



JOURNEES NATIONALES
MACONNERIE

5ème édition – Bordeaux

12 et 13 Juin 2025



DIGITALISATION DE PIERRES POUR SIMULER LE COMPORTEMENT MECANIQUE DE MURS EN PIERRE SECHE

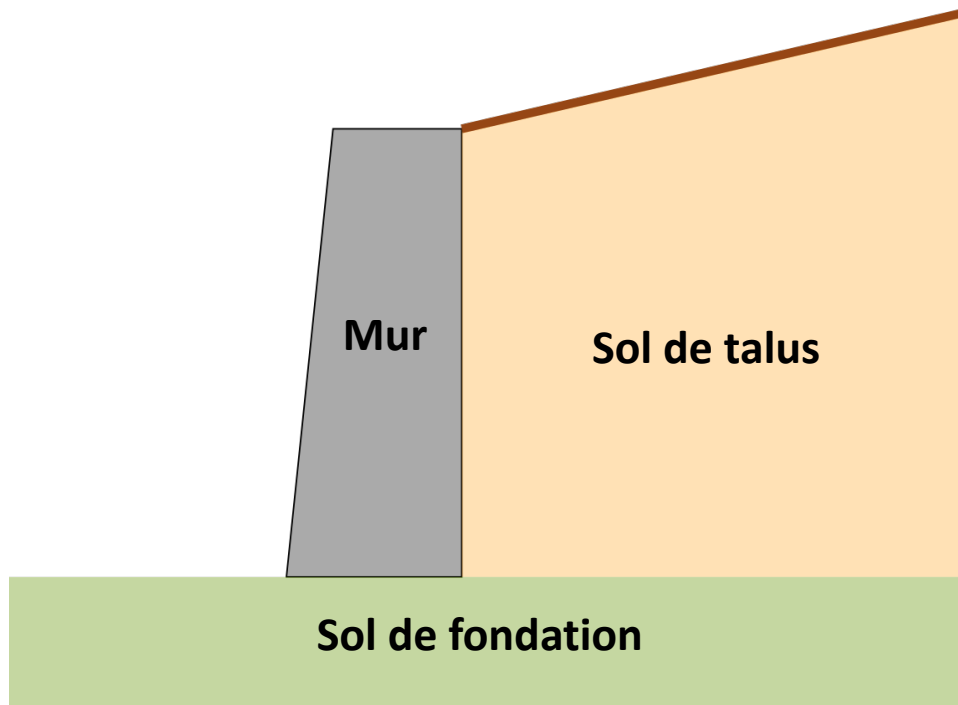
SAVALLE N., TALON A., YADDADEN A., NOUIOUA A., CAGIN L.



Contexte



- Murs de soutènement en pierre sèche ?
 - Pierres brutes sans liant
 - Assemblage savant



© Lavier et
muraillers de
Bourgogne



- Un patrimoine vieillissant nécessitant de la maintenance

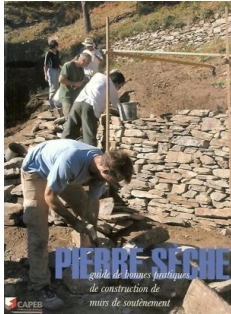


© F-X. Emery, dans *Pierre Sèche* (2008)

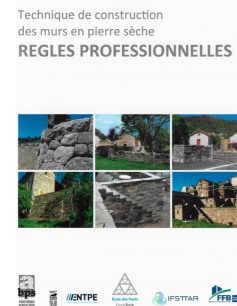
©C. Cornu



- Rédaction de guides (+ abaques de dimensionnement)



Guide des bonnes pratiques (2008)



Règles professionnelles (2017)

- Basés sur études scientifiques
 - Numériques, analytiques et **expérimentales**

Contexte



- Rédaction de guides (+ abaques de dimensionnement)
- Basés sur études scientifiques
 - Numériques, analytiques et **expérimentales**

9 murs testés



[1]



- Des assemblages très variés en réalité
 - Type, forme des pierres + fonction + volonté artistique de l'artisan



a) Assemblage assisé



b) Opus incertum



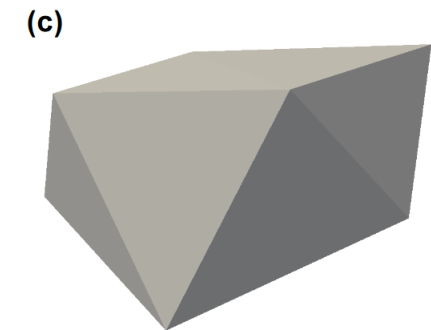
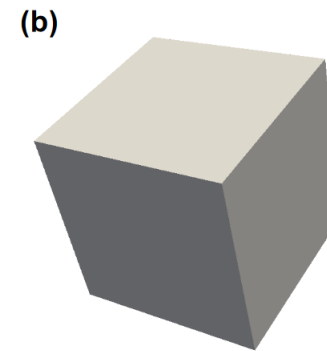
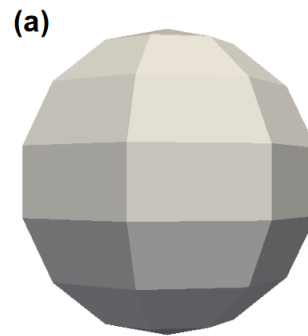
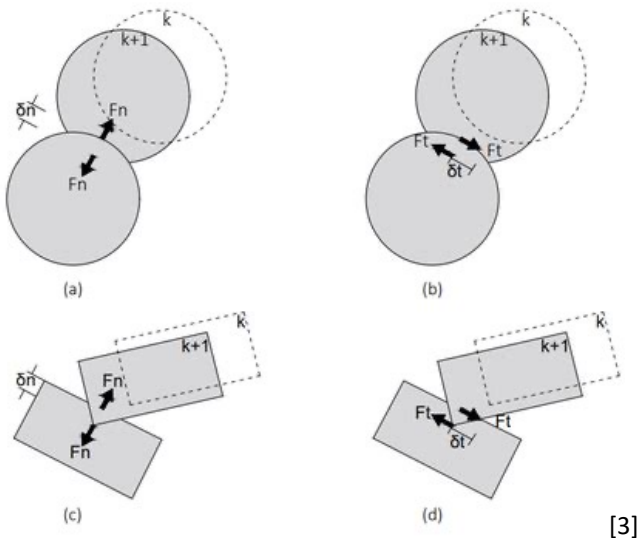
c) Assemblage clavé

Quel est l'éventuel effet de l'assemblage sur le comportement de ces structures ?



- Etudier l'effet de l'assemblage sur le comportement mécanique.
 - Faire des expériences ?

- Etudier l'effet de l'assemblage sur le comportement mécanique.
 - ~~Faire des expériences ?~~ Trop de typologies différentes
 - Faire des calculs numériques ?
 - Modélisation par éléments discrets (pour gérer les contacts localisés)
 - Besoin de la géométrie des pierres et du mur



[4]



- Etudier l'effet de l'assemblage sur le comportement mécanique.
 - ~~Faire des expériences ?~~ Trop de typologies différentes
 - Faire des calculs numériques ?
 - Modélisation par éléments discrets (pour gérer les contacts localisés)
 - Besoin de la géométrie des pierres et du mur
-
- 1- Acquérir la géométrie des pierres
 - 2- Construire un mur réaliste
 - 3- Voir sa résistance mécanique

- Etudier l'effet de l'assemblage sur le comportement mécanique.

- ~~Faire des expériences ?~~ Trop de typologies différentes
- Faire des calculs numériques ?
 - Modélisation par éléments discrets (pour gérer les contacts localisés)
 - Besoin de la géométrie des pierres et du mur

1- Acquérir la géométrie des pierres

2- Construire un mur réaliste

3- Voir sa résistance mécanique

Quel raffinement ?

Représentation réaliste des pierres réelles

- **Forme**
- **Comportement mécanique**



Développement



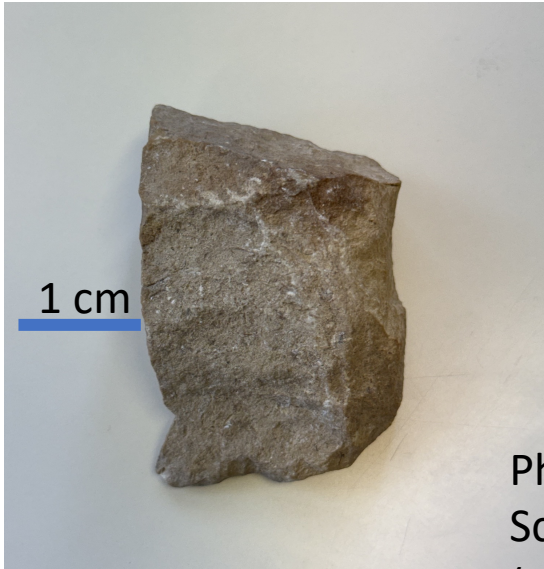
- Commence à échelle réduite
 - 12 pierres

Développement



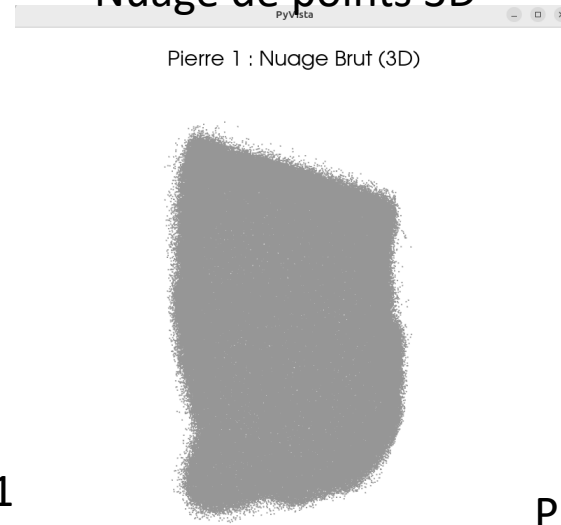
- Commence à échelle réduite
 - 12 pierres

Pierre réelle



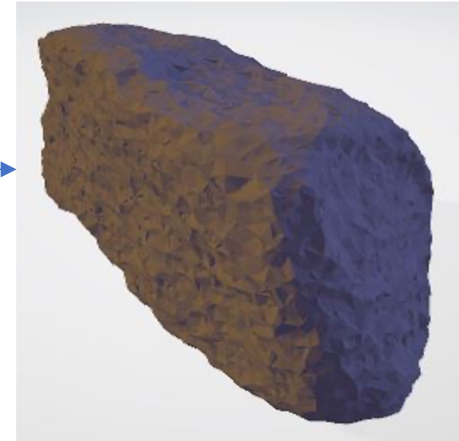
Phase 1
Scan 3D
(Trimble X7)

Nuage de points 3D



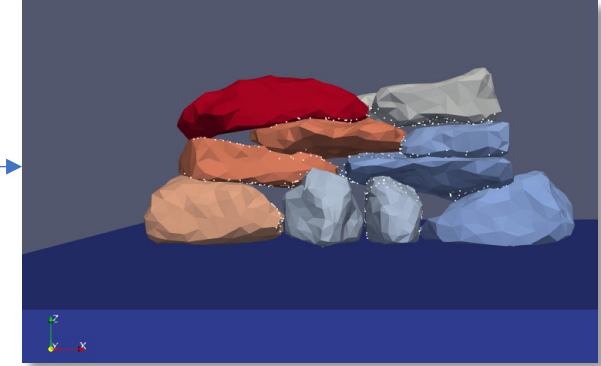
Phase 2
Filtrage
Extraction

Objet 3D



Phase 3
Assemblage
Simulation

Simulation numérique DEM

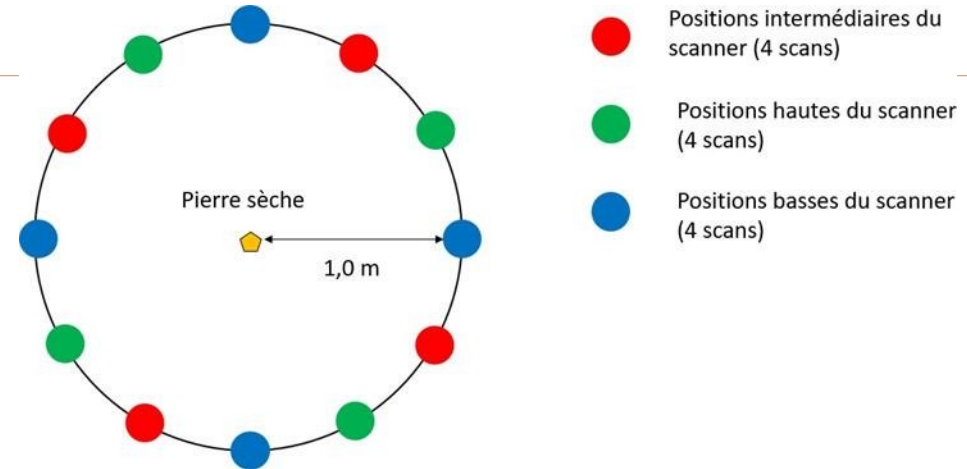


Développement



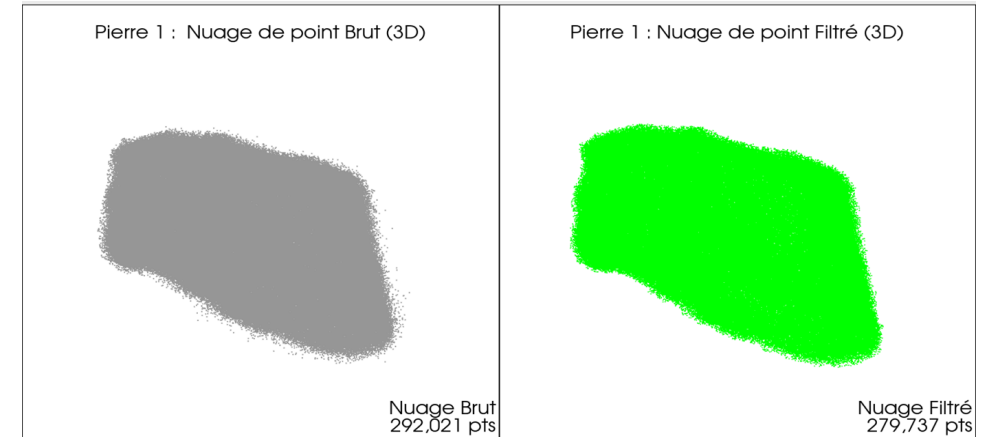
- **Phase 1 : Scan 3D (Trimble X7)**

- Scanner fixe
- 12 positions
- Nuages de points très dense
- ➔ A optimiser potentiellement

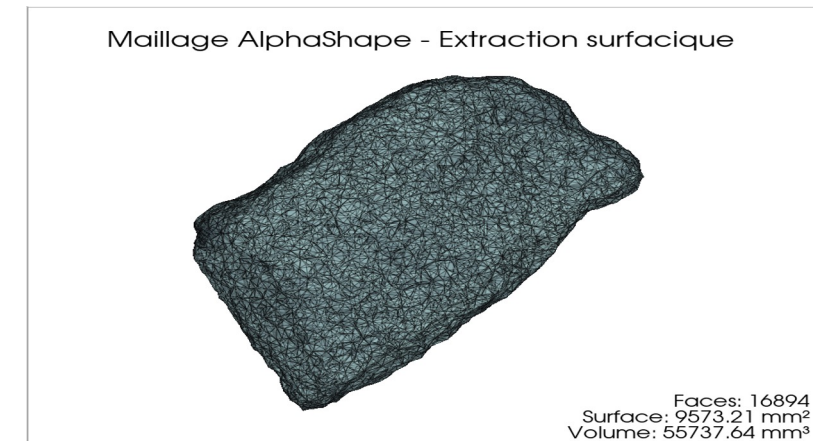


- **Phase 2 : nettoyage et reconstruction**

- Filtrage (points trop éloignés)
- Reconstruction et régularisation

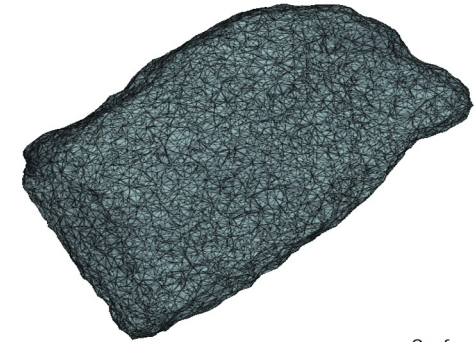


- Bibliothèque python / environnement Meshlab



- **Phase 2 : nettoyage et reconstruction**
 - Filtrage (points trop éloignés)
 - Reconstruction et régularisation
 - Simplification
- Bibliothèque python / environnement Meshlab

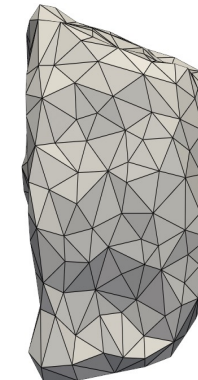
Maillage AlphaShape - Extraction surfacique



Faces: 16894
Surface: 9573.21 mm²
Volume: 55737.64 mm³



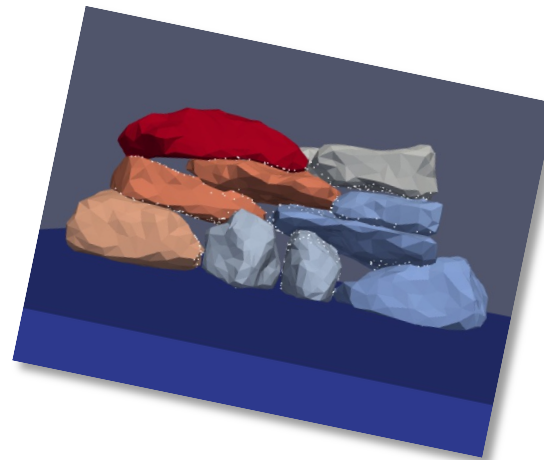
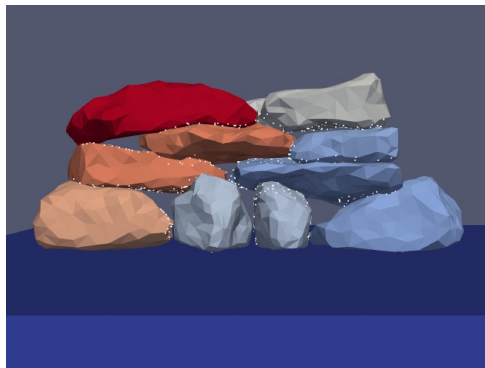
Maillage Réduit - Visualisation 3D



Maillage Réduit
Faces: 500

- **Phase 3 : Simulation numérique**

- Placement des pierres (Meshlab) : quel est son importance ?
- Choix du raffinement
- Algorithme : LMGC90
 - Non convexe
 - Contact sec
- Inclinaison jusqu'à la rupture



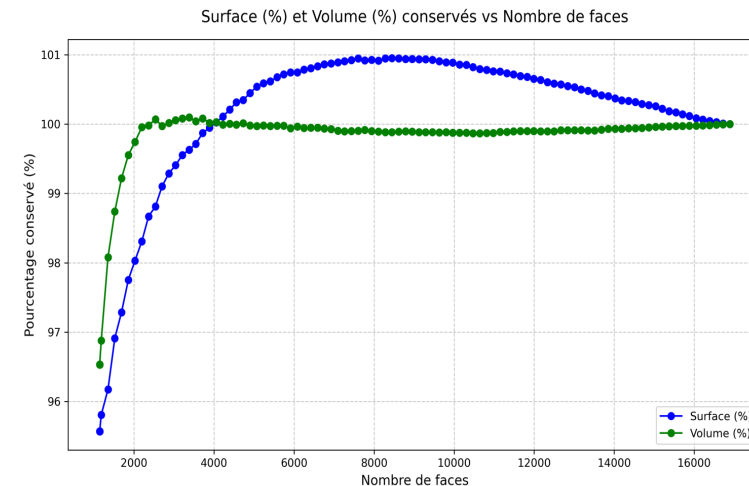
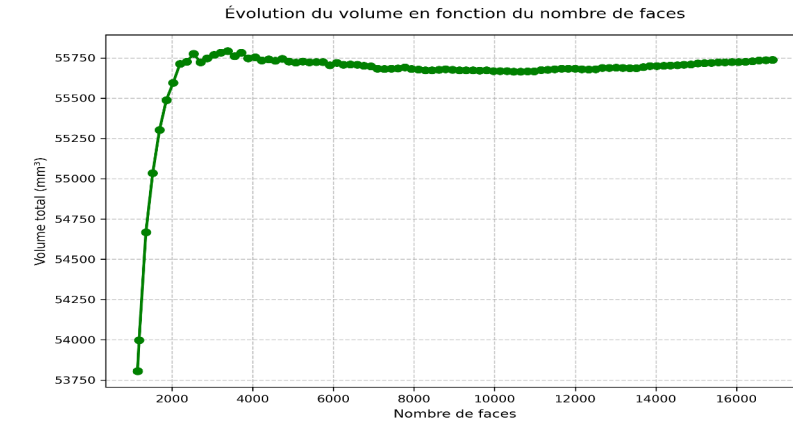
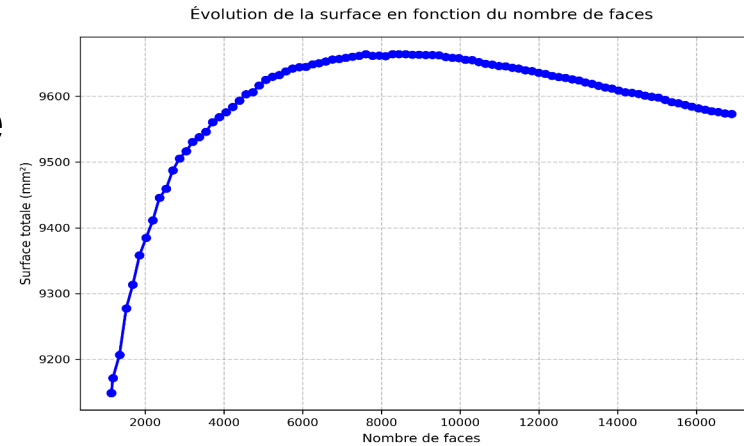
Résultat : angle d'inclinaison de rupture

Mesure de la résistance de l'assemblage

Développement



- Objectif
 - Reproduction de la forme
 - Surface
 - Volume





- **Objectif**
 - Reproduction de la forme
 - Surface
 - Volume
 - Reproduction du comportement mécanique
 - Convergence des simulations en fonction de la taille du maillage employée
 - Effets de léger décalage dans la position initiale des pierres

Conclusion et perspectives



- **Conclusion**

- Phase 1 (nuage de point) : à optimiser
- Phase 2 : check
- Phase 3 : Effet maillage + position pierre sur comportement méca

- **Perspectives**

- Valider à échelle réduite via expériences (+ ajout d'un remblai)
- Placement des pierres automatique + influence ?
- Reproduire la démarche à échelle réelle
- Utiliser pour simuler différents assemblages



- [1] Villemus, B. (2004). Étude des murs de soutènement en maçonnerie de pierres sèches. L'institut national des sciences appliquees de Lyon.
- [2] Colas, A. S. (2009). Mécanique des murs de soutènement en pierre sèche: modélisation par le calcul à la rupture et expérimentation échelle 1 (Doctoral dissertation, Ecully, Ecole centrale de Lyon).
- [3] Álvarez, J., Gallegos Espinoza, S., Cordero, R., Ramírez Orozco, A. I., Zárate Araiza, J. F., & Díaz, S. A. (2023). Application of the Discrete Elements Method for the simulation of a beam-column connection based on a self-centering system.
- [4] Quezada, J. C., & Chazallon, C. (2022). Discrete element modelling of hot mix asphalt complex modulus using realistic aggregate shapes. *Road Materials and Pavement Design*, 23(sup1), 178-195.



Merci de votre attention

Contact :

Nathanaël SAVALLE : nathanael.savalle@uca.fr

Aurélie TALON : aurelie.talon@uca.fr

Louis CAGIN : unepierresurlautre@laposte.net