

Comportement Des Murs De Maçonnerie Face Au Risque Hydraulique : Conception d'une Expérimentation Sur Modèles Réduits

CHERIFI Hicham¹, COLAS Anne-Sophie¹, TERRADE Benjamin², GARNIER Denis³

¹ *Univ Gustave Eiffel, Univ Lyon, GERS-RRO, F-69675 Lyon, France, hicham.cherifi@univ-eiffel.fr*

² *Univ Gustave Eiffel, MAST-EMGCU, F-77454 Marne-la-Vallée, France*

³ *Laboratoire Navier (UMR 8205), ENPC, Univ Gustave Eiffel, CNRS, 77455 Marne-la-Vallée, France*

RESUME Les murs de soutènement en maçonnerie figurent parmi les ouvrages routiers les plus répandus en Europe. En France, ils représentent environ 60 % du parc national de murs de soutènement, selon le Cerema (2020). Ces structures, reconnues pour leur grande durabilité, jouent un rôle essentiel dans le maintien des infrastructures routières. Leur pérennité exige toutefois un entretien régulier, d'autant plus nécessaire dans un contexte d'évolution des conditions environnementales. L'un des enjeux majeurs concerne l'impact croissant du changement climatique, marqué par une augmentation de la fréquence et de l'intensité des épisodes de pluies extrêmes. Les chargements hydrauliques associés génèrent des gradients de pression importants, susceptibles de déstabiliser ces ouvrages. La présente étude vise à mieux comprendre les mécanismes de rupture induits par ces sollicitations hydrauliques. Des expérimentations en laboratoire à échelle réduite ont été menées sur des murs de soutènement en maçonnerie construits avec des briques (35,0 mm × 18,5 mm × 11,5 mm), retenant un remblai de sable saturé Hostun HN31. Ces modèles ont été soumis à des pluies intenses simulées afin de reproduire des conditions hydrauliques extrêmes. Une instrumentation avancée – caméras rapides, caméscopes et piézomètres – a permis de mesurer en temps réel les déformations, déplacements et modes de rupture. Les résultats expérimentaux ont été interprétés à l'aide du calcul à la rupture. Ils serviront, dans un second temps, de base pour valider les approches analytiques et de référence pour des modélisations numériques complémentaires, notamment par la méthode des éléments discrets et la méthode des éléments finis. Cette démarche intégrée a permis d'identifier les modes de rupture, d'établir des courbes charge-déplacement et de documenter finement la réponse des murs en maçonnerie. Elle ouvre la voie à des comparaisons entre observations expérimentales et prédictions théoriques, contribuant ainsi au développement de modèles prédictifs robustes pour l'évaluation de la stabilité des murs de soutènement en maçonnerie soumis à des conditions hydrauliques extrêmes.

Mots-clefs Murs de soutènement, maçonnerie, chargement hydraulique, calcul à la rupture.

I. INTRODUCTION

Les murs de soutènement en maçonnerie constituent une catégorie largement répandue de murs poids en Europe, notamment en France et au Royaume-Uni. Leur essor remonte au XIX^e et au début du XX^e siècle, en lien direct avec l'expansion des infrastructures durant la Révolution

industrielle. Ces ouvrages présentent une grande diversité de caractéristiques, dépendant de la nature des matériaux, de la géométrie des murs, des techniques de mise en œuvre et du type de joints employés. En France, ils représentent environ 60 % des ouvrages de soutènement des routes nationales (Cerema, 2020) et près de 90 % des 100 000 ouvrages le long des routes départementales, où leur entretien et leur conservation à long terme demeurent des opérations complexes et coûteuses.

Reconnus pour leur robustesse et leur capacité d'intégration paysagère, ces ouvrages constituent un patrimoine bâti de valeur. Ils sont toutefois de plus en plus vulnérables aux effets du changement climatique (Kandalai et al., 2023 ; Phoon, 2023). Conçus à une époque où les phénomènes météorologiques extrêmes étaient moins fréquents, nombre de ces murs n'ont pas été dimensionnés pour faire face à des épisodes de pluies intenses ou torrentielles, dont la fréquence et l'intensité sont en augmentation, en particulier dans les régions méditerranéennes. Ces évolutions soulignent la nécessité de considérer les sollicitations hydrauliques comme des actions accidentelles dans les pratiques de dimensionnement, et d'adapter les normes ainsi que les recommandations techniques afin de mieux intégrer le risque climatique (IPCC, 2022 ; PNACC, 2024).

L'enrichissement des connaissances scientifiques et techniques sur ces ouvrages est donc essentiel. Plusieurs travaux – Colas (2008), Le (2013), Terrade (2018) – ont mobilisé le calcul à la rupture pour analyser leur stabilité sous poids propre, poussées de terres ou pressions hydrostatiques. Bien que leurs approches diffèrent, ces études combinent méthodes analytiques, optimisation numérique et validation expérimentale, offrant un cadre d'évaluation multidimensionnel.

Au-delà du comportement statique, le comportement dynamique et sismique des maçonneries a également été étudié. Savalle (2019), par exemple, a analysé la réponse sismique de murs de soutènement en combinant modélisations en éléments discrets (DEM) et essais physiques, illustrant la complexité intrinsèque du matériau. La maçonnerie, assemblage de blocs et de joints, peut être représentée à différentes échelles : homogénéisée au niveau macroscopique, simplifiée en unités et joints au niveau mésoscopique, ou décrite finement au niveau microscopique. Selon Sarhosis et al. (2016), la stratégie la plus représentative consiste à distinguer explicitement blocs et joints, la DEM étant particulièrement adaptée. Cette méthode fournit des informations détaillées (contraintes, déformations, déplacements, pressions internes), mais exige de nombreux paramètres mécaniques souvent difficiles à identifier et des ressources de calcul importantes, en particulier pour les analyses hydro-mécaniques couplées.

Dans ce contexte, les travaux expérimentaux présentés ici s'inscrivent dans une recherche visant à développer un outil analytique fondé sur le calcul à la rupture pour évaluer la stabilité des murs de soutènement en maçonnerie soumis aux forces induites par des écoulements lors d'événements hydrauliques extrêmes. Cette approche analytique est étayée par une validation expérimentale, à travers une série d'essais sur modèles physiques réduits, afin de confronter les prédictions théoriques aux observations et de renforcer la fiabilité de l'outil proposé

II. FORMULATION DU PROBLEME

L'objectif de cette étude est de déterminer la hauteur hydraulique critique H_w (Fig.1) susceptible de provoquer la rupture du mur de soutènement, ainsi que d'identifier les mécanismes de rupture réalistes impliqués. La sollicitation hydraulique appliquée se distingue par son caractère brusque et instantané, ce qui en complique la reproduction à l'échelle réelle. L'identification des mécanismes de rupture associés constitue dès lors un premier défi.

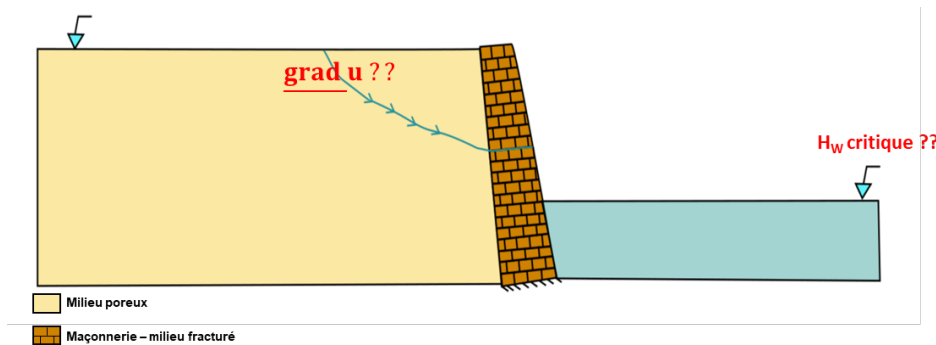


Figure 1. Illustration schématique du problème

Les connaissances actuelles reposent principalement sur les documents normatifs ainsi que sur les recherches menées depuis 2004 concernant les murs en maçonnerie à joints secs. Ces travaux mettent en évidence trois modes de rupture dominants :

- le glissement,
- le basculement,
- un mode mixte combinant les deux.

L'occurrence de chaque mode dépend de la géométrie du système ainsi que des propriétés mécaniques du sol, du mur et de leur interface.

Dans la présente étude, l'encastrement de la base du mur est supposé parfait, de manière à écarter l'influence de l'érosion ou d'un glissement basal.

Par ailleurs, plusieurs simulations en méthode des éléments discrets (DEM), réalisées en couplage hydromécanique complet et appliquées à différentes géométries (Fig. 2), ont confirmé la pertinence des trois mécanismes de rupture précédemment identifiés. Ces simulations ont été réalisées avec 3DEC, en adoptant une approche mixte consistant à modéliser le sol comme un matériau continu élastique parfaitement plastique, régi par un critère de rupture de type Mohr-Coulomb et un écoulement de type Darcy, tandis que le mur en maçonnerie est discrétisé en blocs indéformables séparés par des joints frottants. Sur le plan hydraulique, les blocs sont considérés comme imperméables et les joints obéissent à une loi de perméabilité linéaire dépendante de leur ouverture.

En conséquence, les développements analytiques qui suivent sont limités à ces modes de rupture, jugés représentatifs sur la base de l'ensemble des observations numériques et expérimentales.

Une analyse complémentaire a été menée pour évaluer l'effet de l'ouverture des joints, non seulement sur la géométrie du problème, mais surtout sur la distribution des contraintes au sein des joints. Cette étude s'appuie sur une méthode des éléments finis enrichie (FEM-X) intégrant des éléments de joint, mise en œuvre dans un code orienté mécanique des roches (Disroc). La

comparaison entre des modèles à joints fermés et des modèles autorisant l'ouverture des joints a révélé des différences limitées.

Toutefois, une contrainte majeure de ces analyses de sensibilité réside dans la rareté de paramètres mécaniques fiables caractérisant l'interface de la maçonnerie. À cette fin, les données mécaniques issues de Savalle (2019) ont été utilisées.

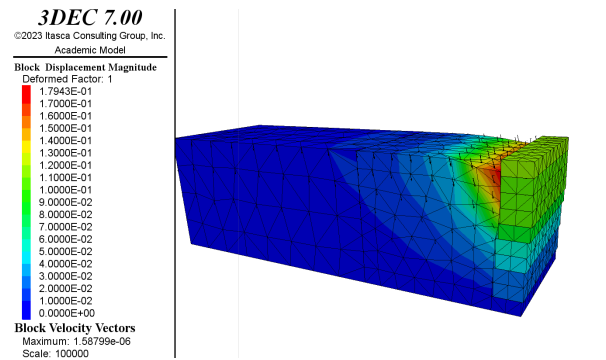


Figure 2. Exemple d'un mécanisme de glissement obtenu par couplage hydromécanique en DEM, montrant les amplitudes de déplacement des blocs et les vecteurs de vitesse au moment de la rupture

La formulation analytique développée repose sur le cadre du calcul à la rupture, et plus spécifiquement sur l'approche cinématique par l'extérieur (Salençon, 1990). Elle consiste à comparer la puissance des actions extérieures et la puissance dissipée le long des surfaces de rupture potentielles, en tenant compte du poids propre du sol et du mur ainsi que du gradient hydraulique se développant dans les zones affectées par les mécanismes de rupture.

L'évaluation de la composante hydraulique, étape particulièrement critique mais difficile à traiter analytiquement, a été réalisée au moyen d'une modélisation des écoulements par éléments finis avec le code CESAR-LCPC.

Afin de soutenir et de valider ces développements, une campagne expérimentale a été menée. Elle vise à déterminer la hauteur hydraulique critique (H_{wc}) conduisant à la rupture du mur de soutènement et à identifier les mécanismes de rupture réalistes associés.

III. APPROCHE EXPERIMENTALE

A. Montage expérimental

Le problème étudié consiste à créer un gradient hydraulique contrôlé exerçant une charge à la fois sur le sol et sur le mur de soutènement. Dans ce cadre, une campagne expérimentale a été menée sur 26 murs de soutènement, de hauteurs comprises entre 17 et 40 cm, soumis à un chargement hydraulique jusqu'à la rupture.

Les hypothèses suivantes ont été retenues :

- Sol saturé (sable Hostun HN31),
- Conditions de déformation plane,
- Écoulement de type Darcy,

- Régime permanent.

Les murs ont été construits à partir de briques en terre cuite de dimensions $35,0 \times 18,5 \times 11,5$ mm, d'un poids moyen de 9,38 g et d'une masse volumique de $16,15 \text{ kg/m}^3$, disposées à joints secs selon un appareillage alterné (Fig. 3). Le remblai est constitué de sable Hostun HN31. Ce matériau, dont les grains présentent une angulosité plus marquée que ceux du sable de Fontainebleau, est disponible en plusieurs fractions granulométriques (HN38, HN34, HN31, HN0,4/0,8, HN0,6/1,6). La fraction HN31, auparavant dénommée Hostun RF, constitue une référence en France pour les essais de laboratoire (Flavigny et al., 1990).

Un géosynthétique filtrant (taille d'ouverture apparente $O_{90} \approx 100 \mu\text{m}$) a été placé à l'interface mur–remblai afin d'empêcher la migration des particules de sable à travers les joints.

L'ensemble mur–remblai a été installé dans une enceinte en verre de dimensions $200 \times 60 \times 50$ cm. Ces dimensions ont été déterminées à partir de modèles 3D en éléments finis (FEM), élaborés pour limiter les effets de bord (Fig. 4).

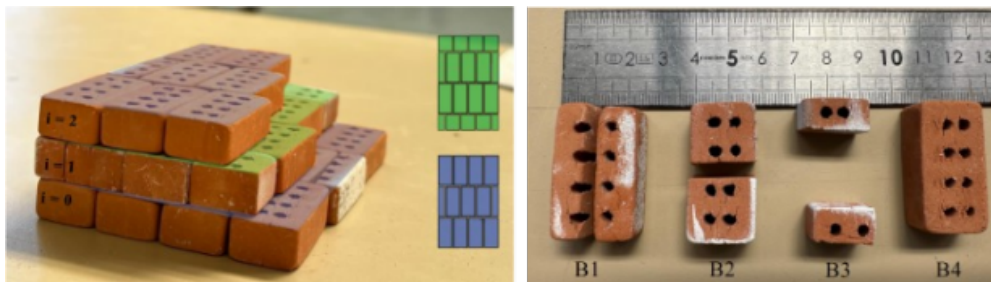


Figure 3. Assemblage du mur expérimental à échelle réduite, avec joints croisés dans les deux directions spatiales et joints de lit ouverts. Briques en terre cuite. B1 : briques d'angle – B2 : demi-briques – B3 : quart de briques – B4 : briques entières.

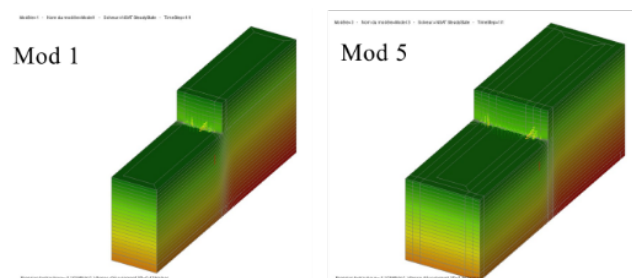


Figure 4. Exemple d'un modèle 3D en éléments finis (FEM) développé pour le choix des dimensions de l'enceinte.

De plus, le remblayage avec du sable HN31 gradué a été réalisé par couches successives, en veillant soigneusement à assurer une densité homogène dans l'ensemble du remblai.

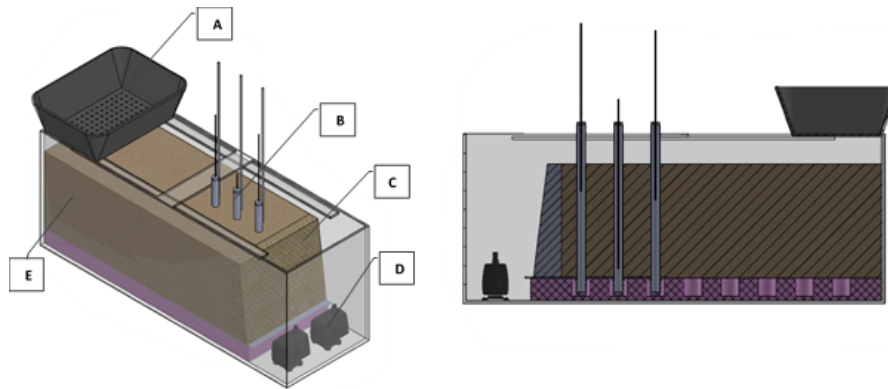


Figure 5. Modèle 3D de l'expérience (A : réservoir, B : piézomètre, C : mur en maçonnerie, D : pompe, E : sable Hostun HN31).

B. Instrumentation et suivi

Le dispositif expérimental (Fig. 7) a été équipé d'une combinaison de caméras ultra-rapides et de caméscopes standards pour suivre le comportement du mur et du remblai sous chargement hydraulique (Fig. 5).

Deux caméras ultra-rapides ont été placées latéralement afin de mesurer les déplacements des blocs et de capturer en temps réel les modes de rupture. Selon la géométrie du mur et le mécanisme de rupture anticipé, la fréquence d'acquisition variait de 60 à 125 images/s, tout en maintenant une résolution constante de 1024×2014 pixels pour l'ensemble des essais. Ces enregistrements ont été complétés par deux caméscopes (30 images/s) placés de manière similaire, utiles pour observer les mouvements lents et documenter qualitativement les déformations du mur et du sol.

Des cibles photogrammétriques ont été disposées en des points stratégiques du mur afin d'assurer un suivi précis des déplacements. Un marqueur flottant, placé dans la zone aval immergée, a permis de mesurer en continu l'évolution du niveau d'eau. La synchronisation entre les mouvements du mur et les variations de ce niveau a facilité l'analyse du processus de rupture et la caractérisation des mécanismes associés.

Un essai de référence (Test 22, hauteur : 35,20 cm ; largeur : 7,70 cm) a été instrumenté de manière renforcée. Deux caméras haute résolution (5 MP, $\approx 0,17$ mm/pixel) ont été ajoutées près des plans d'observation latéraux, et un dispositif stéréoscopique frontal composé de deux caméras 12 MP ($\approx 0,16$ mm/pixel) a été mis en place. Un total de 1030 images (sur 103 s) a été retenu pour l'analyse de la rupture. Une caméra zénithale a, en parallèle, suivi la surface libre de l'eau et son interaction avec la stabilité du mur.

Pour l'analyse par corrélation d'images numériques (DIC), la face extérieure des briques a été peinte en blanc puis mouchetée de résine hydrophobe noire à l'aérographe. Le motif de mouchetis présentait un diamètre moyen de 0,5 mm (≈ 5 pixels), avec une densité minimale d'un point tous les 4×4 mm.

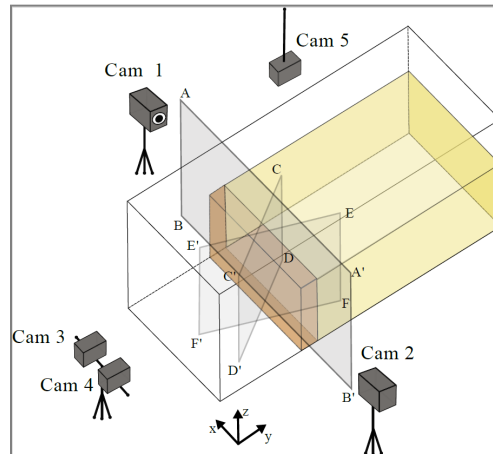


Figure 6: Schéma d'instrumentation des différents essais réalisés

IV. RESULTATS ET DISCUSSION

Pour plus de clarté et de cohérence, la présentation des résultats expérimentaux se concentre exclusivement sur l'essai de référence, choisi pour son instrumentation détaillée et sa représentativité au sein de la campagne d'essais. Comme décrit précédemment, cet essai a été suivi à l'aide d'une combinaison de techniques, notamment la corrélation d'images numériques (DIC) et des méthodes de suivi optique (désignées ici par analyse Tracker), permettant une caractérisation complète du comportement du mur sous chargement hydraulique. Une comparaison détaillée entre les observations expérimentales et les prédictions analytiques issues de la théorie du calcul à la rupture fera l'objet de publications ultérieures.

L'analyse Tracker a été réalisée sur les deux faces latérales du modèle, permettant de reconstituer les trajectoires de déplacement de plusieurs blocs clés. Compte tenu de la taille relativement importante et de la rigidité des briques, le déplacement de chaque bloc peut être raisonnablement assimilé à celui de son centroïde. Ainsi, les trajectoires des points A, B, C et D, représentatifs de différentes positions au sein du mur, ont pu être extraites avec succès. Ces informations offrent un éclairage précieux sur la cinématique du processus de rupture, incluant la rotation, la translation et les interactions entre blocs. En parallèle, le point W, correspondant à un marqueur flottant positionné dans le bassin aval, a fourni une mesure précise et continue de la montée du niveau d'eau au cours du temps. En synchronisant les données de déplacement avec l'évolution de la hauteur d'eau (H_w), il a été possible de suivre les déplacements horizontaux (U_x) et verticaux (U_y) du mur en fonction du chargement hydraulique (Fig. 7).

Les courbes de déplacement obtenues présentent une évolution non linéaire, révélatrice d'une transition entre une déformation élastique et un écoulement plastique au sein de la maçonnerie. Cette transition se caractérise par une modification marquée de la pente des courbes de déplacement et, dans certains cas, par une accélération rapide du mouvement du mur. L'effet le plus significatif a été observé au point D, où le déplacement horizontal estimé a atteint environ 9,2 cm.

La position du marqueur flottant (W), utilisé comme référence pour le suivi du niveau d'eau, était initialement située à environ 6,8 cm de la tête du mur. La rupture structurelle du mur a été

observée lorsque le niveau d'eau a atteint environ 13,9 cm, soit un incrément hydraulique critique (H_{wc}) de 7,1 cm. Rapporté à la hauteur totale du mur (35,2 cm), cet incrément correspond à environ 20 % de la hauteur, définissant ainsi la condition hydraulique au-delà de laquelle le mur n'est plus en mesure d'assurer sa stabilité.

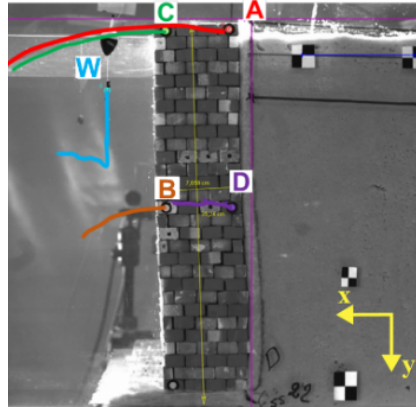


Figure 7: Illustration des trajectoires des blocs A, B, C et D, ainsi que du niveau d'eau au point W (essai de référence)

Par ailleurs, les analyses DIC 2D et stéréo ont permis de vérifier indépendamment les résultats issus de l'analyse Tracker. La comparaison réalisée pour l'essai de référence a confirmé la cohérence globale entre les deux méthodes de mesure, tout en mettant en évidence la présence d'effets 3D, comme anticipé par les modélisations par éléments finis.

La Figure 8 présente l'évolution temporelle des déplacements obtenus par le dispositif de DIC stéréo (CAM3 et CAM4). Les résultats indiquent que les déplacements étaient partiellement contraints au niveau des bords latéraux, phénomène attribué aux frottements entre les parois vitrées et la maçonnerie. Cet effet a été atténué conformément aux recommandations issues des essais sur modèles réduits de barrages (Dodaro et al., 2024), notamment par l'application d'un spray de paraffine comme lubrifiant. D'un point de vue quantitatif, l'écart maximal de déplacement entre deux points situés sur un même profil a été estimé à 12 %, une valeur jugée non critique et confortant l'hypothèse de déformation en contraintes planes du système.

Figure 8: Variation de la position horizontale en fonction du niveau d'eau (en cm) pour 4 briques du mur (essai de référence)

En parallèle, l'exploitation combinée des données issues de la DIC stéréo et 2D confirme la nature du mécanisme de rupture observé lors de cet essai de référence, à savoir le basculement du mur. Cette interprétation est corroborée par le champ de déplacement horizontal (U_x) mesuré après la rupture (Fig. 9), qui met en évidence des déplacements latéraux maximaux atteignant environ $-5,2$ mm dans la partie supérieure du mur. À l'inverse, la zone inférieure demeure proche de 0 mm, traduisant une rotation de la structure autour de sa base. Le gradient progressif de déplacement observé sur la hauteur du mur est ainsi cohérent avec un mode de rupture par renversement.

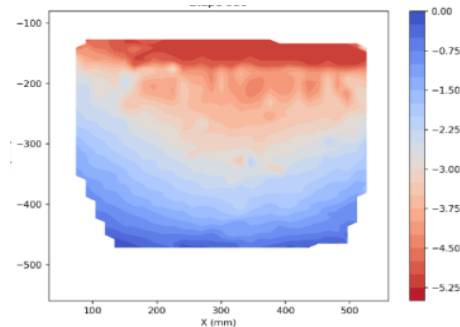


Figure 9: Champ de déplacement horizontal post-rupture U_x (en mm) obtenu par analyse DIC stéréo (essai de référence)

Au cours des autres essais, deux mécanismes de rupture distincts ont été identifiés : le glissement, affectant principalement les murs présentant un faible rapport de finesse (inférieur à 2), et le renversement. De manière générale, les résultats expérimentaux confirment la vulnérabilité particulière des murs de soutènement en maçonnerie sèche lorsqu'ils sont soumis à des écoulements hydrauliques critiques.

V. CONCLUSION

L'étude expérimentale approfondie menée sur des modèles physiques de murs en maçonnerie soumis à un chargement hydraulique a apporté de nouveaux éclairages sur leur comportement hydromécanique et leurs mécanismes de rupture dominants. Les méthodes optiques à haute résolution, incluant la corrélation d'images numériques (DIC) et l'analyse par suivi optique (Tracker), se sont révélées efficaces pour suivre avec précision les déplacements du mur et détecter l'amorce de la rupture. La synchronisation de la cinématique du mur avec les variations du niveau d'eau a permis d'identifier des seuils hydrauliques critiques marquant la transition vers la rupture.

L'analyse quantitative des trajectoires de déplacement pour l'essai de référence a montré qu'à proximité du seuil de rupture, le point D présentait un déplacement horizontal estimé à environ $9,2$ cm, tandis que les points A et C atteignaient environ $9,5$ cm, et le point B environ $8,0$ cm. Ces mesures sont cohérentes avec les champs de déplacement obtenus par DIC 2D et stéréo, qui ont offert une résolution spatiale supplémentaire et confirmé la présence d'effets de bord.

Le champ de déplacement horizontal U_x obtenu après rupture a mis en évidence une amplitude maximale d'environ $-5,2$ mm dans la partie inférieure du mur, décroissant progressivement vers

le sommet — caractéristique d'un mécanisme global de renversement. L'analyse stéréo DIC a également validé l'hypothèse de déformation en contrainte plane, les effets de bord représentant moins de 12 % des valeurs de déplacement mesurées au centre. Les résultats de cet essai confirment que le renversement constitue le mode de rupture dominant dans les conditions hydrauliques testées. D'autres essais ont toutefois mis en évidence un mode de rupture par glissement.

L'étude met en évidence l'importance d'une instrumentation multimodale et d'un suivi haute résolution pour appréhender pleinement la complexité des interactions hydromécaniques dans les structures en maçonnerie sèche. Une comparaison analytique détaillée, fondée sur la théorie du calcul à la rupture (approche cinématique par l'extérieur), est actuellement en cours. Cette méthode, qui ne requiert qu'un nombre limité de paramètres — principalement ceux décrivant le critère de rupture adopté ainsi que les actions appliquées (poids propre et gradient hydraulique) permet d'estimer de manière conservatrice la hauteur critique d'eau susceptible de conduire à la rupture du mur. Les résultats correspondants feront l'objet de futures publications dédiées.

REFERENCES

Cerema. (2020). *Analyse des risques appliquée aux murs en maçonnerie*. Collection Références. Bron: Cerema. ISBN 978-2-37180-454-8.

Colas, A.S., Morel, J.C., & Garnier, D. (2008). Yield design of dry-stone masonry retaining structures — Comparisons with analytical, numerical, and experimental data. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 32(14), 1817-1832. [https://doi.org/\[à compléter\]](https://doi.org/[à compléter])

De Buhan, P., & de Felice, G. (1996). A homogenization approach to the ultimate strength of brick masonry. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 45(7), 1085-1104. [https://doi.org/\[à compléter\]](https://doi.org/[à compléter])

Dodaro, E., Marcolongo, M., Gottardi, G., Gragnano, C.G., Bassi, A., Stanier, S.A., & Viggiani, G.M.B. (2024). Centrifuge modelling of a river embankment slope failure induced by a high-water event. *Proceedings of the 5th European Conference on Physical Modelling in Geotechnics (ECPMG 2024)*, Delft, the Netherlands.

Garnier, D., & Baraké, M. (2005). *Analyse par la théorie du calcul à la rupture d'ouvrages de géotechnique soumis à des forces d'écoulement*. Actes du 17ème Congrès Français de Mécanique.

IPCC. (2022). *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.

Kandalai, S., John, N.J., & Patel, A. (2023). Effects of climate change on geotechnical infrastructures — state of the art. *Environmental Science and Pollution Research*, 30, 16878-16904. [https://doi.org/\[à compléter\]](https://doi.org/[à compléter])

Le, H.H. (2013). Stabilité des murs de soutènement routiers en pierre sèche : Modélisation 3D par le calcul à la rupture et expérimentation échelle 1. PhD Thesis.

Ministère de la Transition Écologique et de la Cohésion des Territoires. (2024). Plan national d'adaptation au changement climatique 3.

Phoon, K.K. (2023). What geotechnical engineers want to know about reliability. American Society of Civil Engineers. <https://doi.org/10.1061/978078448>

Salençon, J. (1990). Introduction to the yield design theory and its applications to soil mechanics. *European Journal of Mechanics A/Solids*, 9(5), 477-500.

Sarhosis, V., Bagi, K., Lemos, J.V., & Milani, G. (2016). Computational modeling of masonry structures using the discrete element method.

Savalle, N. (2019). Étude du comportement sismique des murs de soutènement de talus en pierre sèche. PhD Thesis.

Terrade, B., Colas, A.S., & Garnier, D. (2018). Upper bound limit analysis of masonry retaining walls using PIV velocity fields. *Meccanica*, 53(7), 1661-1672.