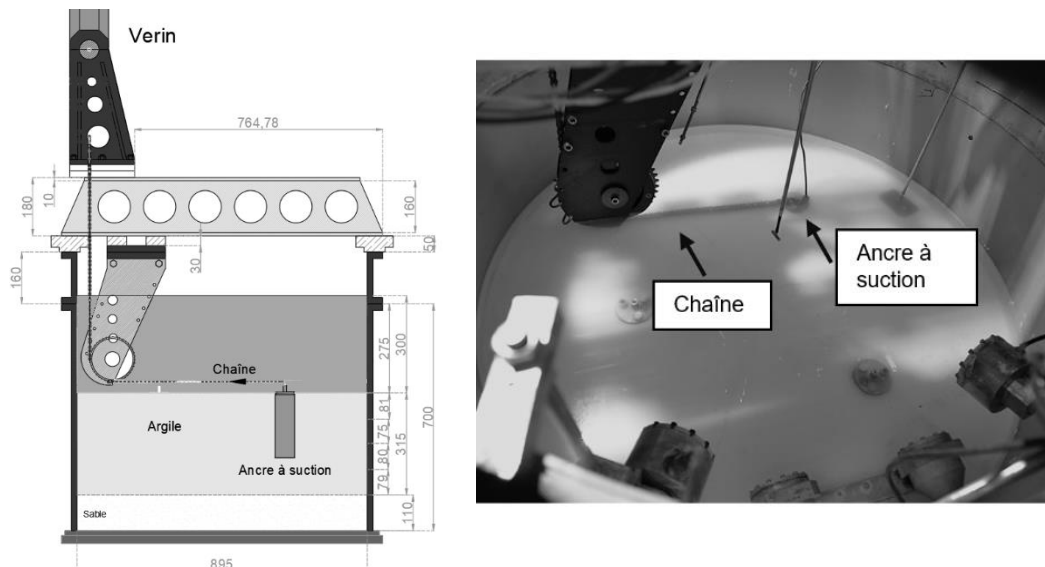


Figure 2. Essai d'ancre à suction - Projet SHAREWIND

## 2.1 Logiciel

Pour le traitement des photographies des modèles, le logiciel RealityCapture (RC) a été utilisé (Frost et al., 2023). RC est un logiciel de modélisation 3D photogrammétrique de haute qualité qui permet la génération de nuages de points 3D et de maillages. Il peut traiter divers types de données d'entrée pour la reconstruction de modèles 3D, notamment des images fixes, des vidéos et des scans LiDAR. La capacité de RC à gérer d'importants ensembles de données s'est avérée particulièrement adaptée aux expériences menées en centrifugeuse géotechnique.

Pour faciliter la diffusion et l'accessibilité des modèles photogrammétriques obtenus, Sketchfab (2023), une plateforme de modèles 3D basée sur le cloud, a été employée. Sketchfab offre la possibilité aux utilisateurs de télécharger, partager et intégrer des modèles 3D dans diverses applications Web et mobiles. Parmi ses fonctionnalités figurent une visualisation de haute qualité, une exploration interactive des modèles, un contenu intégrable dans des sites Web et différentes plateformes numériques, ainsi qu'un contrôle de version pour suivre les modifications, le tout conformément aux licences Creative Commons.

## 2.2. Acquisition de données

La reconstruction photogrammétrique a été entreprise après les expériences en centrifugeuse dans le but de capturer les tassements des fondations et les déformations de la surface du terrain autour du caisson à suction soumis à une charge latérale. Avant la capture des images, il était essentiel de définir des points de référence de mise à l'échelle pour le post-traitement de la reconstruction photogrammétrique. À cette fin, un ensemble de cibles de type AprilTag (Olson, 2011) a été positionné à divers endroits du modèle en centrifugeuse, suivant une disposition avec une distance connue entre elles. Les cibles AprilTag sont spécifiquement conçues pour des applications de vision par ordinateur, notamment la photogrammétrie, de manière à ce que leurs motifs soient détectables par le logiciel de photogrammétrie. Un ensemble de cibles pour la campagne expérimentale actuelle a été généré à l'aide du générateur OpenCV (2017). La Figure 3 illustre quelques exemples de cibles AprilTag, tandis que la Figure 4 présente la disposition des cibles sur la surface de l'un des modèles. Une séparation de 10 cm entre les cibles, mesurée de centre à centre, a été adoptée comme critère d'échelle pour le modèle.

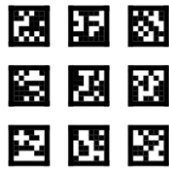


Figure 3. Exemple d'AprilTags (type 36h11) générés par OpenCV.

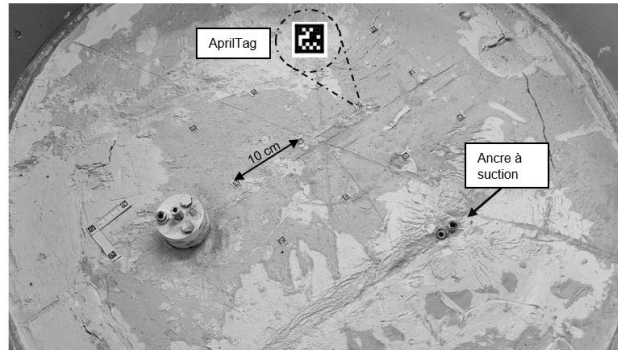


Figure 4. Positionnement des marqueurs à la surface d'un modèle

Pour chaque modèle, un ensemble de 100 images numériques a été capturé de manière séquentielle en suivant une trajectoire circulaire autour de la surface du modèle, créant ainsi un ensemble d'images superposées. Ce processus a permis de capturer toutes les parties de la surface des modèles sous différents angles, en vue de la reconstruction photogrammétrique. Afin d'avoir un contrôle accru sur l'acquisition d'images, le mode manuel a été configuré dans les paramètres de l'appareil photo, assurant ainsi une mise au point constante et des réglages d'exposition. La Figure 5 illustre les positions de l'appareil photo pour l'un des modèles, ainsi qu'une représentation schématique de la procédure de capture d'images.

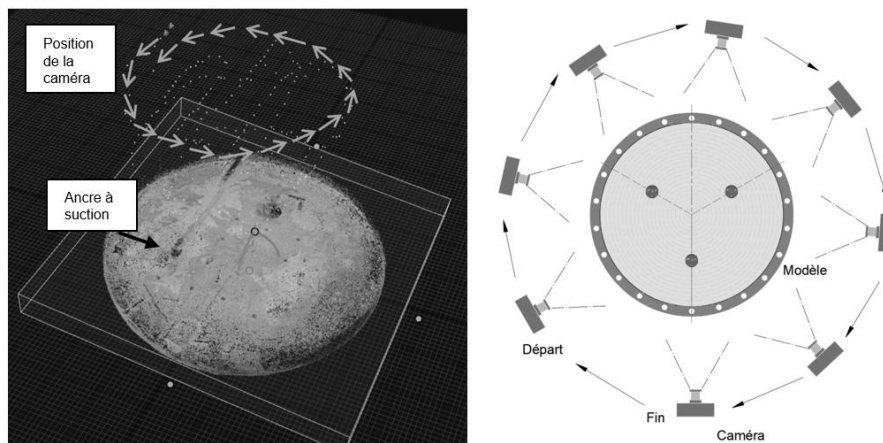


Figure 5. Position de la caméra pour l'acquisition de la partie supérieure du modèle.

### 2.3 Traitement des données – Processus dans Reality Capture

Reality Capture suit généralement un processus en cinq étapes : alignement des images, détection des points de contrôle, génération du modèle de maillage, "mapping" de texture et vérification de l'échelle du modèle :

**Alignement d'images** : la première étape consiste à aligner les images prises du modèle. Reality Capture utilise des algorithmes d'alignement d'images automatisés pour enregistrer les images en fonction de leurs similitudes et caractéristiques.

**Détection de points de contrôle** : ensuite, les points de contrôle (AprilTags) sont identifiés et détectés dans les images alignées. La détection des points de contrôle est essentielle pour obtenir un modèle 3D avec des dimensions réelles.

**Génération de modèle de maillage:** après avoir aligné les images et identifié les points de contrôle, Reality Capture génère un modèle de maillage 3D. Reality capture utilise des algorithmes de maillage basés sur la reconstruction par le calcul de la carte de profondeur qui représente la distance entre la caméra et chaque pixel de l'image.

**Mapping de texture :** Le "Mapping de texture" est une technique qui consiste à appliquer une image 2D, appelée texture, sur la surface d'un modèle 3D pour en améliorer visuellement le détail et le réalisme. Cette texture est généralement une image numérique qui contient des informations de couleur et parfois de texture (comme la rugosité ou le relief) qui sont appliquées aux surfaces du modèle. Dans le processus de mapping de texture, chaque sommet du maillage 3D est associé à un point spécifique sur l'image de texture. Cette association permet à la texture de suivre précisément les contours et les formes du modèle 3D, même lorsque celui-ci est animé ou déformé. Ce processus améliore donc non seulement l'esthétique visuelle des modèles 3D mais contribue également à une meilleure immersion et interaction dans les environnements numériques.

**Vérification de l'échelle du modèle :** la dernière étape consiste à vérifier que le modèle 3D est dimensionné correctement selon les points de contrôle.

## 2.4 Traitement des Données – Processus dans Sketchfab

Une fois le modèle 3D finalisé, il peut être exporté directement vers les serveurs de Sketchfab. Au cours de cette procédure, divers paramètres tels que la qualité du maillage sont configurés. Plus précisément, pour les modèles en centrifugeuse, une qualité de maillage moyenne a été choisie, entraînant 300 000 triangles pour le modèle d'ancrage et 45 500 triangles pour le modèle des fondations.

Dans Sketchfab, différentes configurations peuvent être définies pour améliorer la présentation et l'interaction des utilisateurs avec les modèles, notamment : le lissage, l'arrière-plan, le champ de vision et l'ajout d'annotations. Pour les modèles, des annotations ont été intégrées, comprenant des photographies des modèles que les utilisateurs finaux peuvent consulter. La Figure 6 présente une vue des modèles téléchargés sur Sketchfab, et les liens correspondants pour l'accès sont également inclus.

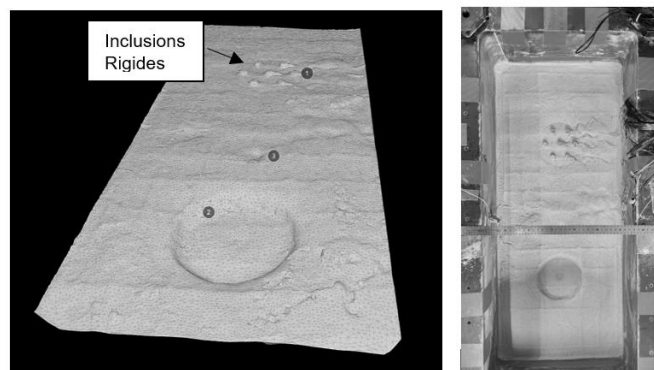


Figure 6. Modèle 3D de l'essai de fondations dans Sketchfab et photographie.

Lien d'accès: <https://skfb.ly/ouICL>

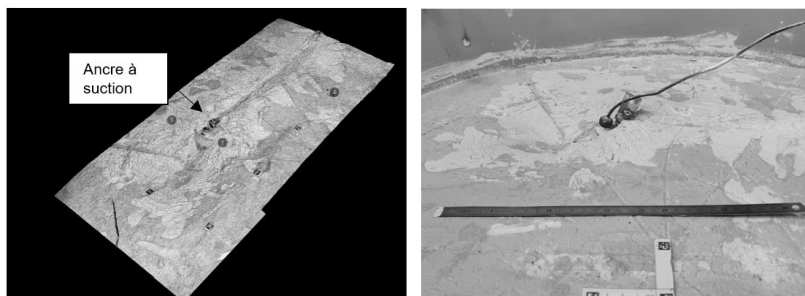


Figure 7. Modèle 3D de l'essai de l'ancre de suction dans Sketchfab et photographie.

Lien d'accès : <https://skfb.ly/oLAJN>



### 3. Résultats

La méthodologie a été validée en comparant les mesures manuelles avec les sections transversales extraites des modèles photogrammétriques. Le bord supérieur des contenants de modèle a été pris comme référence pour localiser la surface du modèle. Les figures 8 et 9 présentent des sections transversales de la surface du modèle et des points de données provenant des mesures manuelles prises depuis la position de référence. Dans l'ensemble, une bonne concordance est constatée entre la géométrie de surface récupérée par photogrammétrie et les points mesurés, mettant en évidence le potentiel de la technique de photogrammétrie pour estimer les déformations permanentes des modèles testés en centrifugeuse géotechnique.

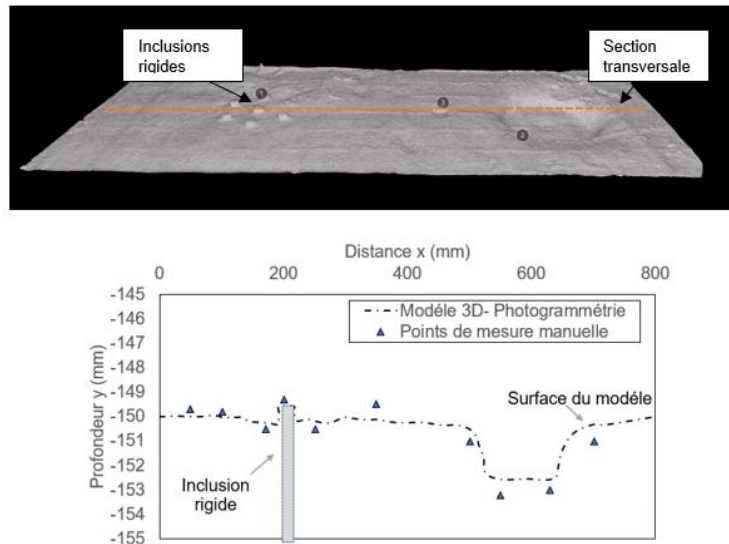


Figure 8. Section transversale et points de mesure du massif renforcé ou non après chargement d'une fondation superficielle.

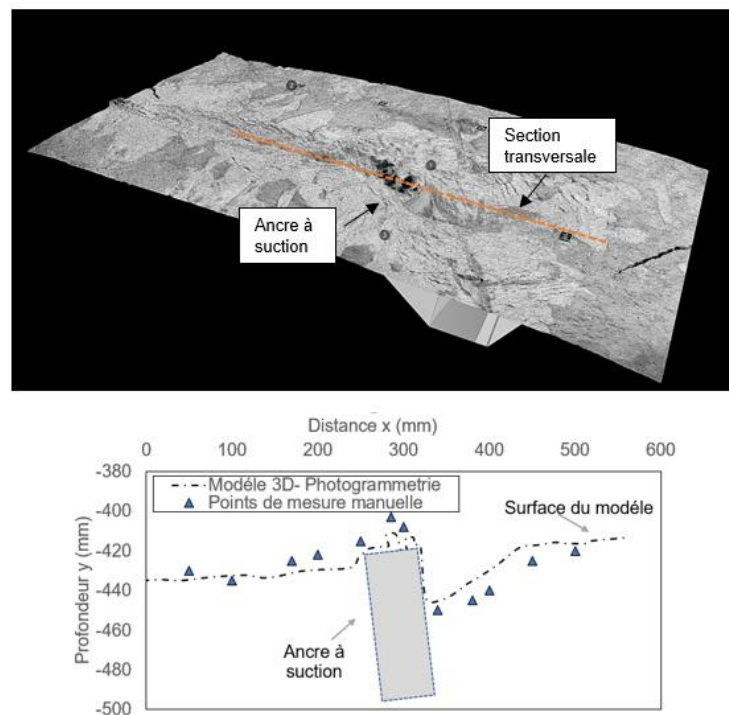


Figure 9. Section transversal et points de mesure à l'issue d'un essai de chargement d'un caisson à effet de suction.

#### 4. Conclusions

Cet article démontre la faisabilité de l'utilisation des caméras de smartphones pour générer des modèles 3D détaillés d'expériences en centrifugeuse en génie géotechnique. Le flux de travail proposé a été appliqué pour reconstruire deux modèles 3D, montrant un haut degré de corrélation avec les mesures manuelles. La photogrammétrie offre ainsi un potentiel considérable pour visualiser, mesurer, et conserver des répliques virtuelles d'expériences en centrifugeuse, avec une application étendue à diverses géométries. Les conclusions de cette étude sont les suivantes :

- La comparaison entre les mesures manuelles et les modèles 3D générés souligne la fiabilité de la photogrammétrie comme outil de capture des détails géométriques des modèles testés.

- L'utilisation de caméras de smartphones pour l'acquisition des données photogrammétriques offre une approche accessible et économique pour les chercheurs en géotechnique.

- La visualisation interactive des modèles 3D sur la plateforme Sketchfab permet la diffusion et exploration détaillée des résultats, favorisant la collaboration et la communication dans la communauté géotechnique.

#### 5. Remerciements

Ce projet a reçu un financement du programme de recherche et d'innovation Horizon 2020 de l'Union européenne au titre de l'accord de subvention Marie Skłodowska-Curie n° 101106921 - « Shared anchors for floating wind turbines ».

#### 6. Références bibliographiques

- An, P., Yong, R., Song, J., Du, S., Wang, C., Xu, H., Fang, K., Tong, S. (2024). Exploring the potential of smartphone photogrammetry for field measurement of joint roughness. *Measurement*, 225, 114055.
- Asiri+ (2024). Asiri+ Programme national de recherche. [Consulté le 11 janvier 2024] <https://asiriplus.fr/>
- Fang, K., Zhang, J., Tang, H., Hu, X., Yuan, H., Wang, X., An, P., Ding, B. (2023). A quick and low-cost smartphone photogrammetry method for obtaining 3D particle size and shape. *Engineering Geology*, 322, 107170.
- Frost, A., Mirashrafi, S., Sánchez, C.M., Vacas-Madrid, D., Millan, E.R., Wilson, L. (2023). Digital Documentation of Reflective Objects: A Cross-Polarised Photogrammetry Workflow for Complex Materials. In: Ioannides, M., Patias, P. (eds) *3D Research Challenges in Cultural Heritage III. Lecture Notes in Computer Science*, vol 13125. Springer, Cham.
- Olson, E. (2011). AprilTag: A robust and flexible visual fiducial system. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 3400-3407.
- OpenCV. (2017). ArUco marker detection tutorial. OpenCV Documentation. [Consulté le 11 janvier 2024] [https://docs.opencv.org/3.2.0/d5/dae/tutorial\\_aruco\\_detection.html](https://docs.opencv.org/3.2.0/d5/dae/tutorial_aruco_detection.html)
- ShareWind (2024). Shared anchors for floating wind turbines. [Consulté le 11 janvier 2024] [Consulté le 11 janvier 2024] <https://cordis.europa.eu/project/id/101106921>
- Sketchfab. (2023). Sketchfab: A platform for sharing 3D models. [Consulté le 11 janvier 2024] <https://sketchfab.com/>
- Wallace G.K. (1992). The JPEG still picture compression standard. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol. 38, no. 1.
- XnView Software. (2024). XnConvert - Batch Image Converter. [Consulté le 11 janvier 2024] <https://www.xnview.com/en/xnconvert/>