



LTDS



MODELISATION DES MURS DE SOUTÈNEMENT EN PIERRES SECHES

Rapport du stage de Master Génie Civil

Tuteurs

Cécile Nougier

Jean-Patrick Plassiard

Stagiaire

James Jatmiko Oetomo

Ecole Centrale de Lyon

Laboratoire de Tribologie et Dynamique des Systèmes

Septembre 2009

Lembar Pernyataan Keaslian

Saya yang bertandatangan dibawah ini menyatakan dengan sesungguhnya bawah tesis yang berjudul

Modelisation des Murs de Soutenement En Pierres Seches

Yang disusun untuk melengkapi sebagian persyaratan untuk menjadi magister teknik pada Departemen Sipil Fakultas Teknik Universitas Indonesia, sejauh yang saya ketahui bukan merupakan tiruan atau duplikasi dari tesis yang telah dipublikasi dan atau pernah dipakai untuk mendapatkan gelar kesarjanaan/magister di lingkungan Universitas Indonesia maupun perguruan tinggi atau instansi manapun, kecuali pada bagian yang sumber informasinya ditentukan sebagaimana mestinya.

Depok, Januari 2010

James Jatmiko Oetomo
0706305135

DECLARATION OF LEGITIMATION

Declare that thesis with the title:

Modelisation des Murs de Soutenement En Pierres Seches

Were created to fulfill some prerequisites in Double Degree Master Program between University of Indonesia and Ecole Centrale the Lyon in purpose to obtain the Magister Degree in Civil Engineering

Thesis Promotor

Cecile Nougquier-Lehon

MODELISASI DINDING PENAHAN TANAH DENGAN BATU PECAH

ABSTRAK

Modelisasi numerik dinding batu pecah pada umumnya dilakukan dengan menggunakan program berbasis elemen hingga. Pada penelitian ini, dinding batu pecah dimodelisasi dengan elemen diskrit sedemikian sehingga tegangan pada struktur dapat diskontinu dan elemen struktur memiliki bidang geser diantara elemennya. Penelitian ini bertujuan untuk mengkonfirmasi model numerik elemen diskrit untuk modelisasi dinding penahan tanah dengan batu pecah.

Modelisasi numerik dilakukan berbasis pada hasil eksperimen dinding penahan tanah berukuran kecil yang dibebani dengan batang duralium yang dikenal dengan *Schneebeli's rods*. Setiap blok penyusun dinding dimodelisasi terlebih dahulu kemudian dilakukan uji geser langsung secara numerik yang hasilnya dibandingkan dengan hasil percobaan. Blok penyusun dinding dibuat rigid, tujuan utamanya untuk mempercepat proses kalkulasi, selain itu juga menyesuaikan dengan hasil percobaan dimana elemen blok tetap utuh sebelum dan sesudah uji pembebanan.

Model numerik dinding penahan tanah dibuat dengan PFC 2D, dimana setiap blok penyusun dinding memiliki dimensi yang sama namun dengan rugositas yang berbeda. Dinding dibuat dengan menumpuk blok secara berselang-seling baris demi baris hingga tercapai tinggi dinding yang diinginkan.

Pembebanan dilakukan pada salah satu muka dinding penahan tanah. Hasil simulasi menunjukkan bahwa modelisasi menggunakan metode elemen diskrit pada dinding penahan tanah dengan batu pecah mampu memberikan hasil yang relevan dengan hasil percobaan.

Numerical Model of Dry Stone Retaining Wall

ABSTRACT

In past research, the modelisation of dry stone retaining used a software based on the finite element method. In this research, the dry stone retaining wall were modelized with the discret element method, thus the stress could be discontinu and the structural element has a slip plane. This research had taken in order to confirm the numerical model using the discret element method to model the dry stone retaining wall.

Numerical model were built based on the experimental test of small-scale retaining wall which were loaded with the duralium rod named Schneebeli's rods. Every block were modelized beforehand, then it is tested with a numerical direct shear test where the results is compared with the experimental test. The block were modelized as rigid block, so the calculation time can be reduced, furthermore it adapts the real model where the block before and after the loading test were still intact.

Numerical model are modelized with PFC 2D, where every blocks of the wall has the same dimension but different rugosity. The wall were created by stacking the block consecutively until it reached the desired height of wall.

Load were exerted at one of the dry stone wall faces. The simulation results shows that the modelisation using the discret element method for dry stone retaining wall gave a reasonably good results compared to the experimental test.

Sommaire

Introduction générale.....	3
Contexte	3
Problème.....	3
Objectifs et moyens choisir pour les atteindre	3
Chapitre 1 Etude Bibliographique.....	4
1.1 Origine.....	4
1.2 Caractéristiques des murs en pierre sèches	5
1.3 Etudes précédentes	7
1.3.1 Expérience vraie grandeur.....	7
1.3.2 Expérience maquette	9
1.3.3 Modèles analytiques.....	9
1.3.4 Modèles numériques	11
1.3.5 Synthèse	11
Chapitre 2 Approche Numérique	12
2.1 Méthode des éléments discrets.....	12
2.2 Expérience modélisée.....	12
2.3 Modélisation d'une brique	15
2.4 Modélisation du mur	18
2.5 Simulation du cisaillement brique sur brique.....	21
2.6 Simulation du chargement d'un mur.....	26
Conclusion.....	30

Introduction générale

Contexte

Pendant le 20^e siècle, les ingénieurs ont souvent utilisé le béton et l'acier pour construire les ouvrages du Génie Civil. La connaissance de la technique traditionnelle pour construire les murs en pierres sèches a tendance à avoir été oubliée. Depuis les dix dernières années, l'intérêt pour retrouver ces connaissances anciennes est réapparu. Les murs en pierres sèches sont des murs uniques, parce que leur stabilité ne dépend que du poids volumique, et en plus ce mur est construit sans mortier.

Problème

Le mur en pierres sèches est un mur empirique utilisant des pierres disponibles localement, avec des pierres qui ne sont pas homogènes et très variées au niveau des tailles et des caractéristiques du matériau. Dans l'objectif de modéliser le comportement mécanique de ces murs, une méthode souvent utilisée consiste à homogénéiser le matériau constitué. D'autre part, il est encore difficile de modéliser ce qui se passe entre les lits de pierres, par exemple pour comprendre ce qui peut provoquer une dilatance. Pour répondre à cette question, et améliorer la compréhension de l'interaction entre briques de pierre, nous avons choisi, dans cette étude, de modéliser un mur en pierres sèches par la méthode des éléments discrets.

Objectifs et moyens choisir pour les atteindre

Dans l'objectif de reproduire les résultats des expériences réalisées par Julien Bonal à l'ENTPE sur des maquettes de murs en bois (voir chapitre 1.3.2), nous avons dans un premier temps chercher à reproduire le comportement d'une brique. Pour cela, nous avons modélisé l'essai de cisaillement de 2 briques l'une sur l'autre en faisant varier certains paramètres : nombre de disques composant la brique, coefficient de frottement local, etc. Une fois ces paramètres calibrés, nous avons construit un modèle de mur, constitué de ces mêmes briques de l'essai de cisaillement. Ensuite, on charge le mur pour trouver la hauteur critique du remblai.

Chapitre 1

Etude Bibliographique

1.1 Origine

La maçonnerie en pierres sèches est une technique de construction qui utilise des pierres disponibles localement, et les dispose sans aucun mortier à liant pour monter un mur. Elle se retrouve dans la plupart des régions du globe sous diverses formes. Pour construire un mur, il faut respecter les règles essentielles de l'art de bâtir en pierres sèches qui consiste essentiellement en savoir choisir quelle pierre mettre au bon endroit.

Quelques types de murs que l'on peut rencontrer:

- Les murs paysans
 - Ces murs utilisent un matériau directement utilisable
 - La qualité des murs paysans était très variable selon les pierres disponibles localement
 - Ces murs sont souvent très déformés
- Les murs ingénieurs (ex : les murs des romains)
 - Avoir d'une connaissance constructive éprouvée
 - Ces murs sont systématiquement construits

Le fait d'avoir des constructions en pierres sèches apporte un certains nombre d'avantages:

- Le mur en pierres sèches permet de résoudre les problèmes liés aux bassins de versants qui assurent la gestion de l'eau
- Ils servent souvent de bassins de rétention lorsque les pluies sont importantes et freinent ainsi le ruissellement
- Ces constructions permettent de répondre à la préoccupation de préservation de la qualité environnementale
- Ils représentent une identité paysagère et donc permettent de développer une économie touristique

Il existe de nombreux types de murs de soutènement en pierre sèche, mais on trouve une certaine constance dans les principes constructifs. On en tire les dispositions constructives suivantes:

- Les pierres les plus grosses sont réservées pour la fondation et pour les boutisses (longue pierre disposée transversalement au mur pour le lier dans son épaisseur)
- La fondation doit être particulièrement soignée et inclinée vers l'intérieur du massif soutenu
- Les pierres sont disposées transversalement avec la queue (partie la moins large) située vers l'intérieur du massif soutenu
- Les pierres sont décalées de façon à être en contact direct entre elles
- Pour augmenter le poids volumique de la maçonnerie, il est recommandé de répandre les débris de pierres à chaque couche de pierres afin de combler une partie des vides
- Le parement interne est réalisé de manière à assurer le meilleur frottement d'interface entre le mur et le remblai

1.2 Caractéristiques des murs en pierre sèches

On peut décomposer un mur en pierres sèches en plusieurs parties auxquelles on attribue un nom précis

- Le socle (ou fondation), c'est le premier lit de pierres du mur sur lequel ce dernier va reposer. Le socle peut soit s'inscrire dans le prolongement du parement du mur, soit ressortir en saillie par rapport au parement.
- Le parement extérieur, c'est la face visible du mur, que le bâtisseur en pierres sèches aura pris soin de travailler en soignant l'alignement et en faisant les pierres apparentes.
- Le parement intérieur, c'est la face non visible du mur, celle sur laquelle la poussée du sol de remblai vient s'appliquer.
- Le couronnement (ou arasement), c'est le dernier lit de pierre pose sur le mur. Il a pour rôle de bloquer les petites pierres de la cime du mur et de prévenir ainsi contre la dégradation

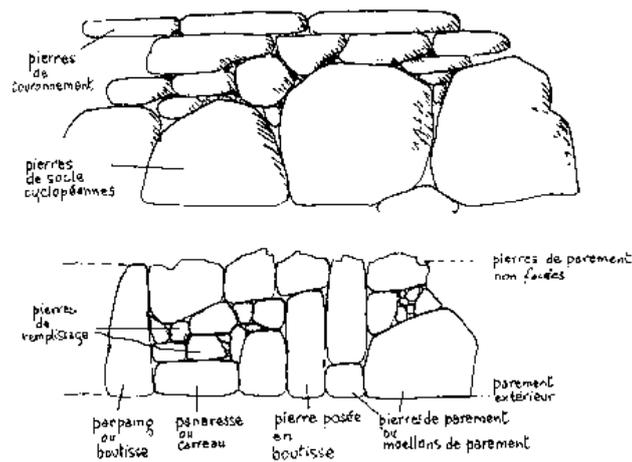


Figure 1. Désignation des pierres disposées dans le mur : élévation (haut) et coupe horizontale (bas) [2]

On classe les différentes pierres selon leur taille et leur forme et on leur affecte une place dans le mur, un rôle et un nom correspondant

- Les pierres de socle (ou pierres de fondation, pierres d'assise), ce sont des pierres solide de grande taille ; souvent cyclopéennes, qui vont garnir le fond de fouille et sont destinées à supporter le poids total du mur.
- Les pierres de bâti (boutisses, parpaings, panneresses), ce sont les modules qui constituent la trame du mur et assurent sa bonne tenue
- La boutisse est une longue pierre de liaison, la plus massive possible, que l'on couche dans l'épaisseur du mur pour relier les parements extérieurs et intérieurs et stabiliser l'ensemble de la construction
- La panneresse (ou carreau), a l'inverse de la boutisse, est une pierre dont toute la longueur est présentée en façade du mur, permettant ainsi de relier entre elles plusieurs pierres du parement
- Les pierres de parement, ce sont des pierres de dimensions variables présentant une face, soit naturellement, soit après taille que l'on destine au parement extérieur du mur auquel elles donnent sa partie visible. On les appelle aussi couramment moellons.
- Les pierres de blocage, ce sont des pierres de tout venant de tout calibre, destinées à l'organisation interne du mur.
- Les pierres de calage, ce sont des modules servant à caler entre elles les autres pierres.
- Les pierres de couronnement (ou couvertines), ce sont les pierres qui assurent la finition du mur et que l'on choisit selon le type d'appareillage que l'on souhaite mettre en œuvre
- Les pierres de drain, ce sont des débris ou cailloutis de petit calibre, souvent les restes inutilisables issus du démontage d'anciens murs, qui servent au remplissage à l'arrière de

l'ouvrage, pour former un drain supplémentaire et protéger le parement arrière du mur de l'invasion par les terres

Les murs en pierres sèches sont des constructions complexes et empiriques qui dépendent du savoir faire des matériaux locaux.

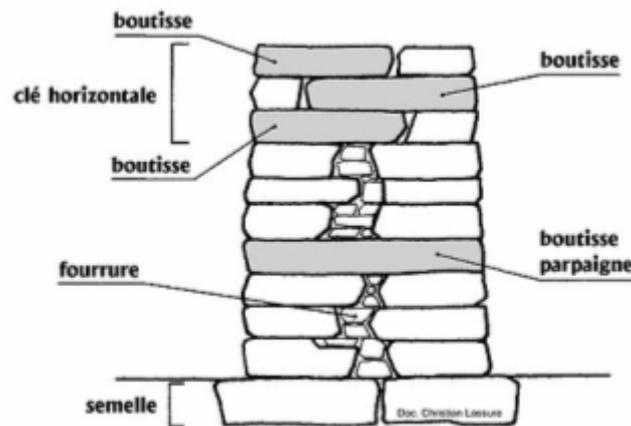


Figure 2. Coupe d'un mur en pierres sèches

1.3 Etudes précédentes

1.3.1 Expériences réalisées sur des murs en vraies grandeurs

- L'étude de Sir John Burgoyne (1834) [1]

Il crée les quatre murs en granite bâtis à sec. Ils sont de même longueur, de même hauteur, et de même volume mais présentent des profils différents (Figure 3).

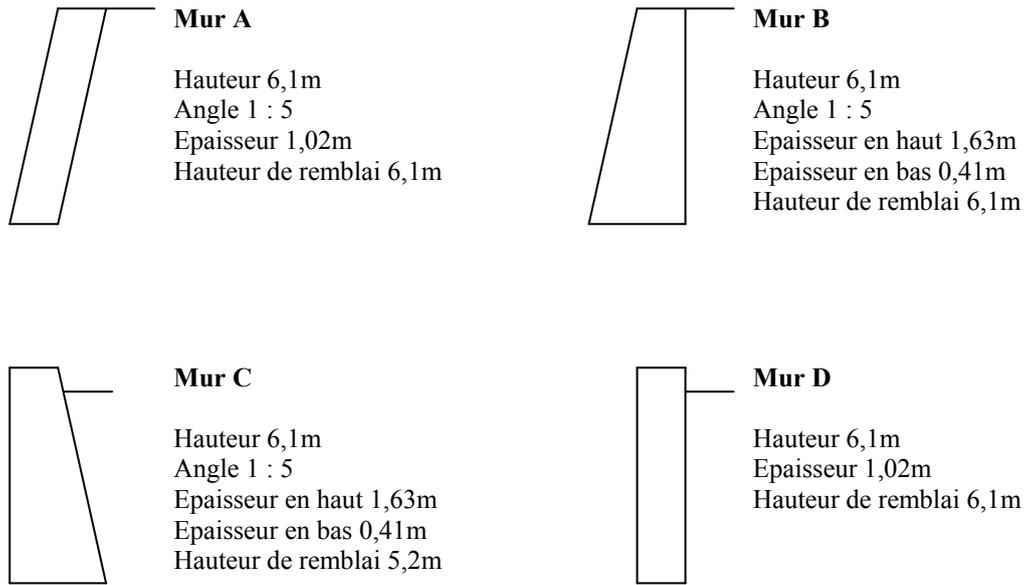


Figure 3. Les murs expérimentaux de Burgoyne

- L'étude de Boris Villemus (2002 et 2003) [4]

Il construit les quatre murs en calcaire bâtis au Beaucet (2002) et un mur en schiste bâti au Calberte (2003). Le chargement du mur est réalisé non pas par du remblai mais par un chargement hydrostatique.

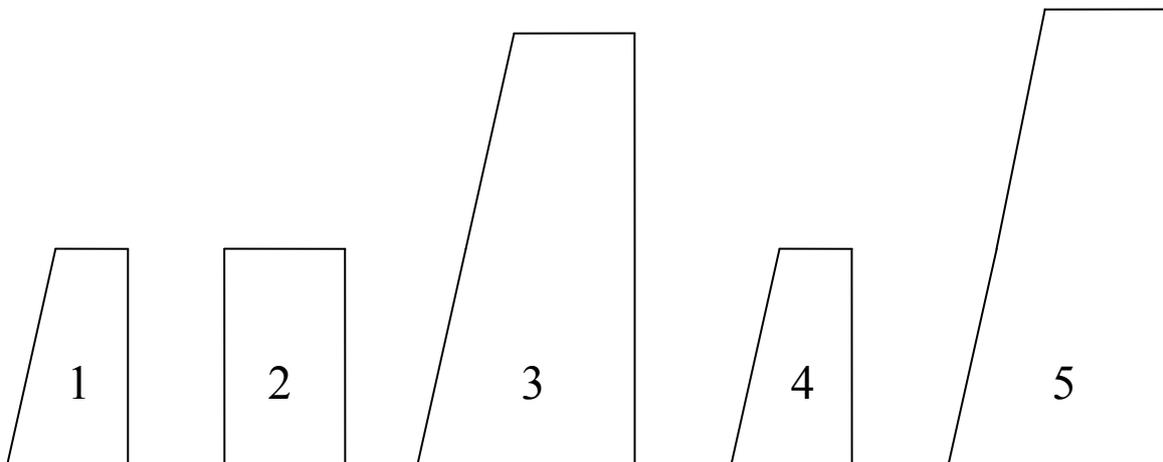


Figure 4. Les murs expérimentaux de Villemus

	Mur 1	Mur 2	Mur 3	Mur 4	Mur 5
hauteur h (m)	2	2	4	2	4,25
hauteur libre (m)	1,85	1,85	3,85	1,9	4,1
longueur (m)	2	2	3	2	2,95
épaisseur b en tête (m)	0,6	0,9	1,2	0,65	1,16
fruit (%)	15	0	15	12	15
masse volumique (t/m ³)	1,57	1,53	1,6	1,63	1,84
pourcentage de vides	25%	27%	24%	23%	32%

Tableau 1. Les paramètres des murs de Villemus

- L'étude d'Anne-Sophie Colas (2007) [9]

Elle crée un mur en schiste et un mur en granite et les charge par du remblai. Cette étude montre que la rupture du mur se manifeste par un mouvement d'ensemble de la partie supérieure instable. De plus, ce mouvement est généralisé et uniforme pour toute la longueur du mur.

1.3.2 Expériences réalisés sur des maquettes de murs

Julien Bonal (2007) a construit plusieurs murs en pierre et en bois qui ont été chargé par les rouleaux des Schneebelli. Ces études, en cours au Laboratoire des Géomatériaux de l'ENTPE, avaient pour objectif d'apprécier la capacité du modèle à prévoir la hauteur maximale du remblai qui peut être supporté par un mur donné. Ces travaux sont basés sur la théorie du calcul à la rupture. Le mur de pierre et bois est modélisé par une géométrie régulière des blocs puis homogénéisé afin d'obtenir un milieu continu équivalent.

1.3.3 Modèles analytiques

Les murs sont considérés comme monolithiques et répondent par conséquent à la mécanique du solide. Le mur est soumis à un ensemble d'effort extérieurs, à savoir : W (le poids du mur), P (la poussée du remblai sur le mur), R (la réaction de la fondation). La stabilité du mur comporte vérifiée avec les deux conditions suivantes:

- Le non glissement du mur sur sa base

La sécurité au glissement sur la base assure que la composante horizontale des forces suivant la direction de glissement reste inférieure à la résistance limite due au frottement du sol de fondation sur la base d'assise du mur

Le coefficient de sécurité au glissement F_g est défini comme le rapport entre la force résistante de cisaillement et la composante tangentielle de la réaction exercée sur la base.

À $F_g=1$, le mur est à l'équilibre. On admet que le mur est stable du glissement lorsque F_g est supérieur à 1,2.

- Le non renversement du mur

La sécurité au renversement assure que le mur ne tourne pas autour de son arête inférieure à l'aval de la fondation

Le coefficient de sécurité au renversement F_r est défini comme le rapport entre les moments stabilisant et renversant qui sollicitent le mur. À $F_r=1$, le mur est à l'équilibre. Dans la pratique, on cherche à avoir F_r supérieur à 1,5

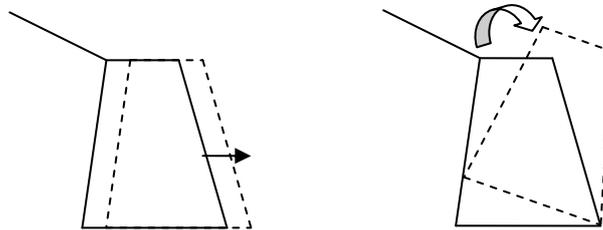


Figure 5. Stabilité externe (a) Glissement d'un mur sur sa base (b) Renversement d'un mur autour de son pied

La forte hétérogénéité de la maçonnerie et l'absence de mortier distingue les murs en pierres sèches des autres murs poids. Il est dans ce cas nécessaire de tenir compte, en plus des règles de stabilité externe, des ruptures internes de l'ouvrage pour garantir sa stabilité.

La partie supérieure du mur est la seule mobilisée en rupture et la partie inférieure restant solidaire de la fondation. Les coefficients de sécurité vis-à-vis du glissement ou du renversement sont alors calculés sur la partie supérieure du mur. Dans le cas d'une rupture, on considère que le mur se désolidarise en deux parties distinctes.

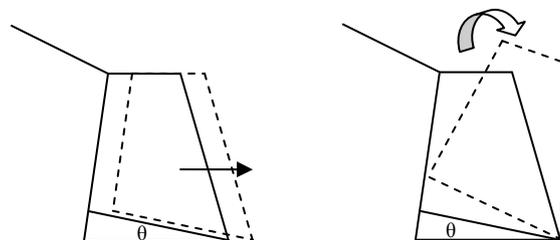


Figure 6. (a) Glissement et (b) Renversement d'un mur en pierre sèche

Il est important de rappeler que ces hypothèses de rupture interne ne sont vérifiées que lorsque le mur est construit selon les règles de l'art (les murs ingénieur), pour lesquels l'hypothèse fondamentale d'homogénéité du mur peut être formulée.

1.3.4 Modèles numériques

- L'étude de Harkness et al. [5]

Ils modélisent les 4 murs de Burgoyne avec le logiciel UDEC (version 2) qui se base en méthode des éléments discrets. En utilisant des murs et sols paramètres de Burgoyne, ils peuvent reproduire des analyse numériques pour ces murs. Cette recherche confirme l'influences de la géométrie au stabilité du mur

- L'étude de Zhang et al (2004)

Ils utilisent le logiciel VISAGE (méthode des éléments finis) pour modéliser les murs de Burgoyne et comparer ces résultats avec les modèles obtenus avec la méthode des éléments discrets (UDEC). Les résultats avec VISAGE, particulièrement l'hauteur critique du remblai est quasiment similaire par rapport à ceux des modèles utilisant la méthode des éléments distinct (UDEC).

- L'étude de Claxton et al (2005)

Il utilise le logiciel UDEC (version 3) pour faire les études paramétriques pour les murs de Burgoyne. De plus de reproduire le mur de Burgoyne, ils étudient plusieurs paramètres de mur (l'épaisseur de mur, l'angle de frottement de mur, le poids volumique de mur, l'angle frottement de remblai, le poids volumique de remblai), et les varie pour estimer l'influence de ces paramètres sur le mur de Burgoyne.

1.3.5 Synthèse

L'objectif du présent travail de stage est de modéliser les travaux de Julien Bonal avec le logiciel PFC qui se base sur la méthode des éléments distincts. Bien que ces essais soient réalisés avec des briques lisses, l'utilisation du logiciel PFC permet de tenir compte de la rugosité du surfaces des briques constituant le mur. A terme, le modèle doit permettre de vérifier l'influence de la rugosité des pierres sur le comportement dilatant pouvant être généré par le mouvement du mur ainsi que sur la stabilité de ce dernier. L'étude de Colas [9] a montré que le problème peut être abordé avec un modèle bidimensionnel. Le logiciel PFC2D sera donc utilisé.

L'étude réalisée ici correspond à une étude dite 'multi-échelles'. En premier lieu, l'essai de cisaillement brique sur brique est modélisé afin d'identifier les paramètres géométriques et

mécaniques à appliquer à la brique. Ces résultats sont comparés avec les modèles de brique obtenu et ensuite utilisé pour générer des murs. La stabilité de ces murs sous chargement est alors étudiée et comparée avec résultats de Bonal.

Chapitre 2

Approche Numérique

2.1 Méthode des éléments discrets

Dans ce mémoire, on utilise le logiciel PFC qui se base sur la méthode des éléments discrets. Avec cette méthode, les interactions entre les particules sont traitées comme un processus dynamique. Les avantages de cette méthode :

- La MED peut être utilisée pour simuler une grande variété de comportements granulaires (compaction, cisaillement, écoulement). Les résultats obtenus par les chercheurs s'accordent bien avec les résultats expérimentaux.
- La MED permet une étude plus détaillée de l'écoulement des matériaux granulaires car ces mesures sont presque impossibles dans les expériences (beaucoup de particules, de tailles variables) d'obtenir des informations locales sur le comportement auxquelles l'expérimental ne permet pas d'accéder. Elle représente donc un outil complémentaire à l'expérience.

Les inconvénients de cette méthode :

- Le nombre maximal de particules est limité par la puissance actuelle des ordinateurs. Dans l'étude d'ouvrages réels, le matériau granulaire est généralement modélisé de manière plus grossière, afin de limiter le nombre d'éléments. Cet aspect permet aussi de limiter les temps de calcul qui augmentent avec le nombre d'éléments.
- Les simulations sont généralement limitées à des particules à géométrie simple (disque ou polyèdre) en raison de l'augmentation des temps de calcul avec la complexité de sa géométrie.

2.2 Expérience modélisée

Bonal a créé deux maquettes de mur avec deux matériaux différents (pierre et bois). Les briques mesurent environ 6 cm de longueur, 2 cm de largeur, et 1 cm de hauteur. Le

chargement est réalisé avec un matériau analogique de Schneebeli. Ce sont des rouleaux cylindriques en duralium, de 6 cm de longueur et leur diamètre est compris entre 3 et 5 mm.

Pour comparer le modèle numérique et les maquettes, il faut mesurer les caractéristiques nécessaires des briques, les poids volumiques de mur γ_m , de sol analogique γ_s , et les angles de frottement entre les lits de murs ϕ_m et dans le massif de sol ϕ_s . Le sol analogique a une cohésion nulle.

Le frottement entre deux lits de briques a été mesuré. Le lit du bas est surélevé pour que la surface de glissement se trouve au même niveau que l'interface entre les éléments de la boîte. Les briques ne sont pas parfaitement régulières, il peut apparaître une butée au cours de l'essai. Cela se traduit par une montée anormale de la contrainte de cisaillement. L'angle de frottement interne obtenu pour les briques en pierre est 34° (Figure 8), et pour les briques en bois est 30° (Figure 9).



Figure 7. Mur de briques de (a) pierre ; (b) bois

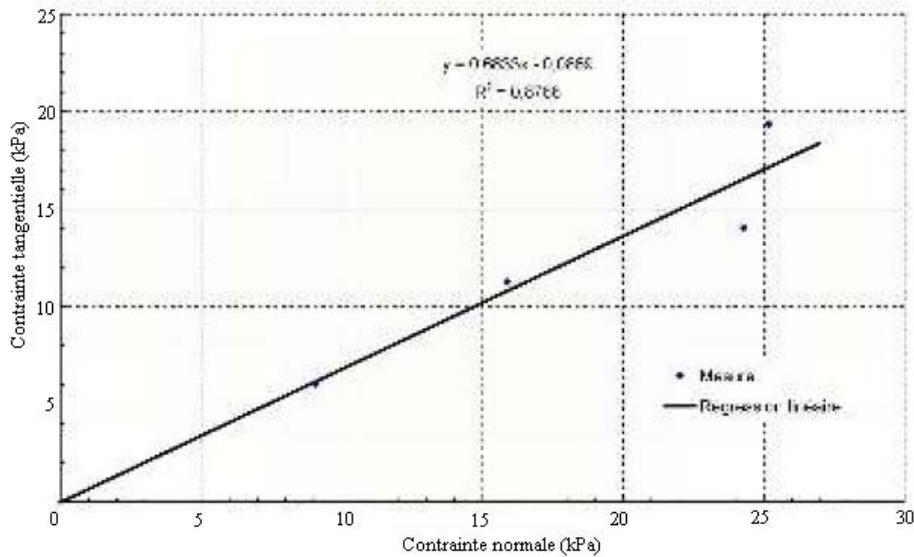


Figure 8. Résultats des mesures de cisaillement des lits de briques en pierre dans le plan de Mohr (d'après Bonal)

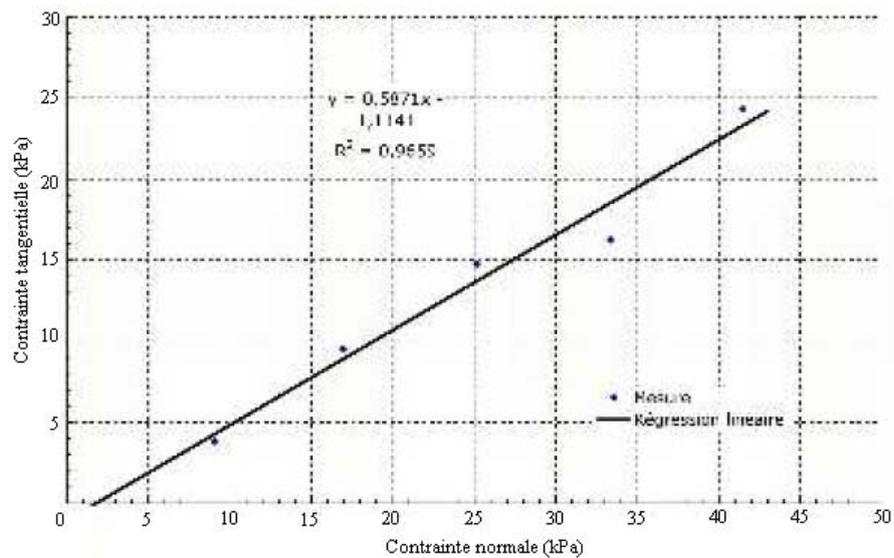


Figure 9. Résultats des mesures de cisaillement des lits de briques de bois dans le plan de Mohr (d'après Bonal)

L'étude réalisée par Bonal regroupe les résultats de 9 maquettes de murs en pierre et 10 maquettes en bois. Pour notre étude, on choisit les paramètres du mur de bois, avec $\gamma_m = 7,1 \text{ kN/m}^3$ et l'angle de frottement $\phi_m = 30$. Le Figure 10 nous montre que avec $\beta = 0$ (il n'y a pas une inclinaison du remblai), la hauteur critique du mur de bois est à peu près 20 cm.

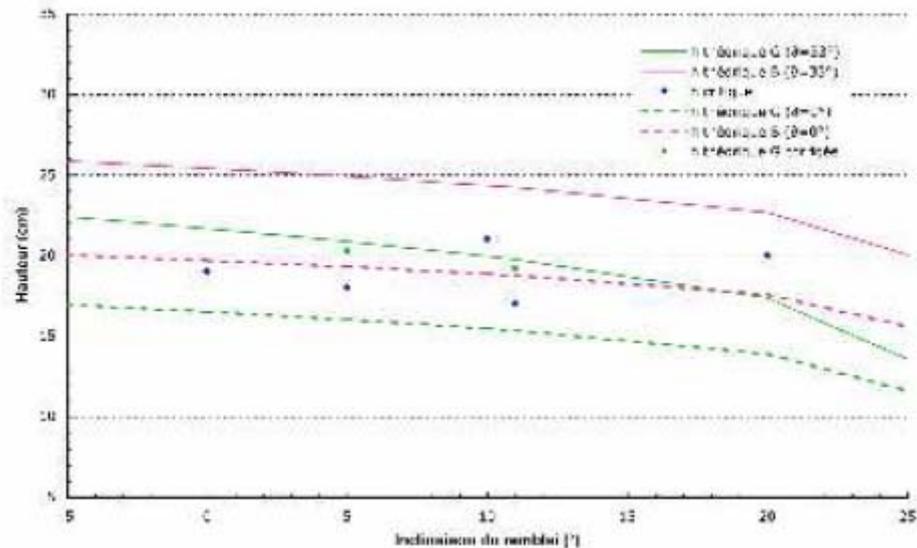


Figure 10. Variation de la hauteur critique en fonction de β

2.3 Modélisation d'une brique

L'approche numérique a été réalisée avec par le logiciel PFC 2D. Ce logiciel est basé sur la méthode des éléments discrets. Dans un premier temps, nous avons modélisé l'essai à la boîte de cisaillement et comparé ses résultats avec les expériences de Bonal. Une fois les paramètres des briques calibrés, plusieurs murs ont été modélisés avec ces briques et un chargement leur a été appliqué.

Les briques mesurent 0,9 cm de hauteur et 1,8 cm de largeur et chaque brique est constituée à peu près de 675 particules. Dans cette modélisation, pour modéliser une brique on utilise les 'clump'. Les clumps correspondent à la possibilité dans PFC d'assembler rigidement plusieurs disques entre eux. Les paramètres de modèle de mur sont :

- Nombre de briques dans la direction x : 6
- Nombre de briques dans la direction y : 30
- Coefficient de rigidité du mur : 10^{10} N/m
- Coefficient de rigidité des disques : 10^8 N/m
- Coefficient de frottement : 0,5
- Diamètre des disques : 2 mm – 3 mm
- $\gamma_m = 7,1$ kN/m³
- Même granulométrie

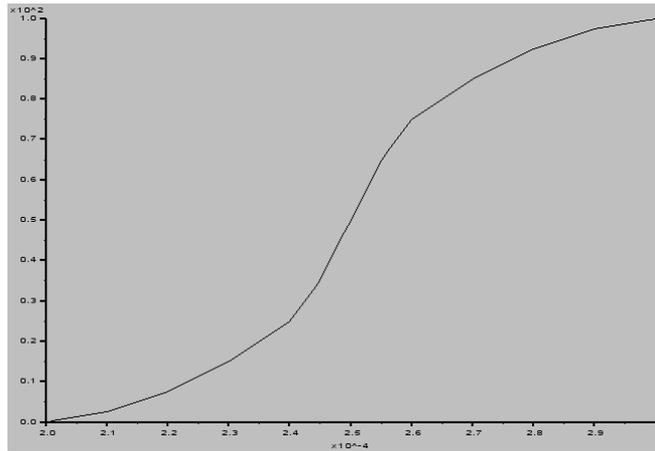


Figure 11. Granulométrie de chaque brique

Il y a 3 méthodes possibles pour générer un brique :

1. On peut choisir de générer les briques avec un certain indice des vides (Figure 12)

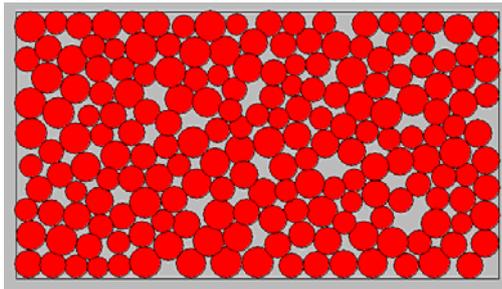


Figure 12. Briques avec l'indice des vides 0,16

2. On peut générer les briques avec une certaine granulométrie (et un nombre des disques fixé) (Figure 13)

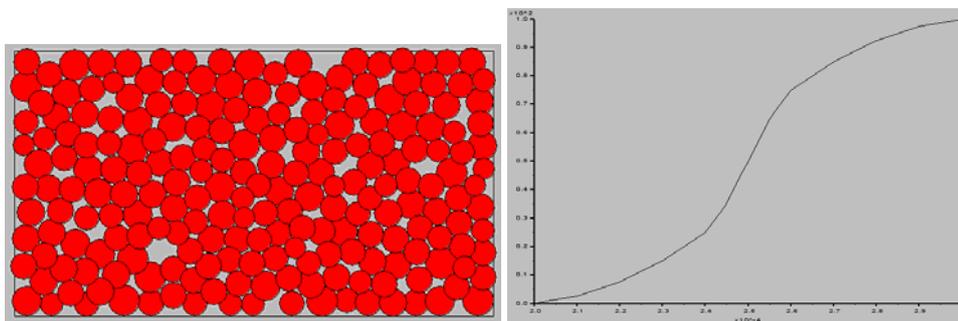


Figure 13. (a) Briques avec certaine granulométrie (± 200 disques), (b) granulométrie du brique à gauche

3. On peut générer les briques régulières (Figure 14)

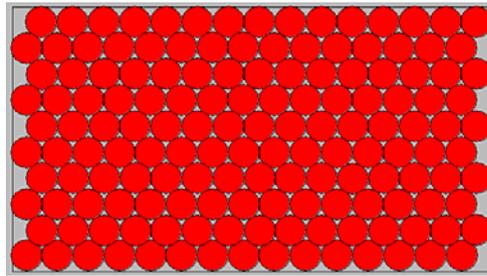


Figure 14. Brique régulière

Les étapes pour créer une brique sont les suivantes : (voir Figure 15)

- Créer une boîte rectangulaire de la taille voulue, dans laquelle les particules seront contenues dans cette boîte
- Générer des particules à l'intérieur de cette boîte de manière aléatoire. Nous avons choisie de générer à peu près de 675 billes dans chaque brique
- Cycler pour que les particules trouvent une position d'équilibre, car avec les méthodes 1 et 2, les particules vont s'interpénétrer
- Agglutiner les particules en ajoutant une faible charge à chaque particule dirigée vers centre de la boîte.
- Convertir les éléments discrets en *clump* pour finaliser la brique, car on suppose que la brique est rigide.

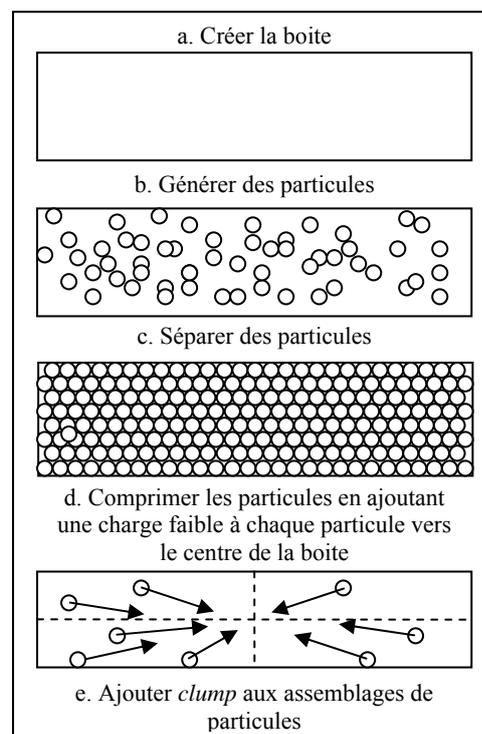


Figure 15. Génération de la brique

2.4 Modélisation du mur

Ensuite, le mur sera construit avec plusieurs briques. La méthode de construction est la suivante :

- Génération une à une des briques d'un même lit.
- Répétition de l'opération jusqu'à ce que la hauteur du mur réel soit atteinte.

Cette méthode implique de débiter un lit sur deux par une demi brique. Le schéma est le suivant :

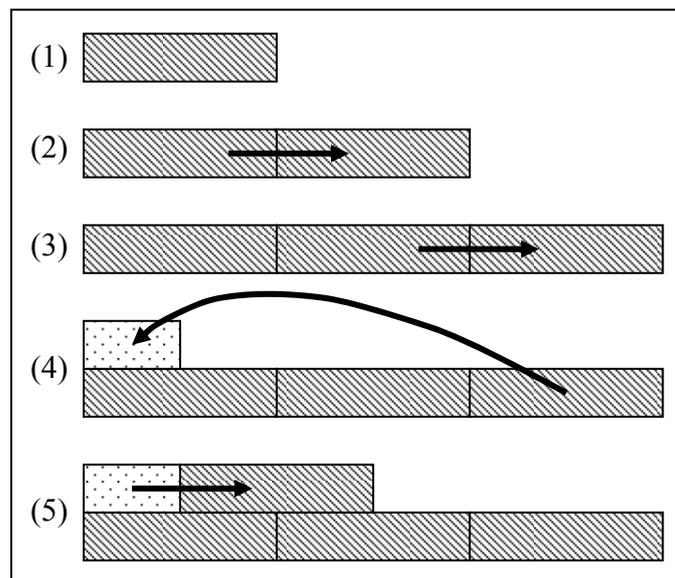


Figure 16. Génération du mur avec des briques en quinconce

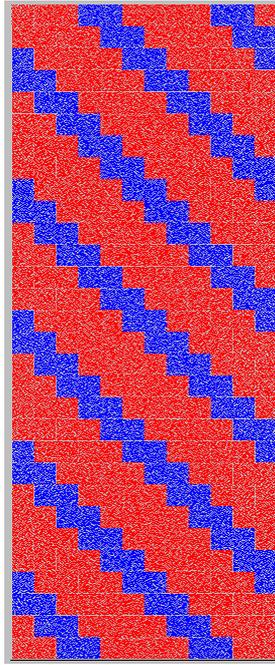


Figure 17. Modèle numérique du mur

A la fin de la construction du mur, il y a une grande interpénétration entre les disques situées sur le périmètre des briques et appartenant à des briques différentes. Nous avons résolu ce problème en déplaçant les disques trop interpénétrés par la méthode suivante :

- Trouver toutes les interpénétrations situées sur le périmètre des briques
- Supprimer les disques qui sont trop interpénétrés
- Régénérer des disques au contact (Figure 18)

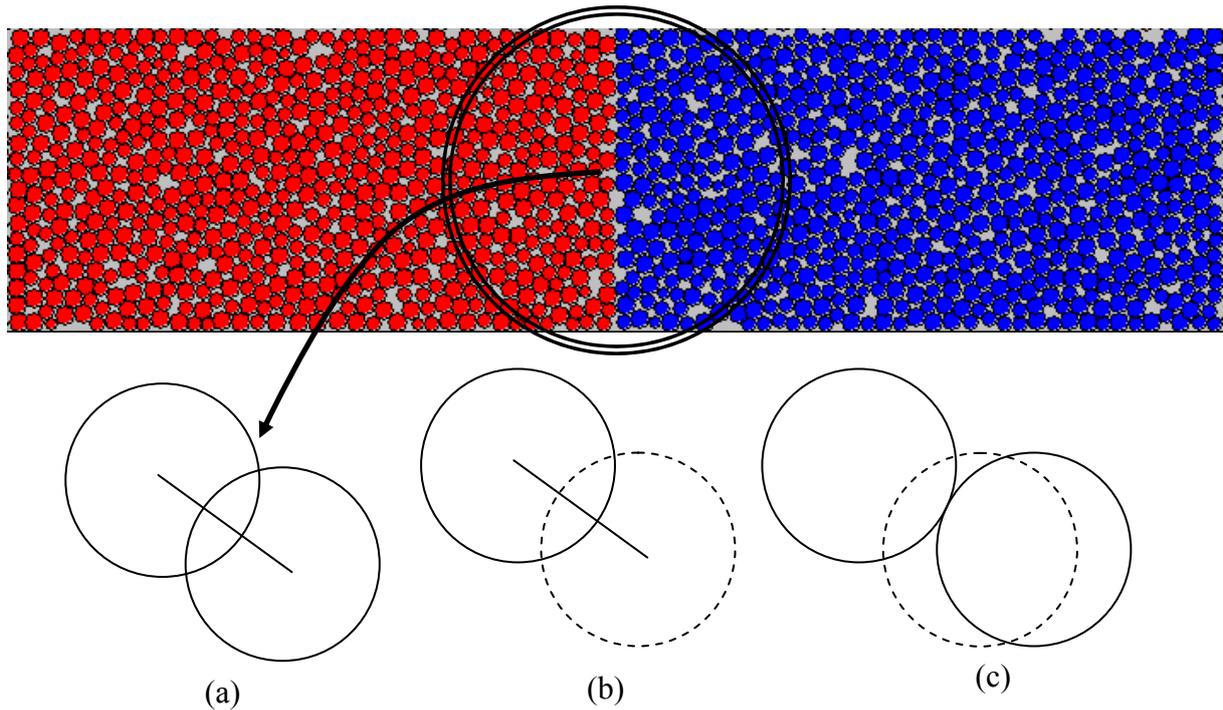


Figure 18. Procédure utilisée pour supprimer les interpénétrations (a) trouver les interpénétrations (b) supprimer une disque(c) régénérer une disque en contact

Pour charger le mur, on utilise les disques qui remplacent les rouleaux de Schneebeli. Chaque disque de chargement exerce une force proportionnelle à ces disques diamètre. Pour la pression du sol, on applique la théorie de Rankine :

$$K_a = \cos\beta \frac{\cos\beta - (\cos^2\beta - \cos^2\theta)^{1/2}}{\cos\beta + (\cos^2\beta - \cos^2\theta)^{1/2}}$$

Où :

- β est l'inclinaison de remblai par rapport à la direction horizontal
- θ est l'angle de frottement de remblai

Dans les simulations entreprises, la valeur du paramètre β est prise égale à zéro (remblai horizontal). Dans le programme créé, ce paramètre a néanmoins été incorporé afin de rendre possible l'étude de remblais inclinés par les futurs utilisateurs.

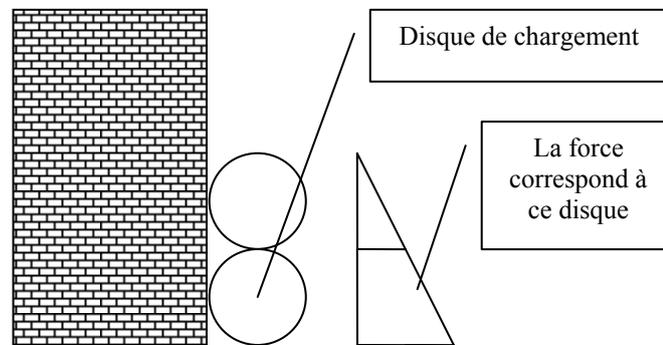


Figure 19. Disque de chargement

2.5 Simulation du cisaillement brique sur brique

Avant de générer le modèle de mur, on doit trouver les paramètres numériques permettant de reproduire les caractéristiques des briques utilisées dans l'expérience de Bonal. Pour trouver ces paramètres, nous avons fait plusieurs simulations de l'essai de cisaillement en faisant varier certains paramètres. Nous avons testé 3 valeurs de la rigidité des disques, 4 valeurs de vitesse de cisaillement 4 coefficients de frottement de disque, et 2 méthodes de générations des briques.

No	Variation	Variable
1	Rigidité des briques	10^7 N/m; 10^8 N/m; 10^9 N/m
2	Vitesse de cisaillement	10^{-4} m/s ; 5×10^{-4} m/s ; 10^{-3} m/s ; 5×10^{-3} m/s
3	Coefficients de frottement de disque	0,1 ; 0,3 ; 0,5 ; 0,7
4	Méthode de génération des briques	Régulière, aléatoire

Tableau 2. La variation du modèle numérique

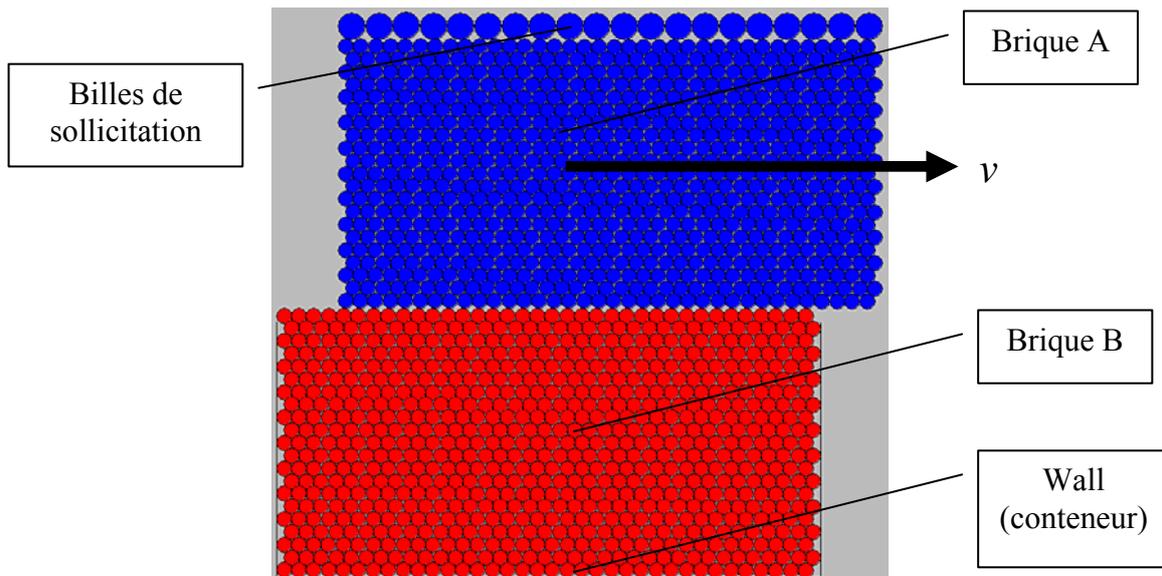


Figure 20. L'essai de cisaillement

Ces simulations ont permis de mettre en évidence :

- Les effets de la rigidité (Figure 21)

On trouve que, avec $k_N = 10^7$ N/m, l'interpénétration entre des particules au périmètre est trop grande comparée aux cas avec $k_N = 10^8$ N/m. En revanche, la différence d'interpénétration est négligeable entre les cas $k_N = 10^8$ N/m et $k_N = 10^9$ N/m. Nous avons donc pris la valeur intermédiaire $k = 10^8$ N/m pour la rigidité des disques, afin de limiter le temps de calcul qui augmente avec la rigidité.

- Choix d'une vitesse

Le temps de simulation est directement lié à la vitesse de sollicitation. Cette vitesse doit être suffisamment faible pour que la sollicitation conserve son caractère quasi statique, mais suffisamment rapide pour limiter le temps de calcul. Finalement, ce compromis a abouti à choisir la vitesse $v = 5.10^{-4} s^{-1}$.

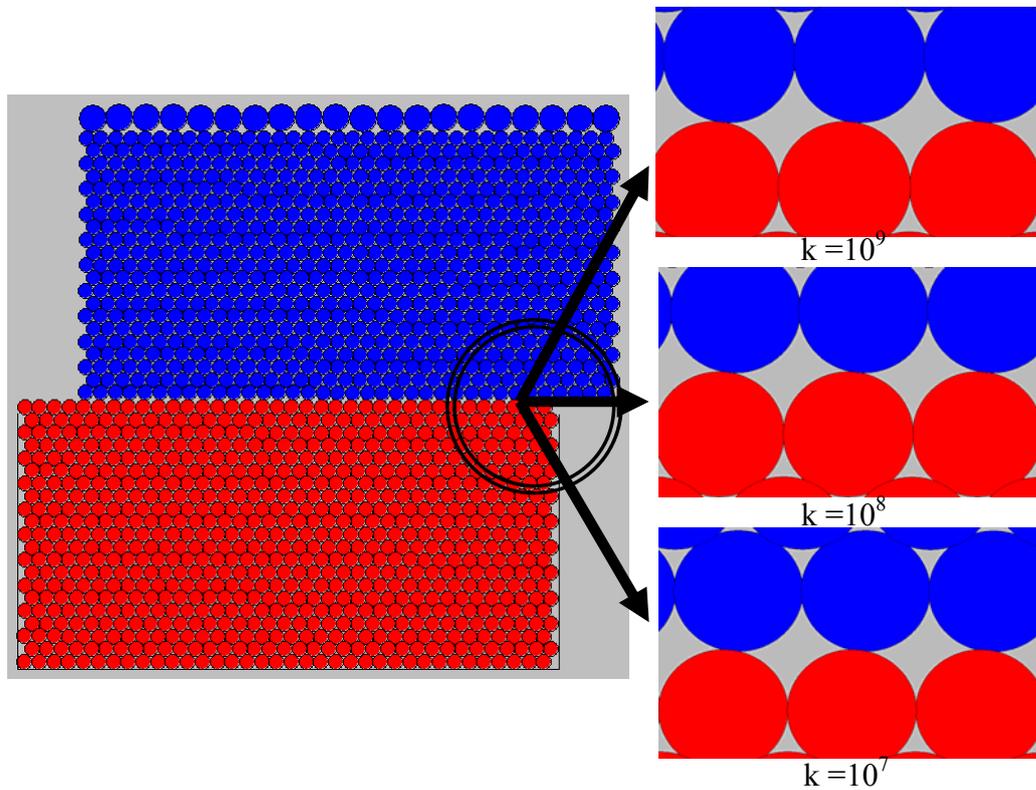


Figure 21. Effet de la rigidité

- Les effets du coefficient de frottement

L'étude suivante a été réalisée à rigidité de contact et vitesse de sollicitation équivalentes pour chaque simulation. Quand on regarde les relations entre le déplacement horizontal et le coefficient de frottement global en variation de coefficient de frottement local, les effets de rugosité diminuent lorsque le coefficient de frottement local augmente, comparé aux effets dus au frottement local.

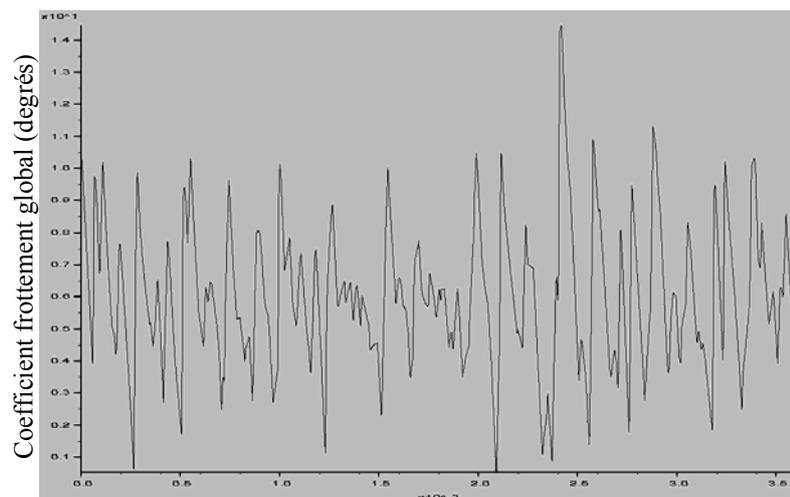


Figure 22. Déplacement horizontal ($k = 10^8$, $v = 5.10^{-4}$, $\mu = 0,1$, $\phi_m = 6$)

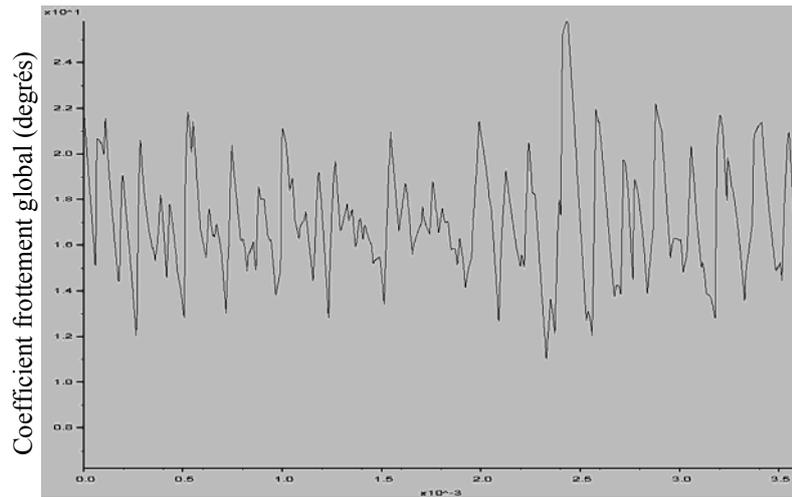


Figure 23. Déplacement horizontal ($k = 10^8, \nu = 5.10^{-4}, \mu = 0,3, \phi_m = 17,13$)

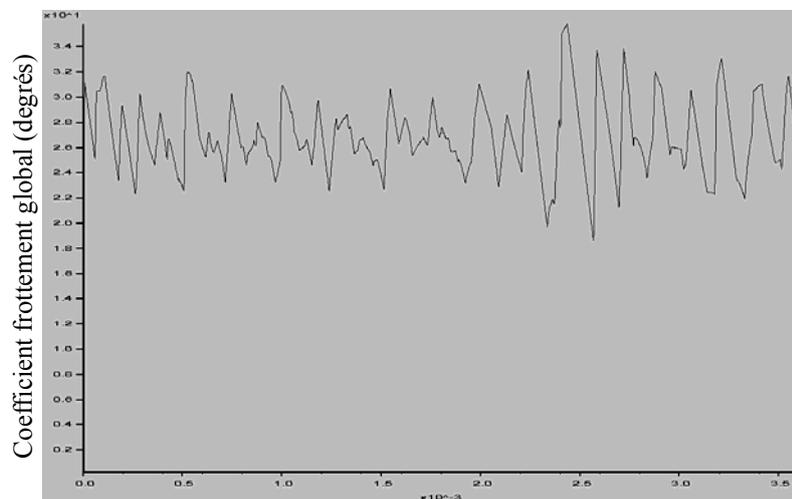


Figure 24. Déplacement horizontal ($k = 10^8, \nu = 5.10^{-4}, \mu = 0,5, \phi_m = 26,91$)

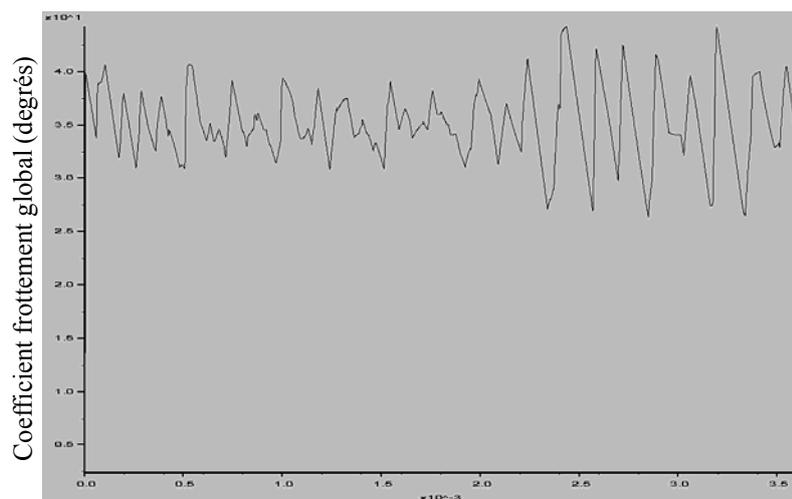


Figure 25. Déplacement horizontal ($k = 10^8, \nu = 5.10^{-4}, \mu = 0,7, \phi_m = 35,17$)

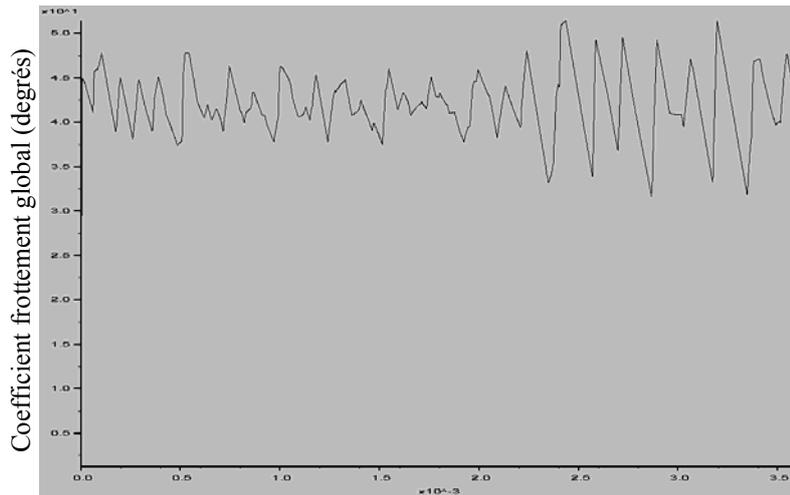


Figure 26. Déplacement horizontal ($k = 10^8$, $\nu = 5.10^{-4}$, $\mu = 0,9$, $\phi_m = 42,07$)

- La relation entre frottement local et frottement global

Après plusieurs essais, on montre que le coefficient de frottement global est plus grand que le coefficient de frottement local, conformément à ce qui est trouvé dans la littérature.

Frottement local (°)	Frottement global moyenne (°)			
	Conf. 1	Conf. 2	Conf. 3	Conf. 4
5,7	6	6,3	6,8	6,2
16,7	17,1	17,6	17,7	17,2
26,6	26,9	27,3	27,8	26,9
35	35,2	35,2	35,9	35,2
42	42,01	42,2	42,3	42,2

Tableau 3. Relation entre les coefficients de frottement local et global (en degré)

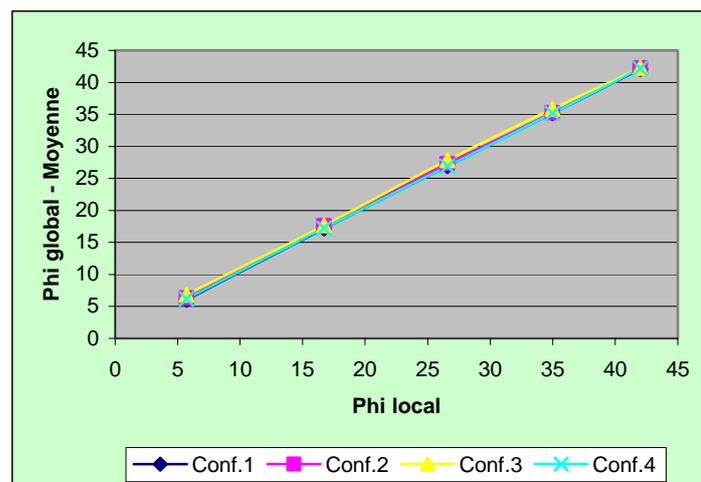


Figure 27. Relation entre les coefficients de frottement local et global (graphique)

2.6 Simulation du chargement d'un mur

Les paramètres déterminés dans la section précédente ont été appliqués pour l'étude du chargement du mur. Pour connaître la hauteur critique du remblai, on suit la valeur de l'énergie cinétique au cours des temps et le déplacement de mur (couche par couche). Le chargement est réalisé par la répétitions de deux étapes jusqu'à obtention de la ruine du mur :

- Ajout d'un nouvel élément et augmentation du chargement (correspondant à une augmentation équivalente de la hauteur de remblai)
- Cycles de calculs pour stabiliser le système (5000 cycles)

Par la suite, on simule trois essais de chargement de remblai au même mur de simulation par couche, mais on applique différents chargements (Figure 28) :

- Le premier cas correspond au cas de base, faisant intervenir les paramètres mécaniques et géométriques présentés ci-dessus.
- Le second mur est chargé non pas à gauche mais à droite. Les positions des éléments discrets au sein de chaque brique les rendent asymétriques. Cette étude a pour but d'étudier la pertinence du choix du nombre de disque au sein de chaque brique en testant la reproductibilité des essais sur des murs réputés identiques.
- Le troisième essai fait intervenir un chargement non plus normal, mais tenant compte du frottement du remblai contre le mur.

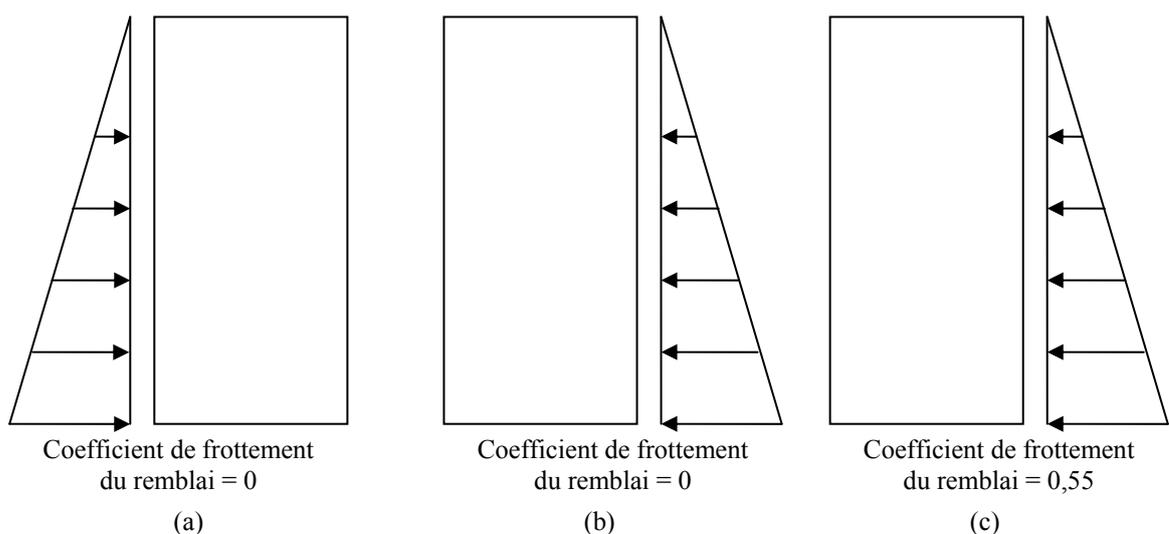


Figure 28. L'essai de chargement sur le logiciel PFC

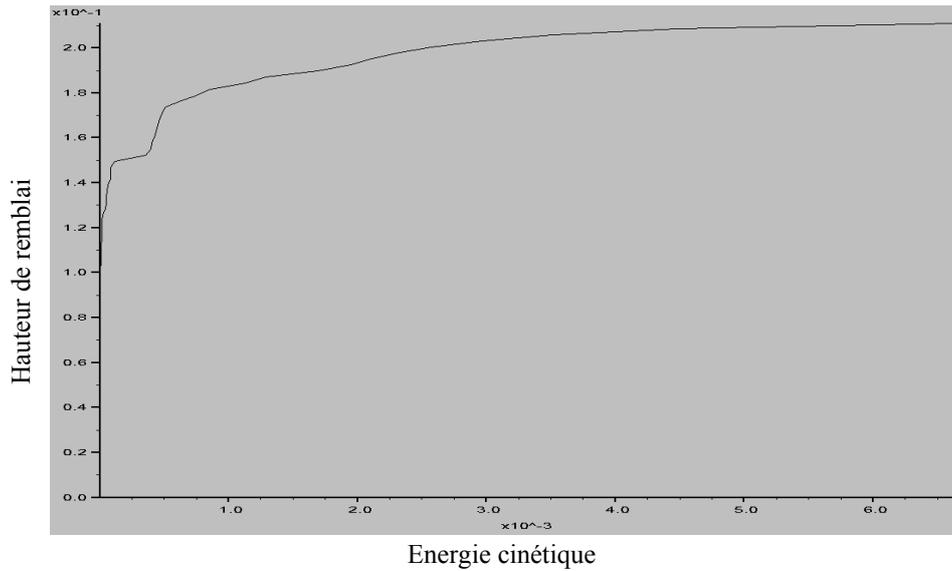


Figure 29. Relation entre l'énergie cinétique et l'hauteur de remblai (essai A)

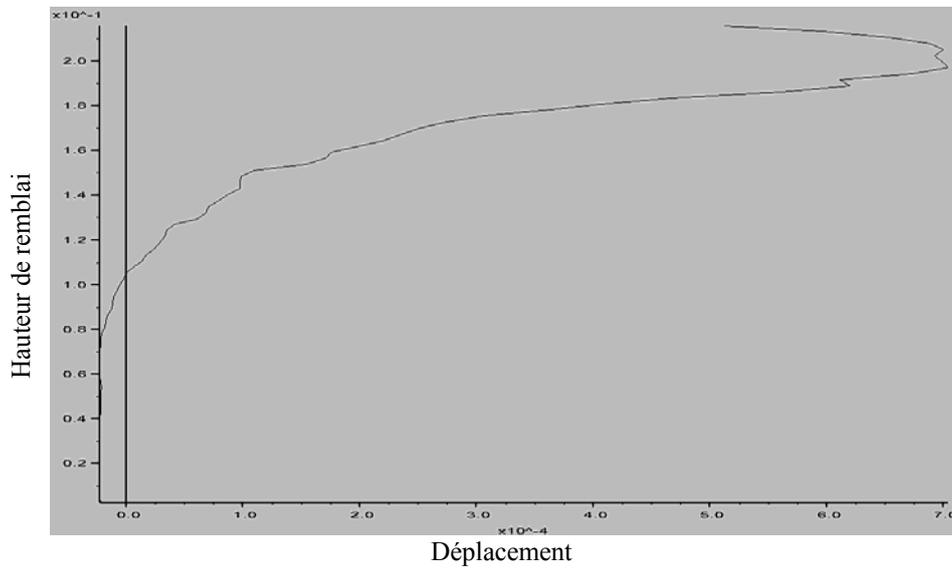


Figure 30. Relation entre le déplacement et hauteur de remblai (essai A)

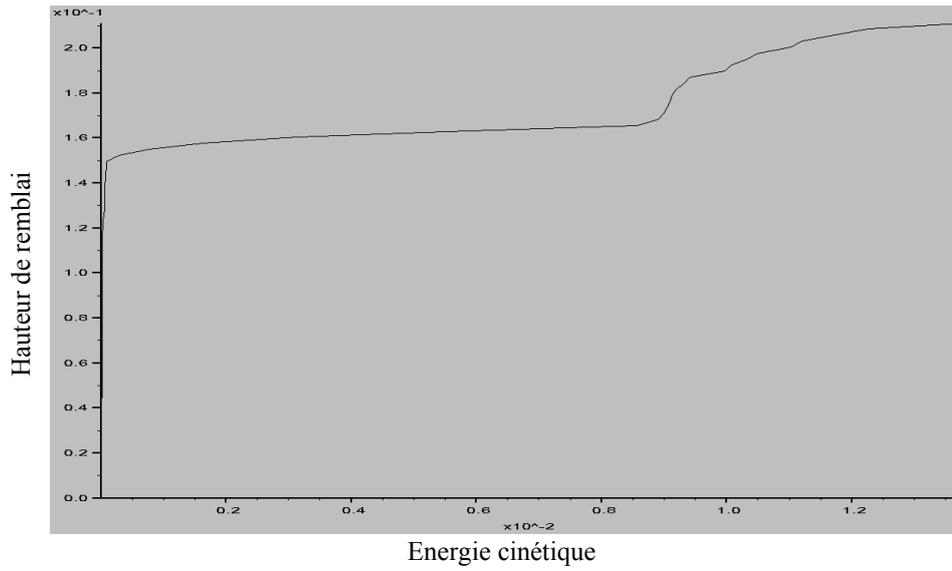


Figure 31. Relation entre l'énergie cinétique et l'hauteur de remblai (essai B)

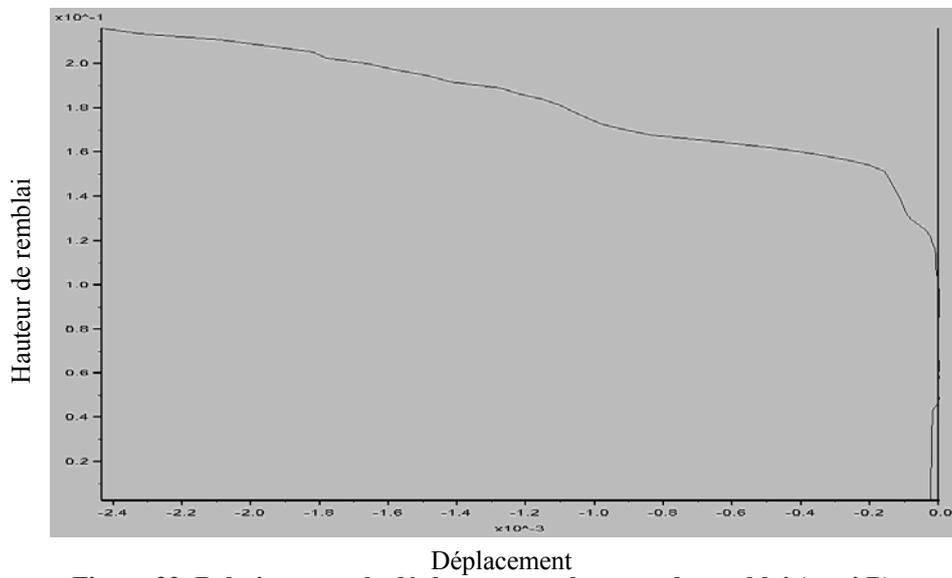


Figure 32. Relation entre le déplacement et hauteur de remblai (essai B)

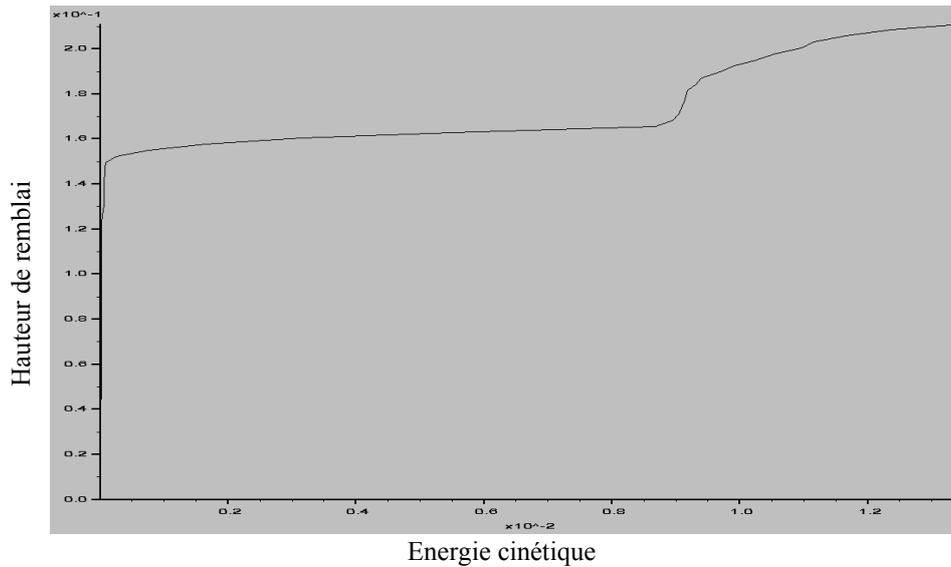


Figure 33. Relation entre l'énergie cinétique et l'hauteur de remblai (essai C)

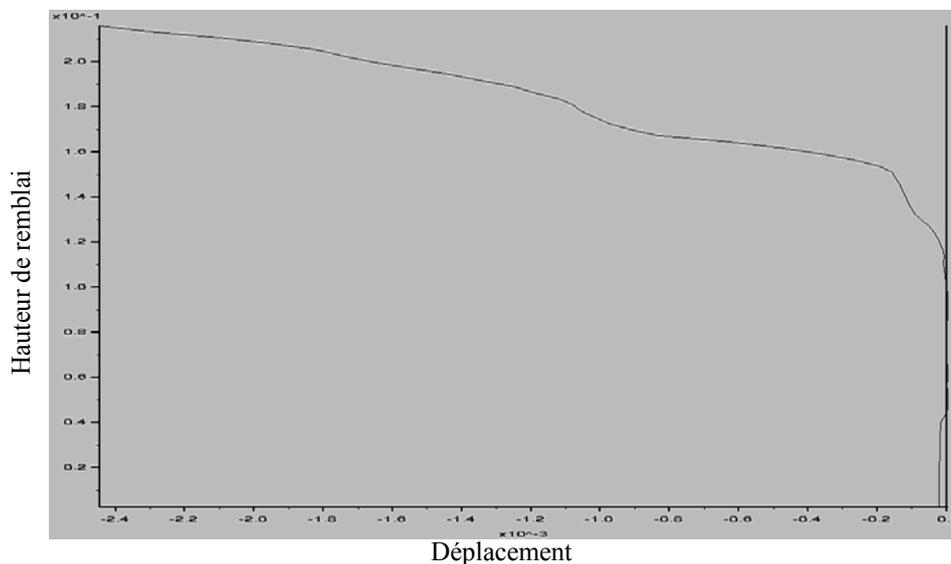


Figure 34. Relation entre le déplacement et hauteur de remblai (essai C)

Afin de déterminer la hauteur de remblai pour laquelle le mur devient instable, deux types de graphes ont été étudiés. L'étude de l'énergie cinétique du système (mur + remblai) en fonction de la hauteur de remblai permet de définir la hauteur de remblai pour laquelle le mur devient instable. Ce point correspond à l'état de rupture. En repérant les déplacements de la brique supérieure du parement située en tête de mur, le déplacement horizontal de la partie du mur à l'état de rupture peut être alors déterminé.

Les trois simulations au-dessus ont nous montré la même tendance : l'énergie cinétique du système augmente fortement à partir d'une hauteur de remblai située dans l'intervalle 14-16 cm. A cet intervalle de hauteur de remblai correspond un déplacement de l'ordre de 2×10^{-4} m.

La tendance similaire des résultats indiquent que les briques sont suffisamment bien discrétisées pour que le modèle soit reproductible. De plus, l'effet du frottement du remblai sur le mur semble jouer un rôle secondaire sur la capacité du mur.

En revanche, d'après l'expérience de Bonal avec $\beta = 0$ pour le mur de bois, on trouve une hauteur critique égale à 19cm (Figure 10). Dans la configuration testée, le modèle sous-estime de 10% la hauteur de remblai pouvant être retenue par le mur.

Conclusion

L'attrait renaissant pour les murs de soutènement en pierres sèches motivent l'étude de leur comportement expérimental et leur modélisation ces dernières années. Dans le présent travail, une approche numérique de type modélisation discrète a été choisie. Contrairement aux études précédentes fournies par la littérature, la rugosité des pierres constituant le mur a été prise en compte dans le modèle.

Les expériences de Bonal ont été modélisée avec cette approche, bien que la rugosité des briques en bois soit limitée. Un protocole de détermination des paramètres du modèle a été mis en place et une méthode de calibration a été définie. La simulation de chargement du mur montre que le modèle sous-estime de 10% la hauteur de remblai pouvant être retenue par le mur, comparée aux résultats expérimentaux.

Ce résultat encourageant nécessite néanmoins d'être éprouvé sur des configurations de murs en pierres, pour lesquels la rugosité – et l'intérêt de l'approche avec PFC_{2D} – peuvent être vérifiées.

Bibliographie

- [1] J.F. Burgoyne. Revetments or retaining walls. 1853. Corp of Royal Engineers Papers 3, 154-159
- [2] Confédération de l'Artisanat et des Petites Entreprises du Bâtiment (CAPEB). 2008. Pierres sèches : guide de bonnes pratiques de construction de murs de soutènement
- [3] J. Bonal.. 2007. Stabilité des murs de soutènement en pierres sèches. ENTPE

- [4] B. Villemus. Etude des Murs de Soutènement en Maçonnerie de Pierre Sèches. 2004. Thèse ENTPE
- [5] W. Powrie, R.M. Harkness, X. Zhang, D.I. Bush. Deformation and failure modes of drystone retaining walls. *Géotechnique* 52, No. 6, 435-446
- [6] M. Claxton, R.A. Hart, P. F. McCombie, P.J. Walker. Rigid block distinct-element modeling of dry-stone retaining walls in plane strain. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Mai 2005
- [7] X. Zhang, N.C. Koutsabeloulis, S. Hope, A. Pearce. A finite element analysis for the stability of drystone masonry retaining walls. *Géotechnique* 54, No. 1, 57-60
- [8] B. Villemus, J.C. Morel, C. Boutin. Experimental assessment of dry stone retaining wall stability on a rigid foundation. *Engineering Structures* 29 (2007) 2124-2132
- [9] A.S. Colas, J.C. Morel, D. Garnier. Yield design of dry-stone masonry retaining structures – Comparisons with analytical, numerical, and experimental data
- [10] Itasca Consulting Group. PFC^{2D} version 3.0 user guide. 2002

Conclusion

L'attrait renaissant pour les murs de soutènement en pierres sèches motivent l'étude de leur comportement expérimental et leur modélisation ces dernières années. Dans le présent travail, une approche numérique de type modélisation discrète a été choisie. Contrairement aux études précédentes fournies par la littérature, la rugosité des pierres constituant le mur a été prise en compte dans le modèle.

Les expériences de Bonal ont été modélisées avec cette approche, bien que la rugosité des briques en bois soit limitée. Un protocole de détermination des paramètres du modèle a été mis en place et une méthode de calibration a été définie. La simulation de chargement du mur montre que le modèle sous-estime de 10% la hauteur de remblai pouvant être retenue par le mur, comparée aux résultats expérimentaux.

Ce résultat encourageant nécessite néanmoins d'être éprouvé sur des configurations de murs en pierres, pour lesquels la rugosité – et l'intérêt de l'approche avec PFC_{2D} – peuvent être vérifiées.

Bibliographie

- [1] J.F. Burgoyne. Revetments or retaining walls. 1853. Corp of Royal Engineers Papers 3, 154-159
- [2] Confédération de l'Artisanat et des Petites Entreprises du Bâtiment (CAPEB). 2008. Pierres sèches : guide de bonnes pratiques de construction de murs de soutènement
- [3] J. Bonal.. 2007. Stabilité des murs de soutènement en pierres sèches. ENTPE
- [4] B. Villemus. Etude des Murs de Soutènement en Maçonnerie de Pierre Sèches. 2004. Thèse ENTPE
- [5] W. Powrie, R.M. Harkness, X. Zhang, D.I. Bush. Deformation and failure modes of drystone retaining walls. *Géotechnique* 52, No. 6, 435-446
- [6] M. Claxton, R.A. Hart, P. F. McCombie, P.J. Walker. Rigid block distinct-element modeling of dry-stone retaining walls in plane strain. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Mai 2005
- [7] X. Zhang, N.C. Koutsabeloulis, S. Hope, A. Pearce. A finite element analysis for the stability of drystone masonry retaining walls. *Géotechnique* 54, No. 1, 57-60
- [8] B. Villemus, J.C. Morel, C. Boutin. Experimental assessment of dry stone retaining wall stability on a rigid foundation. *Engineering Structures* 29 (2007) 2124-2132
- [9] A.S. Colas, J.C. Morel, D. Garnier. Yield design of dry-stone masonry retaining structures – Comparisons with analytical, numerical, and experimental data
- [10] Itasca Consulting Group. PFC^{2D} version 3.0 user guide. 2002