

---

# Influence du mode de déplacement sur la rupture des: Cas de la poussée et de la butée

Abdelkrim Sekkel<sup>1\*</sup>, Mourad Meghachou<sup>2</sup>, Nabil Aboubekr<sup>3</sup>, Pierre Vacher<sup>4</sup>

1 Université Dr Moulay Tahar, FST, Saida, Algérie.

2 Université Djillali Liabes, FSI, Sidi Bel Abbès, Algérie.

3 Université Aboubakr Belkaid, FSI, Tlemcen, Algérie.

4 Université de Savoie, France.

\*sek\_abd@yahoo.fr

---

*RÉSUMÉ.* La présente communication s'intéresse au domaine de modélisation physique du phénomène de poussée et de butée des terres et des mécanismes de rupture qui y sont liés. En réalité, les conditions aux limites d'un milieu sollicité influent beaucoup sur le comportement global du milieu. En d'autres termes, la réponse d'un milieu est fonction du mode de sollicitation. La conception par nos soins d'un modèle réduit a permis la réalisation des essais de poussée et de butée en déplaçant la paroi mobile du dispositif vers, respectivement, l'extérieur et l'intérieur du massif. L'évolution des bandes de cisaillement lors des essais sera discutée en fonction du mode de déplacement de la paroi mobile de manière continue et discontinue. Ces dernières sont analysées par la technique de corrélation d'images en mettant en évidence les localisations des déformations.

*ABSTRACT.* This communication illustrates the physical modelling of the mechanisms of failure resulting by the phenomena of thrust and passive resistance. Actually, the conditions to the limits of a middle solicited influential a lot on the global behavior of the middle. In other words, the answer of a middle is function of the mode of sollicitation. The conception by our care of a scale model permitted the realization of the tests of thrust and passive resistance while displacing the mobile partition of the device toward, respectively These last are analyzed by the technique of interrelationship of pictures while putting in evidence the localizations of the distortions.

*MOTS-CLÉS :* modèle réduit, poussée, butée, corrélation d'images, déformation plane, localisation de la déformation.

*KEYWORDS:* scale model, thrust, passive resistance, interrelationship of pictures, fields, plane distortion, localization of the distortion.

---

## 1 Introduction

La compréhension du comportement des sols est le souci permanent des géotechniciens à cause de sa complexité, déjà dans sa composition et dans son hétérogénéité, et des réponses diverses qu'il peut produire lors des sollicitations très variées. L'un des objectifs majeurs de la mécanique des sols est d'étudier le comportement du massif de sol vis-à-vis des différents modes de sollicitations et de vérifier que sa stabilité reste assurée (Philliponnat *et al.*, 2002). Les lois de comportement établies pour des milieux homogènes rendent compte d'une relation entre un état de contrainte homogène et un état de déformation tout aussi homogène. En réalité, les conditions aux limites d'un milieu sollicité influent beaucoup sur le comportement global du milieu. Les codes de calcul se révèlent forts intéressants pour apprécier la réponse localisée du matériau.

Notre démarche se situe donc à étudier l'influence du mode de déplacement sur la rupture des sols par bandes de cisaillement en poussée et butée par la technique de corrélation d'images.

La discussion sera autour du mode de sollicitation c'est-à-dire celui du déplacement de la paroi mobile de manière continue et discontinue et son incidence sur l'évolution des bandes de cisaillement modélisant ainsi deux phénomènes bien connus : poussée et butée des terres.

## 2 Mise au point de la procédure expérimentale

La mise en évidence des phénomènes de poussée et de butée ne pouvait être concrétisée que par une étude expérimentale appropriée. Si une des hypothèses des théories des états d'équilibre limite est celle d'un milieu bidimensionnel, cette hypothèse ne peut être ignorée lors de tout travail expérimental. Heureusement, Les techniques de corrélations d'images (logiciel Kisdef-7D), très en vogue à l'heure actuelle, peuvent évidemment servir à la visualisation qualitative et surtout la quantification de l'évolution des champs de déplacement et ceux des déformations des objets plans qui resteront plans après un processus de transformation. Le principe de la méthode consiste à comparer deux images numériques. Un premier enregistrement de la surface de l'échantillon est pris avant déformation, alors qu'un deuxième est pris après déformation (Vacher *et al.*, 1999).

La conception par nos soins d'un modèle réduit peut traduire au mieux une réalité physique qui reste néanmoins très complexe. Il s'agit donc d'étudier un phénomène physique sur une reproduction dimensionnelle réduite en modèle réduit (Darve, 1987).

En effet, reproduire, observer, quantifier et finalement suivre cinématiquement l'évolution de ces mécanismes de rupture sur un modèle réduit (en ignorant tout état de contrainte), est notre but ultime en mettant en œuvre l'interaction de deux aspects maîtrisés :

1- Un modèle réduit physique plan (même simpliste) simulant des états de poussées et butées.

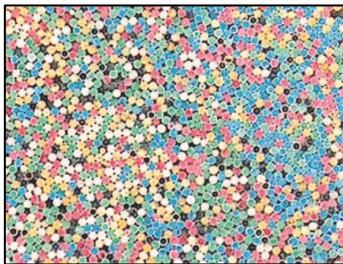
2- Un post traitement d'images (fort représentantes de la réalité à l'échelle du modèle réduit) par l'intermédiaire des outils informatiques ingénieux basé sur des corrélations d'images (Kisdef-7D).

La mise en évidence de ces phénomènes de ruptures au laboratoire ne peut être qu'initiatrice à d'autres essais plus « raffinés » se rapprochant un peu plus de la réalité.

### **2.1 Modélisation d'un milieu granulaire**

Le milieu granulaire étudié est représenté par un entassement des pailles légères (Dix huit mille paille) (Figure.1) découpées soigneusement présentant les caractéristiques suivantes :

- Milieu peu pesant, son poids volumique est de l'ordre de  $4,5 \text{ kN/m}^3$  à vide sans les bouchons constitués de « pâtes à modeler » auquel cas  $\gamma_d$  est d'environ  $9 \text{ kN/m}^3$ ;
- Pailles indéformables au vu des actions appliquées simulant ainsi des grains incompressibles. Les pailles initialement cylindriques restent cylindriques après transformation ;
- Leur empilement confère au milieu un état de densité forte ;
- La longueur et le diamètre sont respectivement  $(70 \times 2)$  en mm;
- Leurs deux extrémités sont obstruées par la pâte à modeler ;
- L'indice des vides minimal est  $e = V_v/V_s = 0.103$ .



**Figure 1.** *Disposition des pailles*

Les pailles évidées présentent dans notre cas une porosité « intrinsèque » qui n'est pas tenu en compte dans notre estimation. Ceci est justifié par l'hypothèse d'incompressibilité des pailles par rapport aux sollicitations mises en œuvre.

## 2.2 Conception d'un modèle réduit

La mise en évidence expérimentale des mécanismes de rupture dans les sols granulaires soumis à l'expansion (poussée) ou au raccourcissement (butée) nous a amené à concevoir un modèle réduit bidimensionnel permettant la réalisation des essais de poussée et de butée.

Après réflexion, nous avons adopté des dimensions du dispositif (800x500x100) mm. Ainsi, un déplacement de mur (500 mm de haut avec un milieu d'environ 350 mm) de quelques centimètres est relativement faible par rapport à la longueur du milieu de 600 mm (dispositif de 800 mm) justifie un milieu semi-infini. En effet, les lignes de glissement lorsqu'elles se propagent ne sont pas bloquées par l'autre paroi latérale.

L'épaisseur de 100 mm est suffisante pour permettre le remplissage dans les meilleures conditions de stabilité afin d'éviter d'éventuels déversements des pailles de 70 mm de longueur.

Une règle graduée est collée sur le châssis au dessous de la paroi mobile pour estimer le déplacement de cette dernière. La figure 2 illustre le dispositif expérimental de poussée butée remplie avec dix huit milles paille environ. Notons que toutefois, il est possible de perfectionner le modèle en ajoutant des verres à haute résistance à indice de réfraction unitaire. Des milieux réellement granulaires pourront être étudiés. Le déplacement sera certainement mieux contrôlé si l'on prévoit un moteur électromécanique relié à la paroi mobile pour l'avancée et le recul de cette dernière.



**Figure. 2** Dispositif expérimental de poussée – butée (Réf : 01-DPB-040404)

### **2.3 Techniques de prise des photos**

Une photo bien prise révèle une réalité certaine d'un objet en général. Dans notre cas, les prises de vue du milieu à étudier sont primordiales car leur comparaison en couple devra refléter la cinématique réelle de la transformation engendrée par le processus de sollicitation de ce milieu. Un appareil photo numérique de haute résolution de type HP 945 (à 5 Méga pixels avec zoom optique x8), a été utilisé pour les prises de photos.

En outre la présence du trépied est très utile pour stabiliser l'appareil sans risque d'éventuelles perturbations. Toutes les prises de vue assurent une perpendicularité entre l'axe de vue et le plan objet.

## **3 Mécanismes de ruptures**

Un programme expérimental a été élaboré afin de mettre en évidence les mécanismes de rupture liés aux problèmes de poussée et de butée.

NOTE.—Le pas entre deux prises équivaut à un déplacement de la paroi exprimé en nombre de tours de la manivelle (01 tour correspond à un déplacement de 24 pixels soit 06 mm).

Nous avons étudié l'influence des paramètres suivants sur les modes de rupture et leur évolution dans les deux cas (poussée et butée).

-Déplacement du mur continu et discontinu. Nous entendons par ces deux qualificatifs un déplacement à vitesse constante lente respectivement sans et avec interruption dans le temps pendant la durée de l'essai.

-Pour chacun des modes de déplacement du mur dans chaque cas de sollicitation (poussée et butée) les essais sont répétés en prenant des photos à des pas différents (voir plus haut définition du pas).

- Un (1) tour ;
- Un quart (1/4) de tour ;
- Un huitième (1/8) de tour ;

### **3.1 Poussée**

Deux essais à grand déplacement (à un tour d'intervalle) ont été effectués pour suivre l'évolution de la cinématique liée au phénomène de la poussée. Ils sont répartis comme suit :

## Influence du mode de déplacement sur la rupture des sols par poussée et a butée

- Essai à déplacement continu avec prise de photos à Un (1) tour ;
- Essai à déplacement discontinu avec prise de photo à Un (1) tour ;

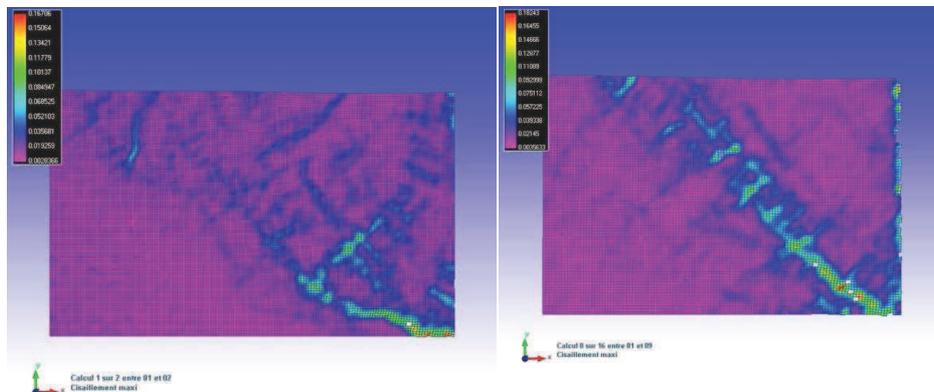
La réalisation des essais dits continus et discontinus veut répondre aux questions suivantes :

Lors des essais discontinus, l'arrêt du mouvement de mur dans son déplacement confère au milieu un nouvel état stable en équilibre. A la reprise du déplacement du mur, est ce qu'on observera un mouvement relatif des mêmes particules initialement sollicitées ?

L'apparition d'une bande de cisaillement sera dictée macroscopiquement par les conditions aux limites de géométrie du milieu notamment. Dans les deux cas d'essai, l'on devrait voir pratiquement la même chose, qu'en est-il d'un examen fin de cette localisation de déformation ?

### 3.1.1 Comparaison de résultats entre essai à grand déplacement continu et discontinu

Nous allons comparer un essai à déplacement continu réalisé à un tour d'intervalle entre (1-2) avec celui réalisé à même déplacement mais discontinu à un huitième de tour d'intervalle c'est-à-dire entre (1-9). Les figures suivantes illustrent le cas ci-dessous :



(a)-Cisaillement max entre (1-2) à déplacement continu de 24 pixels (b)- Cisaillement max entre (1-9) à déplacement discontinu de 8 pas de 3 pixels chacun

**Figure. 3** Cisaillement maximum (en pixels)

### 3.1.2 *Discussion*

A la question précédemment posée concernant l'analyse fine des localisations de déformation dans le cas des essais à grand déplacement du mur continu et discontinu. La figure 3 compare le cisaillement entre deux états de déplacement du mur équivalent de l'ordre de 24 pixels (1 tour). Le premier essai continu, l'autre essai atteint les 24 pixels en 8 étapes de sollicitation. Il est intéressant de voir la relative homogénéité du bloc soumis au cisaillement dans le cas du déplacement discontinu. A vrai dire cela va à l'encontre de nos prévisions au sens que nous pensions que dans le cas du déplacement discontinu, une stabilisation momentanée du milieu lui confère un état d'équilibre et qu'à la reprise du déplacement du mur d'autres pailles (différentes des premières) bougeront relativement différemment arrivant à la fin du processus à une configuration déformée trop hétérogène.

Une explication peut être avancée après réflexion.

Lorsqu'on sollicite un milieu en poussée on amorce nécessairement une localisation de déformation pour une bande de cisaillement. Le phénomène de dilatance au sein de cette dernière est inévitable. La répartition de la densité n'est plus alors homogène (plus faible dans la bande de cisaillement). Lorsqu'on continue à solliciter le milieu en poussée, c'est comme si on part d'une configuration initiale avec une répartition de densité hétérogène, donc on favorise le glissement dans la zone à faible densité. Si on réitère le procédé, la localisation de la déformation s'installera de plus en plus dans la région en question.

En revanche lors d'une sollicitation continue du milieu en poussée équivalente à une somme de sollicitations discontinues, la « propagation » des bandes de cisaillement suit une logique de diffusion laissant apparaître des multi mécanismes de rupture.

### 3.2 *Butée*

Deux essais à grand déplacement (à un tour d'intervalle) ont été effectués pour suivre l'évolution de la cinématique liée au phénomène de la butée. Ils sont répartis comme suit :

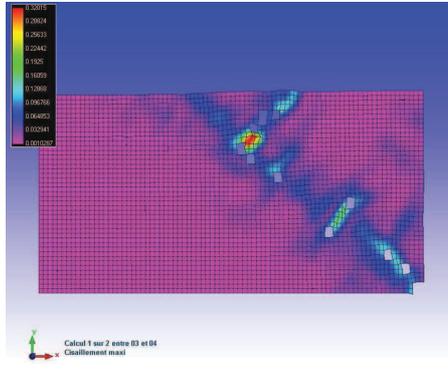
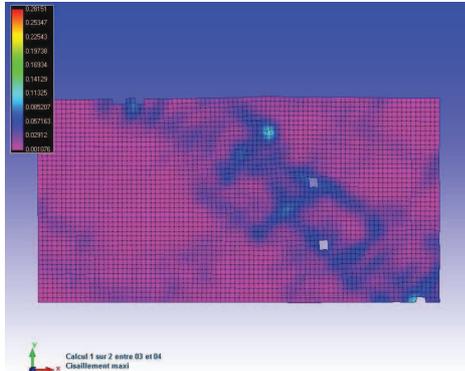
- Essai à déplacement continu avec prise de photos à Un (1) tour ;
- Essai à déplacement discontinu avec prise de photo à Un (1) tour ;

Nous nous limiterons à la présentation des résultats en cisaillement maximum en comparant le cas du déplacement continu et discontinu.

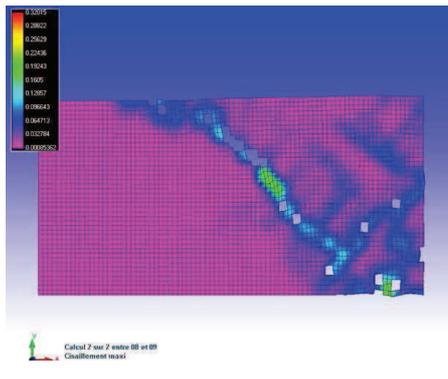
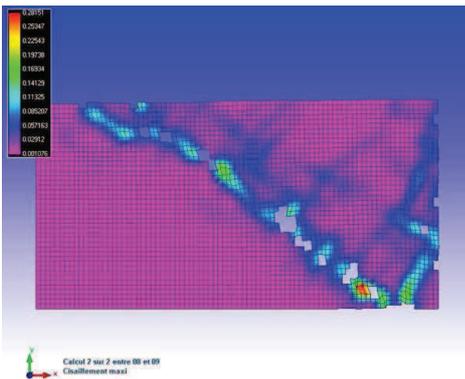
Influence du mode de déplacement sur la rupture des sols par poussée et a butée

(a)

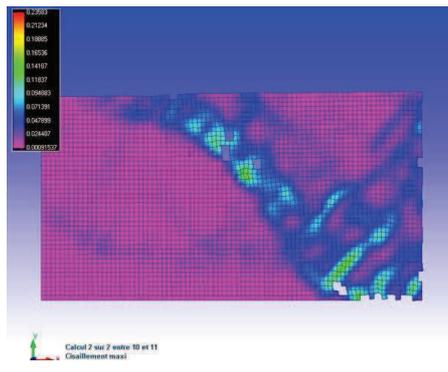
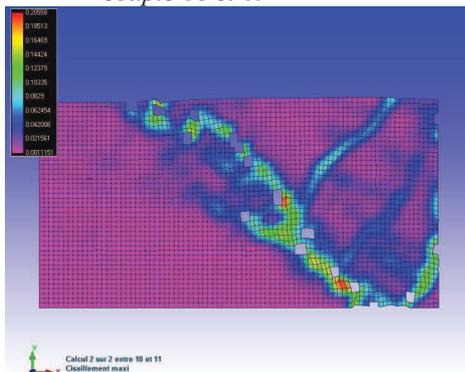
(b)



*couple 03 et 04*



*couple 08 et 09*



*couple 10 et 11*

**Figure. 4** Comparaison entre même essais de butée  
 (a): déplacement continu      (b) : déplacement discontinu

Comme dans l'essai de poussée, le phénomène de la localisation de la déformation apparaît dans les deux cas de figure de manière différente sachant qu'il s'agit là des mêmes incréments de sollicitations à la différence du mode de déplacement du mur (continu et discontinu).

Dans le mode continu, la diffusion des bandes de cisaillement prend place et perturbe considérablement le milieu. En revanche en mode discontinu l'amorce de la bande de cisaillement semble être favorisée, à chaque reprise du déplacement du mur, par la dilatance de la région soumise à l'incrément précédent à un glissement.

Le cantonnement, dans une région bien déterminée, de la bande de cisaillement principale avec quelques branches localisées du début de l'essai jusqu'à la fin est spectaculaire traduisant un mécanisme de rupture tout à fait différent que dans le cas de l'essai à déplacement continu du mur.

#### **4 Conclusion**

La réalisation d'un modèle réduit simulant un milieu granulaire soumis à des sollicitations en poussée et en butée a permis d'exploiter l'évolution des localisations des déformations souvent par bandes de cisaillement ;

Nous insistons sur l'aspect cinématique de notre étude. En effet, à aucun moment des forces ou des contraintes ne sont mesurées auquel cas il sera judicieux d'examiner les états d'équilibre limite. D'ailleurs, nous pensons que lors de nos essais, les états d'équilibre limite sont atteints relativement tôt lors des essais (dès les premiers incréments) ;

Un phénomène original a été mis en évidence. Il s'agit du cantonnement de la localisation de déformation dans la direction originelle de la bande de cisaillement lors de la sollicitation du milieu dans les essais dits discontinus. Il semble que la reprise de la sollicitation après son arrêt favorise l'amorce nouvelle d'une bande de cisaillement dans la région la moins dense du milieu donc celle affecté par la dilatance. Or cette région est justement celle qui a vu naître une localisation de déformation lors du dernier incrément. En revanche, dans les essais continus à même amplitude de sollicitation que ceux discontinus, ce phénomène n'apparaît pas. Au contraire un mécanisme de rupture par diffusion de bande de cisaillement et une forte perturbation du milieu est observé. Bien entendu, ces modes de ruptures sont mis clairement en évidence aussi bien en poussée qu'en butée. La visualisation de ce phénomène est spectaculaire et mérite une attention particulière et une mure réflexion ;

Il nous semble qu'à présent et après cette mise au point d'une procédure d'essai expérimental, il serait souhaitable de faire d'autres études afin de « rentabiliser » notre système. Nous pensons notamment aux points suivants :

Concernant le milieu étudié :

Influence du mode de déplacement sur la rupture des sols par poussée et a butée

- Alourdir le matériau pour simuler un milieu réellement pesant ;
- Conférer au matériau une cohésion par l'ajout d'une graisse par exemple ;
- Rendre le milieu plus frottant en marinant les pailles dans une poudre colleuse ;
- Travailler sur un matériau réel (sol).

Concernant les conditions aux limites :

-La rugosité du parement du mur de soutènement peut influencer éventuellement les mécanismes de rupture. Il suffit de coller du papier abrasif de différentes rugosités pour faire une étude paramétrique ;

-La hauteur du milieu, l'inclinaison de la surface libre et la surcharge du milieu sont des paramètres à étudier. Leur influence sur la localisation de la déformation peut être aisément mise en évidence en tout cas à l'échelle du modèle réduit.

## 5 Références bibliographiques

Darve F., « Manuel de rhéologie des géomatériaux », *Edition de l'association Amicale des Ingénieurs Anciens Elèves de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées*, 1987.

Philipponnat G & Hubert B., *Fondations et ouvrages en terres*- Editions Eyrolles, 2002.

Vacher P, Dumoulin S, Morestin F, Mguil-Touchal S., « Bidimensional strain measurement using digital images », *Proc Instn Mech Engrs Vol 213 Part C IMechE*, pp811-817, 1999.