

Utilisation et fiabilisation de la motion capture pour mesurer les déplacements de structures en maçonnerie

Léonard, S.¹, Archez, J.¹, Taforel, P.², Garnier, D.¹

¹ Navier, ENPC, Institut Polytechnique de Paris, Univ Gustave Eiffel, CNRS

² MiMeTICS engineering

RESUME Dans le contexte du vieillissement des ouvrages d'art, le besoin d'outils de mesure efficaces devient de plus en plus important. Le développement des techniques d'imagerie offre des possibilités d'observation non intrusive et à haute résolution. Cette étude explore le potentiel de l'une d'elles, la *motion capture*, pour évaluer le comportement de structures en maçonnerie sous chargement. Deux expériences récentes ont permis de tester la faisabilité et l'exactitude de cette technique. La première concerne un mur de soutènement expérimental en pierre sèche mis à l'épreuve dans un environnement contrôlé. Lors de cette étude, les mesures de la *motion capture* ont été comparées avec celles d'un *laser tracker*, confirmant la validité du dispositif. La seconde est le chantier scientifique du pont d'Osserain, un pont en pierre construit en 1880 dont la destruction programmée a permis de tester cette méthode en conditions réelles. Les résultats mettent en évidence les avantages et les limites de la *motion capture* : elle permet un suivi 3D direct et précis des mouvements des blocs, mais son efficacité dépend d'une bonne calibration et de conditions d'éclairage contrôlées. Finalement, cette étude a démontré la pertinence de la *motion capture* en tant qu'outil pour l'évaluation des ouvrages maçonnés.

Mots-clefs Ouvrages en maçonnerie, Essais à échelle réelle, Mesure par imagerie, Motion capture

I. INTRODUCTION

Initialement développée pour le secteur du cinéma et du jeu vidéo, la *motion capture* est une technique permettant d'enregistrer les mouvements en trois dimensions de cibles réfléchissantes placées sur un objet. Jusqu'à présent, son utilisation en tant qu'outil de mesure dans le domaine du génie civil reste largement inexplorée. Au début des années 2010, Park et al. (2015) ont commencé à l'utiliser pour instrumenter des maquettes de bâtiments. Par la suite, le centre de recherche Casaccia de l'ENEA, situé près de Rome, a intégré un système de *motion capture* dans des essais de maquettes en maçonnerie sur table vibrante (Roselli et al., 2019). Leurs résultats montrent la pertinence de la *motion capture* pour l'auscultation des structures. Malgré l'efficacité de cette technique pour mesurer les mouvements de corps rigides, ce qui est en parfaite adéquation avec les cinématiques de la maçonnerie, aucune utilisation de cette technique sur des ouvrages existants n'a été retrouvée.

L'objectif de cette étude était donc d'explorer cette possibilité. Ce résumé présente un retour d'expérience sur plusieurs utilisations de la *motion capture* et interroge sa fiabilité dans le cadre de mesures de déplacements de structures en maçonnerie.

II. PRÉSENTATION DE LA TECHNIQUE

Un système de *motion capture* est constitué de plusieurs caméras infrarouges disposées autour de la structure observée, sur laquelle sont fixées des cibles réfléchissantes (Figure 1). Au cours de la mesure, un rayonnement infrarouge est émis par un réseau de LEDs, puis est réfléchi par les cibles et renvoyé vers les caméras. Les images 2D capturées pour identifier les cibles et déterminer leur position en 3D par triangulation sont analysées en temps réel, en s'appuyant sur une calibration préalable des positions des caméras.



FIGURE 1. Installation du système de *motion capture* sur le pont d'Osserain : caméras infrarouges (à gauche) et cibles vissées sur le pont (à droite)

L'un des avantages de cette approche est que les cibles sont peu coûteuses, ce qui permet de relever des mesures en de nombreux points, puis d'établir le champ de déplacement de la surface de la structure étudiée et de mieux comprendre son comportement. De plus, lorsque trois cibles sont posées sur un même corps rigide, il est possible de calculer les translations et rotations 3D de ce corps. Ceci est particulièrement pertinent pour les structures maçonnées, dont on peut supposer, dans de nombreuses modélisations, que les pierres se comportent comme des blocs rigides.

III. CAS D'APPLICATION

Deux ouvrages sous charge seront présentés dans ce travail.

A. Présentation de l'essai sur mur courbe en pierre sèche

En 2022, dans le cadre du programme de développement LAUBAPRO (Projet régional du Massif central, avril 2021 – décembre 2022), en collaboration avec le PNRGC, un mur de pierre courbe expérimental de 6 m de large et 1,8 m de haut (Figure 2) est construit et testé. Sa mise à l'épreuve se décompose en deux temps : d'abord une phase de remplissage durant laquelle un remblai en gravier est mis en place derrière le mur, puis une phase de chargement à l'aide d'un vérin qui

charge une dalle carrée (40 cm de côté) posée sur la surface du remblai jusqu'à la ruine du mur. Les champs de déplacements générés sur la surface avale du mur ont été mesurés par un système de *motion capture* constitué de 10 caméras infrarouges et de 130 cibles réfléchissantes (technologie OptiTrack). La mise en place et la calibration, puis l'utilisation de ce système se sont déroulées sans encombre grâce à l'installation préalable d'une protection solaire. En parallèle, une instrumentation au *laser tracker* a permis de comparer et valider les mesures obtenues.



FIGURE 2. Le mur courbe expérimental en pierre sèche du programme LAUBAPRO

B. Présentation du chantier scientifique du pont d'Osserain

Le chantier scientifique du pont d'Osserain (Figure 3), réalisé dans le cadre du PN DOLMEN en 2023, a également permis de mettre en œuvre cette technologie en parallèle de plusieurs autres méthodes de mesure, dont la corrélation d'images (DIC). Ce projet a consisté à charger par un empilement de blocs de béton un ancien pont routier en pierre maçonnée voué à la destruction. En raison de l'espace limité, les 10 caméras ont été disposées en ligne à une vingtaine de mètres du pont, limitant la qualité de détection des mouvements hors plan (Figure 1). Les conditions météorologiques et expérimentales ont aussi perturbé la calibration (qu'il a fallu faire la nuit) et les mesures au cours de la journée. Afin de pallier ces difficultés, un travail de reconstruction des données et de post-traitement a dû être mené pour pouvoir visualiser et interpréter les résultats.



FIGURE 3. Le pont d'Osserain pendant son chargement

IV. FIABILISATION PAR COMPARAISON

A. Résultats de l'essai sur mur courbe en pierre sèche

L'essai sur le mur a montré que les déplacements mesurés par *motion capture* étaient très similaires à ceux mesurés par le *laser tracker* (Figure 4), confirmant la validité et la précision de la méthode. Pendant la phase de remplissage, qui dure plusieurs heures, la constance des mesures démontre la stabilité du système, malgré le passage d'obstacles entre les caméras et le mur, et les changements de luminosité au cours de la journée.

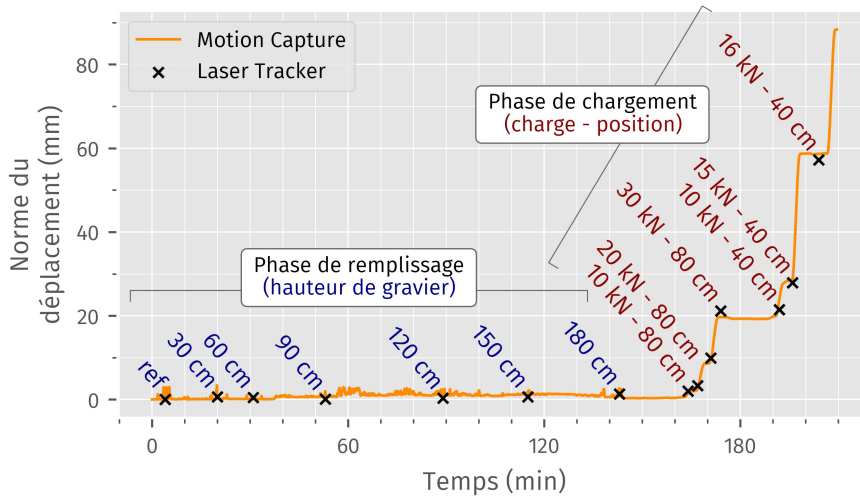


FIGURE 4. Norme du déplacement d'une pierre située en haut du mur au cours de l'essai d'après la *motion capture* (trait orange) et le *laser tracker* (croix noires)

La visualisation 3D fournie par le logiciel OptiTrack a permis une visualisation des déplacements des cibles en temps réel. À l'aide d'un post-traitement rapide des mesures, le comportement 3D de la surface avale de la structure peut être représenté (Figure 5), exhibant ici la formation d'un ventre au centre du mur.

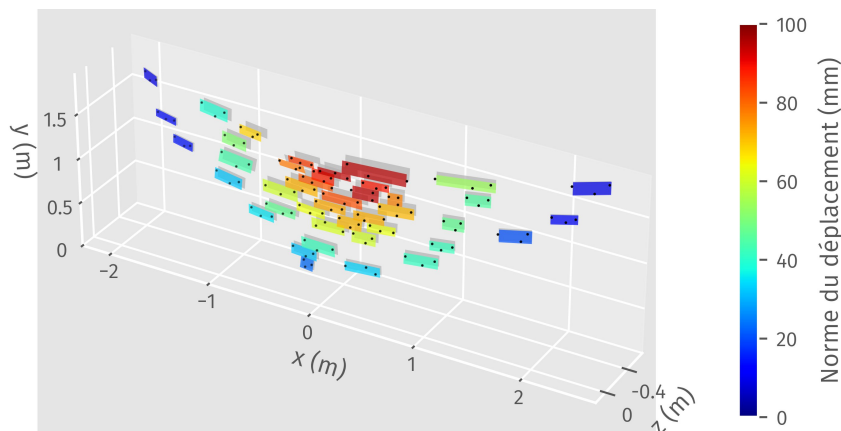


FIGURE 5. Positions des corps rigides (bloc équipé de 3 cibles) mesurées par le système de *motion capture* à la fin du chargement (les points noirs représentent les cibles, les rectangles gris les positions initiales des blocs, et les rectangles colorés les positions finales)

B. Résultats de l'essai sur le pont d'Osserain

En revanche, le chantier scientifique du pont d'Osserain a montré les limites de cette technique. La comparaison des déplacements mesurés avec ceux issus d'une analyse par corrélation d'images issue du logiciel CMV (M. Bornert, Lab. Navier) est présentée Figure 6. Pour les pierres situées dans la partie gauche de la voûte, les mesures sont cohérentes entre elles. En revanche, pour les pierres situées à droite de la voûte, elles divergent.

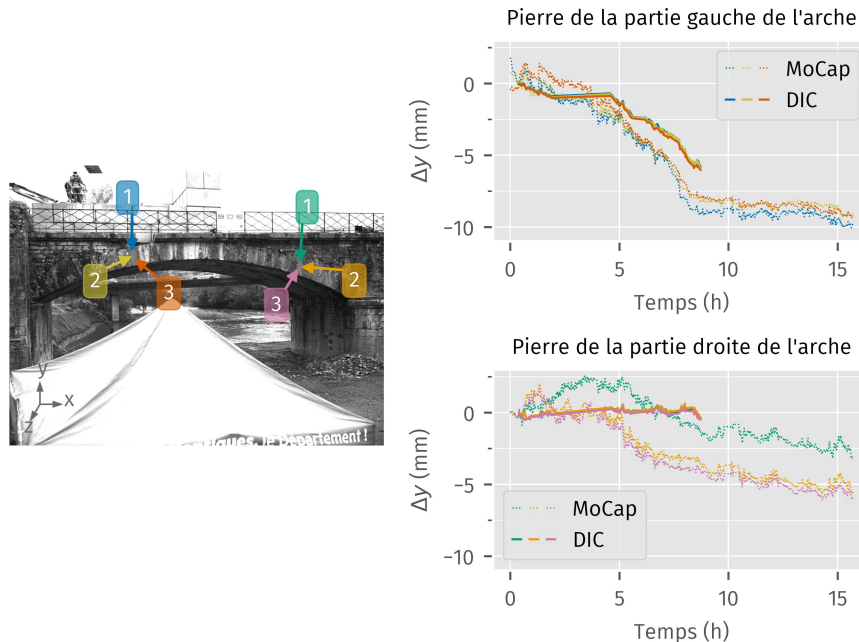


FIGURE 6. Déplacement vertical de deux pierres d'après le système de *motion capture* (MoCap, trait pointillé) et la corrélation d'image (DIC, trait gras)

Les différentes conditions expérimentales décrites précédemment (variations de luminosité, de conditions météorologiques et distance par rapport à la structure) expliquent cette imprécision de la *motion capture*. Au final, grâce à la mise en œuvre de différentes méthodes de mesure de manière complémentaire, une expérience précieuse a été acquise, ce qui facilitera son utilisation dans de futurs essais.

V. RETOUR D'EXPÉRIENCE ET CONCLUSION

Ces essais ont mis en lumière un certain nombre de points de vigilance pour l'utilisation de la *motion capture* :

- Reflets parasites : Les éléments tels que l'eau, le soleil, les gilets réfléchissants et les cibles peuvent perturber la calibration et la mesure. Une baguette de calibration active est maintenant utilisée pour atténuer ce phénomène pendant la calibration. Il est également possible de recalibrer en cours d'essai si les mesures deviennent erronées. De plus, il est nécessaire d'adapter le temps d'exposition des caméras aux

changements de luminosité. Généralement, mieux vaut fermer le diaphragme des caméras et augmenter leur temps d'exposition.

- Positionnement des caméras : Les caméras doivent être placées assez près des cibles (une dizaine de mètres), en arc de cercle et écartées autant que possible pour minimiser les erreurs de triangulation.
- Taille des cibles réfléchissantes : Elle doit être adaptée à la résolution des caméras.

Il est intéressant de noter que le contexte expérimental (dalle d'essai ou site réel) peut rendre plus difficile l'application des bonnes pratiques et donc avoir une influence sur la qualité des mesures.

Finalement, en respectant ces recommandations, la *motion capture* s'est révélée être une méthode efficace pour mesurer les champs de déplacement dans les structures et les ouvrages, fournissant des résultats complets, directs et fiables. Les perspectives d'utilisation de cette technologie dans le domaine du génie civil semblent prometteuses, notamment pour l'étude des structures maçonnées.

REMERCIEMENTS

Les personnes ayant contribué à ce travail sont reconnaissantes du financement du PN DOLMEN, du programme de développement LAUBAPRO, du financement du PNRGC et de l'ANR Menhir (ANR-23-CE22-0003), ainsi que du soutien de la FEREC.

REFERENCES

Park, H.S., Park, K., Kim, Y., Choi, S.W., 2015. Deformation Monitoring of a Building Structure Using a Motion Capture System. IEEE/ASME Trans. Mechatron. 20, 2276–2284. <https://doi.org/10.1109/TMECH.2014.2374219>

Roselli, I., De Canio, G., Rossi, M., Calderini, C., Lagomarsino, S., 2019. Relative displacements of 3D optical markers for deformations and crack monitoring of a masonry structure under shaking table tests. Int. J. CMEM 7, 350–362. <https://doi.org/10.2495/CMEM-V7-N4-350-362>