

INFLUENCE DE L'ESPACEMENT DESECRANS D'EXCAVATION PROFONDE SUR LA BUTEE DES TERRES

IBTISSAM KHATER, NAIMA BENMEBAREK

Laboratoire MN2I2S, Université de Biskra, BP 145, 07000, Algérie

RESUME

Cet article s'intéresse à l'effet de l'espacement des écrans d'excavations profondes sur les pressions latérales passives de terre agissant sur les écrans retenant l'excavation dans un sol frottant. Le calcul des coefficients de pression passive de terre pour des matériaux associés et non associés a été effectué à l'aide du code FLAC en différences finies explicites. Les résultats obtenus indiquent que lorsque la largeur de l'excavation est inférieure à la zone passive, les deux écrans de soutènement interagissent selon le rapport de la profondeur de pénétration de la fiche et la largeur de l'excavation. Un bon accord est observé entre les résultats de calcul et ceux utilisant l'analyse de l'équilibre limite pour des excavations à double parements à grande largeur. Les résultats montrent que la diminution de la largeur de l'excavation de plus de 0,5 fois la profondeur de la fiche d'excavation induit une augmentation de la pression passive de terre. Cette augmentation est plus prononcée pour les murs rugueux. Il est également montré que l'angle de dilatance influe sur la pression de terre passive pour les grandes valeurs de l'angle de frottement interne du sol.

MOTS CLES: Butée ; Modélisation numérique ; Sol frottant ; Ecran ; Interaction; Flac.

ABSTRACT

This paper deals with the effect of deep excavation width on the lateral passive earth pressures acting on retained walls excavation in cohesionless soil. The computation of the passive earth pressure is performed using the explicit finite difference method implemented in FLAC code. The available passive earth pressure coefficients are given for both associative and non-associative material. The results indicate that when the width of the excavation is less than passive zone the two retaining walls interact with each other at penetration depth. Good agreement is observed between the present results and those using limit equilibrium and limit analysis for large double cofferdam. However, the results show that the decrease of double cofferdam width more than 0.5 the excavation depth induces an increase in the passive earth pressure. The increase of passive earth pressure is more pronounced for rough walls. It is also shown that the dilation angle influences the passive earth pressure for large internal friction angle values.

KEYWORDS: Stilling basin, jump compactness, abrupt enlargement, Froude number, hydraulic jump.

1 INTRODUCTION

Le développement urbain nécessite souvent la construction de fouilles profondes. Celles-ci pourraient être pour les sous-sols profonds, les tunnels de couverture, les parkings souterrains ou les systèmes de transport souterrains. Les pressions de terre passive et active, agissant contre les structures de soutènements profondes jouent un rôle important dans la conception des écrans de soutènement et sont souvent fonction de nombreux paramètres.

Le problème des pressions de terre a d'abord été étudié par Coulomb. Sa théorie est basée sur le concept d'une surface de rupture plane développée dans les remblais à partir du fond du mur, et la force de terre latérale contre la paroi est déterminée par l'équilibre des forces sur le coin de glissement entre le plan de rupture et la face arrière du mur de soutènement.

Cette théorie est plus polyvalente pour accommoder des configurations complexes de remblais et de conditions de chargement ainsi que des effets de frottement entre les murs et les remblais. Cependant, des études théoriques et expérimentales ont montré que l'hypothèse de Coulomb de glissement de surface plane n'est pas parfaitement valide lorsque la paroi est rugueuse, surtout dans le cas passif où le frottement de l'interface est supérieur à 1/3 du frottement interne du sol. Par conséquent, la théorie de Coulomb conduit à une surestimation de la pression passive de la terre. La courbure de la surface qui glisse derrière le mur doit être prise en compte. Ce problème a été largement étudié dans la littérature depuis Coulomb. Il y a plus de 60 ans, plusieurs chercheurs ont effectué des travaux expérimentaux, analytiques et numériques sur les problèmes de pression de terre. Les plus couramment utilisés dans l'analyse des problèmes géotechniques traitaient des procédures théoriques d'évaluation de la

pression de terre à l'aide de la méthode d'équilibre limite (Shields et Tolunay 1973; Rahardjo et Fredlund 1984), de la méthode des lignes de glissement (Caquot et Kérisel 1948; Sokolovski 1965; Graham 1971) et des bornes supérieures et inférieures (Lysmer 1970; Chen et Liu 1990; Soubra 2000). Ces différentes approches confirment généralement la précision de la théorie Log Spiral (Chen et Liu 1990) pour une large gamme de valeurs du frottement interne du sol et de l'angle de frottement de l'interface sol-structure. De même, Benmebarek et al. (2006) qui ont utilisé l'analyse numérique FLAC2D pour évaluer les pressions passives de terre ont trouvé un accord assez proche avec la théorie Log Spiral. Malgré les méthodes publiées récemment, la tendance actuelle est d'utiliser les valeurs données par Caquot et Kérisel (1948) et Kérisel et Absi (1990).

Le développement des logiciels et des méthodes numériques permet d'étudier le comportement de la paroi et de la masse du sol retenu en tenant compte de leurs déformations et interactions. Potts et Fourie (1986) et Benmebarek et al. (2016) ont utilisé des analyses numériques pour étudier l'effet du mode du mouvement de la paroi sur la génération de la pression des terres. Benmebarek et al. (2005) ont réalisé des analyses numériques FLAC2D pour estimer la réduction des pressions de terre passive et l'augmentation des pressions de terre active en présence de gradients hydrauliques.

Le problème des pressions de terre passive et active agissant sur des murs de soutènement rigides a été largement traité dans la littérature en utilisant différentes approches. Cependant, l'effet de la largeur d'excavation sur les pressions latérales passives n'a pas été étudié.

Dans cet article, à l'aide du code FLAC, une investigation numérique a été effectuée afin d'évaluer l'influence de la largeur de la fouille et la profondeur de la fiche des écrans sur la pression passive du sol. Les coefficients de pression passive de terre sont évalués pour des écrans rugueux et lisses et pour des matériaux associés et non-associés. Les résultats numériques sont discutés et comparés aux résultats existants publiés dans la littérature.

2 PROCÉDURE DE MODÉLISATION

2.1 Présentation du cas étudié

Le cas étudié consiste à analyser une excavation à double écrans avec une largeur B et encastrés avec une fiche f dans un sol homogène comme indiqué sur la Fig. 1. On s'intéresse à l'analyse numérique de l'influence du rapport entre la fiche f de l'écran et la largeur de la fouille B sur le coefficient de pression passive des terres lorsque les deux fiches interagissent entre eux.

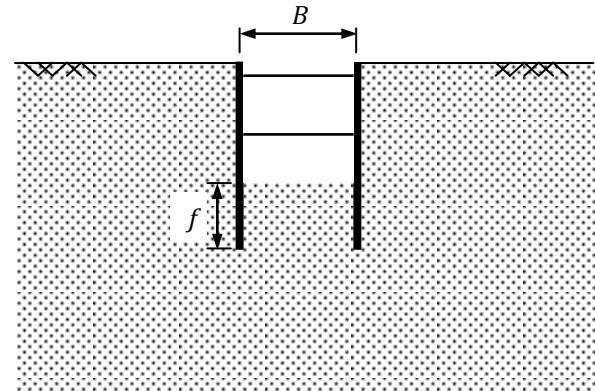


Figure 01: Cas étudié

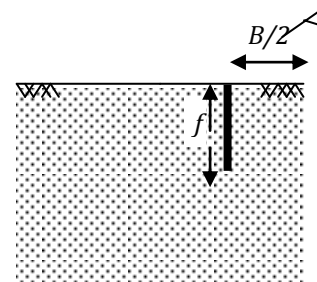


Figure 02: Cas étudié simplifié

A cause de la symétrie de la fouille, uniquement la moitié du modèle est considérée dans le calcul. En plus, étant donné qu'on est concerné uniquement par la butée devant la fiche, la géométrie du modèle est encore simplifiée comme indiquée sur la figure 2 sans incidence sur la précision du calcul numérique des coefficients de pression des terres passives.

La Figure 3 montre le maillage et les conditions aux limites retenus pour la simulation de la butée. Ce maillage est raffiné au voisinage de l'écran. Le déplacement des frontières verticales est bloqué dans la direction horizontale et le déplacement de la base du modèle est bloqué dans les deux directions horizontale et verticale. L'écran est modélisé par des éléments poutres connectés au sol via des éléments d'interface incorporés dans le code FLAC pour simuler le contact sol/écran sur les deux faces de l'écran. L'interface est caractérisée par un angle de frottement δ , une cohésion $c = 0$ kPa, une raideur normale $K_n = 109$ Pa/m et une raideur au cisaillement $K_s = 109$ Pa/m. Ces valeurs sont choisies de manière à simuler un contact rigide entre le sol et l'écran.

Le sol a été considéré comme un matériau élastique parfaitement plastique, obéissant au critère de Mohr-Coulomb encodé dans FLAC avec la règle d'écoulement non associative.

Les caractéristiques physiques et mécaniques utilisées dans la présente étude sont : un module de cisaillement $G = 10$ MPa, un module volumique d'élasticité $K = 20$ MPa, un poids volumique du sol $\gamma = 20$ KN/m³, une série de six valeurs représentant l'angle de frottement interne du

sol, $\varphi = 20^\circ$ à 40° avec un incrément de 5° , et pour chaque valeur de φ , une série de quatre valeurs de l'angle de l'interface ($\delta/\varphi = 0, 1/2, 2/3, 1$) et une série de trois valeurs de l'angle de dilataance du sol sont considérées ($\psi = \varphi, \psi = 1/2\varphi, \psi = 0$).

Afin de développer un schéma d'analyse acceptable pour les calculs ultérieurs, des simulations préliminaires ont été réalisées en testant la sensibilité des forces de pression passive des terres aux dimensions du maillage, à la finesse du maillage, aux conditions aux limites et au coefficient de pression des terres au repos K_0 .

2.2 Procédure de simulation

La procédure de simulation de la butée du terrain adoptée dans la présente analyse est basée sur les deux étapes suivantes :

- Un calcul de l'état de contrainte initiale: L'effet de l'installation de l'écran dans le sol sur les contraintes est négligé et l'état des contraintes initiales est initié avec un coefficient de pression des terres au repos $K_0=0.5$.
- Un calcul de la butée du terrain sur l'écran: Pour évaluer la butée du sol sous l'effet d'une translation de mouvement de l'écran vers le sol, une vitesse horizontale contrôlée est appliquée en plusieurs étapes à tous les nœuds des éléments qui discrétisent l'écran. Tout d'abord, une vitesse relativement élevée de 10-6 m / pas est appliquée à l'écran jusqu'à ce qu'un état d'écoulement plastique constant soit atteint. En utilisant une fonction FISH, la force de butée agissant sur l'écran peut être calculée par l'intégrale des composantes de contrainte horizontales sur tous les éléments en contact avec l'écran. Comme le niveau d'erreur dans un tel schéma de calcul FLAC dépend de la

vitesse appliquée, une force de butée plus précise peut être obtenue en réduisant la vitesse de l'écran de moitié et en continuant jusqu'à un nouvel état d'écoulement plastique constant. Cette procédure, recommandée par le manuel FLAC, est répétée plusieurs fois, en particulier pour les sols présentant de fortes valeurs de frottement interne, jusqu'à ce que la différence entre les forces de butée calculées à deux états successifs d'écoulement plastique constant soit négligeable. La valeur limite asymptotique correspond à la force de butée maximale de la terre qui pourrait être mobilisée.

Ainsi, le coefficient de butée est exprimé par :

$$K_p = 2P/\gamma'f^2 = 2P_x/\gamma'f^2 \cos\delta \quad (1)$$

Avec:

P: Résultante de la butée du terrain;

P_x: Résultante des contraintes normales sur l'écran;

γ' : poids déjaugé du sol;

f : fiche de l'écran;

δ : angle de frottement de l'interface.

3 VALIDATION DE LA PROCÉDURE DE SIMULATION

Cette procédure de modélisation numérique a d'abord été validée pour le problème de butée dans le cas d'un seul écran. Le tableau 1 montre une comparaison des présents résultats pour $\psi = \varphi$ avec ceux de Caquot & Kérisel (1948), Soubra (2000) et Soubra & Macuh (2002) quand $\delta/\varphi = 1$.

Tableau 01 : Comparaison du présent coefficient de butée K_p avec les solutions existantes

φ (°)	Présente solution $\psi = \varphi$	CAQUOT et KERISEL (1948)	SOUBRA (2000)	SOUBRA et MACUH (2002)
20	3.01	3.10	3.12	3.13
30	6.33	6.5	6.86	6.93
35	10.10	10.5	11.13	11.3
40	17.95*	18	19.62	20.01

* $\psi = 0.9\varphi$

Les résultats de la présente simulation sont très proches à ceux de Caquot et Kerisel ainsi qu'à ceux de la borne supérieure obtenus par Soubra (2000) utilisant un mécanisme transationnel de rupture et Soubra et Macuh (2002) utilisant un mécanisme rotationnel.

On note que des instabilités numériques sont observées pour les sables très dense et totalement dilatant $\varphi = \psi = 40^\circ, 45^\circ$. L'utilisation d'une valeur de ψ légèrement inférieur à φ (ex. $\psi = 0.9\varphi$) permet d'éviter ces instabilités.

4 PRÉSENTATION ET DISCUSSION DES RESULTATS

Des expérimentations numériques ont été effectuées afin d'étudier l'effet de l'espacement des écrans sur la variation du coefficient de butée des terres et sa sensibilité à l'angle de frottement φ , à l'angle de l'interface δ et à l'angle de dilataance ψ .

Afin de couvrir les fouilles large et étroite, 12 rapports de fiche de l'écran sur largeur de fouille ($f/B=0.05-2$) ainsi qu'un écran isolé ont été testés. Pour chaque rapport f/B , la pression passive des terres est calculée pour quatre valeurs de l'angle de l'interface $\delta/\varphi = 0, 1/2, 2/3, 1$ et trois angles

de dilatace du sol $\psi/\phi = 0, 1/2, 1$.

Les résultats de simulations numériques sont regroupés dans les tableaux 2, 3 et 4.

Tableau 02: Les coefficients de K_p pour un angle de dilatace $\psi/\phi=0$.

ϕ	20°				25°				30°				35°			
	δ/ϕ		1		δ/ϕ		1		δ/ϕ		1		δ/ϕ		1	
	0	1/3	2/3	1	0	1/3	2/3	1	0	1/3	2/3	1	0	1/3	2/3	1
f/B	K_p				K_p				K_p				K_p			
$\cong 0$	2.05	2.38	2.72	3.04	2.44	3.03	3.66	4.06	2.98	3.98	4.92	5.61	3.54	5.10	6.91	8.22
0.05	2.05	2.38	2.72	3.04	2.44	3.03	3.66	4.06	2.98	3.98	4.92	5.61	3.57	5.13	6.91	8.22
0.10	2.05	2.38	2.72	3.04	2.44	3.03	3.66	4.06	2.98	3.98	4.92	5.62	3.57	5.16	6.91	8.26
0.15	2.05	2.38	2.72	3.04	2.44	3.03	3.66	4.06	2.98	3.98	4.92	5.62	3.57	5.20	6.92	8.30
0.20	2.05	2.38	2.72	3.04	2.44	3.03	3.66	4.06	2.98	3.98	4.92	5.62	3.57	5.24	6.92	8.34
0.25	2.05	2.38	2.72	3.04	2.44	3.03	3.66	4.07	2.98	3.98	4.92	5.63	3.57	5.25	6.94	8.36
0.50	2.05	2.39	2.73	3.04	2.45	3.05	3.70	4.14	2.98	3.98	5.15	5.83	3.57	5.30	7.08	8.69
0.75	2.05	2.41	2.79	3.09	2.45	3.12	3.91	4.52	2.98	4.17	5.82	7.12	3.61	5.86	9.45	12.39
1.00	2.05	2.48	2.97	3.37	2.45	3.30	4.37	5.25	2.98	4.57	6.98	9.08	3.63	6.76	12.94	18.42
1.25	2.05	2.58	3.20	3.75	2.46	3.50	4.96	6.26	2.99	5.02	8.67	12.18	3.65	7.84	18.13	29.75
1.50	2.05	2.68	3.48	4.23	2.46	3.73	5.68	7.68	2.99	5.56	10.89	17.13	3.65	9.27	26.81	47.97
1.75	2.05	2.79	3.79	4.84	2.47	3.99	6.49	9.66	2.99	6.21	14.01	20.99	3.67	11.05	37.12	66.99
2.00	2.05	2.91	4.16	5.57	2.47	4.28	7.73	11.94	3.00	6.96	18.19	29.69	3.67	13.27	56.47	77.07

Tableau 03 : Les coefficients de k_p pour un angle de dilatace $\psi/\phi=1/2$

ϕ	20°				25°				30°				35°			
	δ/ϕ		1		δ/ϕ		1		δ/ϕ		1		δ/ϕ		1	
	0	1/3	2/3	1	0	1/3	2/3	1	0	1/3	2/3	1	0	1/3	2/3	1
f/B	K_p				K_p				K_p				K_p			
$\cong 0$	2.07	2.39	2.72	3.01	2.48	3.08	3.71	4.25	3.04	4.03	5.17	6.33	3.75	5.41	7.58	10.02
0.05	2.07	2.39	2.73	3.01	2.48	3.08	3.71	4.25	3.04	4.03	5.17	6.33	3.75	5.41	7.58	10.02
0.10	2.07	2.39	2.74	3.01	2.48	3.08	3.72	4.26	3.04	4.03	5.20	6.33	3.75	5.42	7.59	10.04
0.15	2.07	2.39	2.74	3.01	2.48	3.08	3.72	4.26	3.04	4.03	5.22	6.35	3.75	5.42	7.60	10.06
0.20	2.07	2.39	2.74	3.02	2.48	3.08	3.73	4.27	3.03	4.03	5.23	6.36	3.75	5.42	7.63	10.08
0.25	2.07	2.39	2.74	3.02	2.48	3.08	3.73	4.28	3.03	4.03	5.23	6.36	3.75	5.43	7.68	10.11
0.50	2.07	2.39	2.75	3.03	2.49	3.08	3.74	4.30	3.04	4.04	5.31	6.53	3.75	4.49	8.08	10.84
0.75	2.07	2.42	2.81	3.16	2.49	3.16	3.97	4.71	3.04	4.27	6.01	7.77	3.75	6.11	10.14	14.90
1.00	2.07	2.50	3.00	3.45	2.49	3.34	4.44	5.52	3.05	4.67	7.24	10.12	3.75	7.02	13.79	23.08
1.25	2.07	2.59	3.23	3.85	2.49	3.54	5.03	6.64	3.05	5.13	8.92	13.85	3.75	8.14	19.41	38.30
1.50	2.08	2.69	3.50	4.34	2.49	3.77	5.77	8.22	3.05	5.57	11.20	19.66	3.75	9.58	28.45	67.30
1.75	2.08	2.80	3.82	4.97	2.49	4.03	6.69	10.35	3.05	6.32	14.33	28.77	3.75	11.36	42.98	99.07
2.00	2.08	2.92	4.19	5.73	2.49	4.32	7.85	13.24	3.05	7.07	18.78	41.10	3.75	13.64	66.43	136.2

Tableau 04: Les coefficients de k_p pour un angle de dilatace $\psi/\phi=1$

ϕ	20°				25°				30°				35°			
	δ/ϕ		1		δ/ϕ		1		δ/ϕ		1		δ/ϕ		1	
	0	1/3	2/3	1	0	1/3	2/3	1	0	1/3	2/3	1	0	1/3	2/3	1
f/B	K_p				K_p				K_p				K_p			
$\cong 0$	2.07	2.39	2.72	3.01	2.46	3.07	3.71	4.26	3.06	4.03	5.20	6.33	3.79	5.42	7.68	10.10
0.05	2.07	2.40	2.73	3.01	2.51	3.07	3.72	4.26	3.06	4.03	5.20	6.33	3.79	5.42	7.69	10.10
0.10	2.07	2.40	2.74	3.02	2.51	3.08	3.73	4.28	3.06	4.04	5.20	6.35	3.79	5.42	7.70	10.10
0.15	2.07	2.40	2.74	3.02	2.51	3.08	3.73	4.29	3.06	4.04	5.21	6.38	3.79	5.42	7.71	10.12
0.20	2.07	2.40	2.74	3.03	2.51	3.08	3.73	4.30	3.06	4.05	5.23	6.40	3.79	5.42	7.72	10.18
0.25	2.07	2.40	2.74	3.03	2.51	3.08	3.73	4.30	3.06	4.07	5.24	6.43	3.79	5.43	7.74	10.26
0.50	2.07	2.40	2.75	3.04	2.51	3.09	3.74	4.35	3.06	4.07	5.31	6.61	3.79	4.53	8.08	11.08
0.75	2.06	2.42	2.81	3.17	2.51	3.16	3.97	4.74	3.06	4.29	6.01	7.86	3.79	6.14	10.16	15.27
1.00	2.06	2.50	3.00	3.46	2.51	3.34	4.44	5.56	3.06	4.68	7.24	10.27	3.79	7.03	13.79	23.68
1.25	2.06	2.59	3.23	3.86	2.50	3.54	5.03	6.71	3.06	5.14	8.92	14.03	3.79	8.14	19.79	39.26
1.50	2.06	2.69	3.50	4.37	2.50	3.77	5.78	8.25	3.06	5.58	11.22	19.81	3.79	9.58	28.45	68.41
1.75	2.06	2.80	3.83	4.99	2.50	4.03	6.71	10.40	3.06	6.33	14.42	29.00	3.79	11.39	42.98	102.9
2.00	2.06	2.92	4.20	5.74	2.50	4.32	7.86	13.30	3.06	7.07	18.80	41.27	3.79	13.65	66.43	143.8

4.1 Influence de l'espacement des écrans

4.1.1 Influence de l'interface sol/écran

Dans la présente étude, l'effet de réduction de l'espacement des écrans de $f/B= 0.05$ à $f/B= 2$ pour $\delta/\phi = 0$ ne dépasse pas 2%. On peut conclure que pour les écrans parfaitement lisses l'effet de la largeur est insignifiant sur le coefficient de butée. Cependant, son effet est fortement prononcé avec l'augmentation de la rugosité de l'écran. La figure 3

visualise l'influence de la réduction de l'espacement entre les écrans sur le coefficient de butée en fonction de différentes valeurs de l'angle de frottement de l'interface sol/écran. La figure 3-a correspondant aux écrans parfaitement lisses ($\delta/\phi = 0$) montre que la réduction de l'espacement entre les écrans n'influe pas pratiquement sur le coefficient de butée. Pour les écrans rugueux, les figures 3-b et 3-c correspondant respectivement à $\delta/\phi = 1/3$ et $2/3$ montrent que le coefficient de butée est indépendant de

l'espacement des écrans quand f/B est inférieur à 0.5. Au-delà de cette valeur, on note un accroissement du coefficient de la butée avec la réduction de l'espacement des

écrans. Cet accroissement s'accroît avec l'augmentation de l'angle de frottement au-delà de 20° .

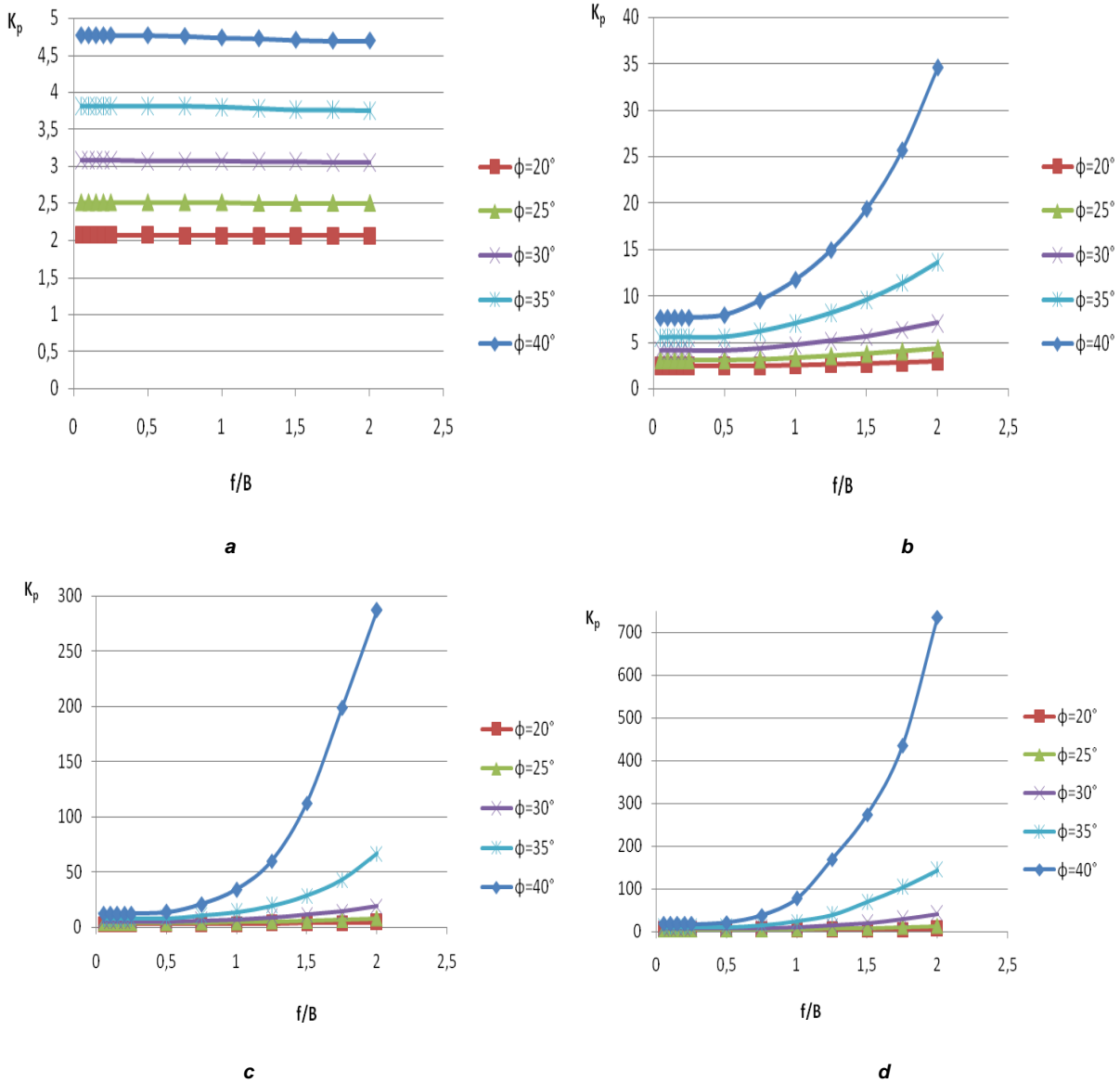


Figure 03: Influence de la rugosité de l'écran sur le coefficient de butée selon l'espacement des écrans

Les figures 4 et 5 présentent la distribution de la pression normale passive des terres le long de l'écran selon l'espacement des écrans pour $\phi=30^\circ$, $\psi =0^\circ$ et respectivement pour un écran parfaitement lisse $\delta/\phi =0$ et pour un écran parfaitement rugueux $\delta/\phi =1$. Pour un écran parfaitement lisse, les diagrammes de la pression passive sont linéaires à part quelques fluctuations sur la partie inférieure de l'écran. Cette distribution est en accord avec les résultats théoriques d'un écran en mouvement de translation.

Pour un écran parfaitement rugueux, les diagrammes de la pression passive sont linéaires quand $f/B < 0.5$. Cependant, au-delà, on note une accentuation parabolique de la pression passive des terres à la moitié inférieure de l'écran avec le rétrécissement de l'espacement entre les écrans (f/B).

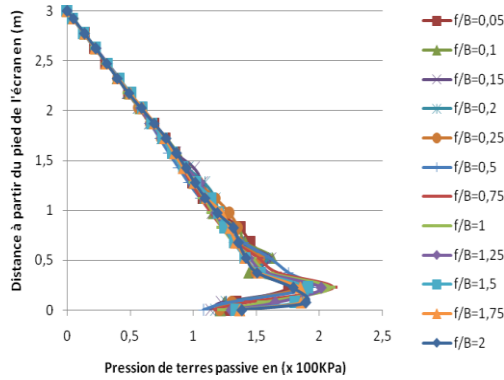


Figure 04: Distribution de la pression effective passive des terres pour différentes largeurs du batardeau pour $\delta/\varphi = 0$, $\varphi = 30^\circ$, $\psi / \varphi = 0$

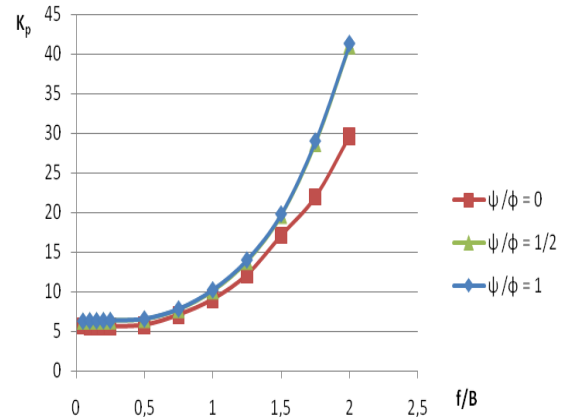


Figure 06: Influence de la dilatance du sol sur le coefficient de butée selon l'espacement des écrans pour $\delta/\varphi = 1$, $\varphi = 30^\circ$

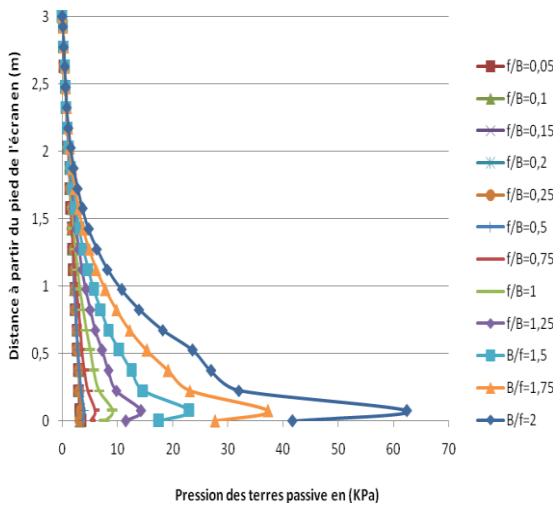


Figure 05: Distribution de la pression effective passive des terres pour différentes largeurs du batardeau pour $\delta/\varphi = 1$, $\varphi = 30^\circ$, $\psi / \varphi = 0$

4.1.2 Influence de l'angle de dilatance

La comparaison des résultats de simulation montre que l'angle de dilatance ψ a un effet remarquable sur le coefficient de butée uniquement pour les sols présentant un fort angle de frottement ($\varphi = 35^\circ, 40^\circ$), alors que son influence est pratiquement négligeable (moins de 3%) pour les angles $\varphi = 20, 25$ et 30° . L'augmentation du coefficient de butée est clairement marquée lorsque la valeur de ψ/φ croît de 0 à 1/2. Au delà de 1/2 l'augmentation semble insignifiante (figure 6). De plus, la comparaison des résultats obtenus, montre que l'effet de la dilatance est accentué avec le rapprochement des écrans et l'augmentation de δ/φ au-delà de 1/3.

5 CONCLUSIONS

Des investigations numériques ont été effectuées à l'aide du code Flac en différence finies explicites sur l'influence de l'espacement des écrans d'excavation profonde sur la butée des terres pour des sols associés et non associés. L'analyse des résultats numériques a permis de conclure les points suivants:

- Si f/B est inférieure à 0,5, les écrans d'une excavation se comporte indépendamment. Ainsi le coefficient de butée peut être estimé par les approches d'un écran seul.
- Pour les écrans lisses, l'effet de l'espacement des écrans peut être négligé sans incidence;
- La rugosité de l'interface sol/écran influe énormément sur le coefficient de butée pour les fouilles étroites dont $f/B > 0.5$. Cette influence est fortement prononcée pour les forts angles de frottement interne du sol. Ainsi, en pratique, il est fortement recommandé d'opter à des écrans fortement frottant;
- l'effet positif de la dilatance est accentué par le rapprochement des écrans fortement frottant ($\delta/\varphi > 1/3$) dans les sols moyen et denses ($\varphi \geq 30^\circ$).

REFERENCES

[1] Posey, C. J., Hsing, P. S. (1938). Hydraulic jump in trapezoidal channel, Engineering News Record. pp. 797-798.

[2] Benmebarek N., H. Labdi & S. Benmebarek (2016) A numerical study of the active earth pressure on a rigid retaining wall for various modes of movements. Springer, Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 53 (1): 39-45.

[3] Benmebarek N., S. Benmebarek & R.Kastner (2005) Numerical studies of seepage failure of sand within a

- cofferdam. Elsevier: Computers and Geotechnics, Vol. 32: 264-273.
- [4] Benmebarek N., S. Benmebarek, R. Kastner & A.-H. Soubra (2006) Passive and active earth pressures in the presence of groundwater flow. *Géotechnique* 56(00): 1–10.
- [5] Caquot, A. & J. Kérisel (1948) Tables de pousse'e et de butée. Paris: Gauthier-Villard.
- [6] Chen W. F. & X. L. Liu (1990) Limit analysis in soil mechanics. Amsterdam: Elsevier.
- [7] Lysmer J. (1970) Limit analysis of plane problems in soil mechanics. *J. Soil Mech. Found. Div. ASCE* 96, No. SM4, 1311–1334
- [8] Graham J. (1971) Calculation of passive pressure in sand. *Can. Geotech. J.* 8(4): 566–579.
- [9] Kérisel, J. & E. Absi (1990) Tables de pousse'e et de butée des terres, 3rd edn. Paris: Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.
- [10] Potts D. M., & A. B. Fourie (1986) A numerical study of the effects of wall deformation on earth pressures. *Int J Numer Anal Meth Geomech* 10(4): 383–405.
- [11] Rahardjo, H. & D. G. Fredlund (1984) General limit equilibrium method for lateral earth forces. *Can. Geotech. J.* 21(1):166–175.
- [12] Shields, D. H. & A. Z. Tolunay (1973) Passive pressure coefficients by method of slices. *J. Geotech. Engng Div. ASCE* 99, No. SM12, 1043–1053.
- [13] Sokolovski, V. V. (1965) Statics of granular media. New York: Pergamon.
- [14] Soubra A.-H. (2000) Static and seismic passive earth pressure coefficients on rigid retaining structures. *Can. Geotech. J.* 37(2): 463–478.
- [15] Soubra A.-H. & B. Macuh (2002) Active and passive earth pressure coefficients by a kinematical approach. *Proc. Instn Civ. Engrs Geotech. Engng* 155(2): 119–131.