

ÉTUDE NUMERIQUE DE LA POUSSEE ET DE LA BUTEE DES TERRES.

H. MOKHBI*, S MESSASET**

*Laboratoire de Recherche en Génie Civil, Université de Biskra, BP 145, Biskra 07000, Algérie.

**Laboratoire LMGHU, Département de Génie Civil, Université de Skikda, B.P. 26, Skikda 21000, Algérie.

RESUME

La conception d'un ouvrage de soutènement nécessite l'application des théories de poussée et de butée aux calculs des sollicitations exercées à l'ouvrage. De nombreux auteurs ont développé différentes méthodes pour calculer la poussée et la butée des terres, en faisant des hypothèses différentes sur la rugosité de l'écran et la forme de la zone en équilibre limite. La présente étude s'intéresse au calcul numérique des coefficients de poussée et de butée des terres, par la méthode des éléments finis en utilisant la version bidimensionnelle du logiciel PLAXIS. En faisant varier plusieurs paramètres géométriques et mécaniques, afin d'évaluer la poussée et la butée des terres pour un écran vertical, rigide et lisse. L'effet d'inclinaison de la surface du massif du sol et de la proximité d'une pente a été étudié. Les résultats de cette étude ont été comparés avec ceux disponibles dans la littérature.

MOTS CLES : Butée, Poussée, Écran rigide et vertical, Pression, PLAXIS.

ABSTRACT

The design of a retaining wall requires the application of active and passive earth pressure theories. Many researchers have carried out experimental, analytical and numerical work on earth pressure problems. In this study, series of two dimensional finite element analyses have been carried out using the software PLAXIS, to estimate the passive and active earth pressure coefficients, for various mechanical and geometrical configurations of backfill retained by a vertical rigid and smooth wall. The effect of backfill inclination and proximity of a slope are investigated. The results of the present study are compared with those available in the literature.

KEYWORDS: Passive earth pressure, Active earth pressure, Rigid and vertical wall, PLAXIS.

1 INTRODUCTION

Le problème de la poussée et de la butée des terres est un sujet courant dans l'ingénierie géotechnique, il se manifeste dans la conception de plusieurs ouvrages géotechniques tels que les murs de soutènement, les palplanches, les culées des ponts et les blocs d'ancrage, qui nécessitent la détermination des pressions passives et actives des terres ; Ce problème a fait l'objet de nombreux travaux expérimentaux, analytiques et numériques. Les approches fondamentales pour l'analyse des pressions passives et actives des terres sont proposées premièrement par Coulomb [1] et Rankine [2], ces deux approches reposant sur la méthode de calcul à la rupture qui admettent que le sol est en état d'équilibre limite ; La méthode de Coulomb consiste à étudier l'équilibre statique global d'un coin de sol contiguë à l'écran et limité à sa base par une surface de rupture plane ou courbe, alors que la méthode de Rankine consiste à étudier l'équilibre de

rupture de chaque volume élémentaire, mais aussi, il a considéré que le coin de glissement était en entier à l'état d'équilibre limite. Plusieurs chercheurs ont développé ces deux méthodes fondamentales, en citant particulièrement le travail de Mayniel [3] qui a étendu le travail de Coulomb [2] pour donner une solution générale dans le cas d'un sol frottant sans cohésion, soutenu par un mur à surface rugueuse. Cette solution est caractérisée par l'introduction du paramètre d'interface δ . La solution de Mayniel [3] a été encore étendue par Müller-Breslau [4] pour obtenir une solution plus générale du problème de pressions des terres, où il a considéré un massif de sol frottant sans cohésion à surface libre inclinée non surchargé, soutenu par un mur à surface rectiligne, rugueuse et inclinée.

Certains auteurs ont développé des méthodes graphiques, comme celle de Culmann [5] utilisée souvent dans le cas des problèmes géométriquement complexes. D'autres

auteurs comme Jumbu [6], Shields et Tolunay [7], Zuyu et Songmei [8], se sont basés sur la méthode d'équilibre limite des tranches, largement utilisée dans l'analyse de stabilité des pentes. En citant également Zhu et Qian [9] qui ont proposé une nouvelle approche pour déterminer les coefficients de butée en utilisant des tranches triangulaires ; en subdivisant la masse du sol potentiellement en mouvement en une série de tranches triangulaires, les forces inter-tranches sont exprimées en termes de coefficients de forces inter-tranches.

Il est important aussi de rappeler la théorie de Boussinesq [10] basée sur la théorie d'élasticité en proposant un schéma général permettant de prendre en compte le frottement sol-écran, négligé auparavant par la théorie de Rankine basée sur l'hypothèse simplificatrice de l'écran lisse, et par la suite elle a été achevée par Résal [11]. Par ailleurs, Sokolovski [12-13] a présenté sa propre méthode générale de calcul des zones plastiques en milieu pulvérulent ou cohérent permettant de traiter les problèmes dont la solution peut être présentée sous forme d'une zone plastique. Il a considéré que chaque point de la masse de sol est en état limite de rupture si cette masse appartient à la zone plastique. Ainsi, il a donné les équations générales de l'équilibre sous forme d'équations différentielles ; ensuite il a employé la méthode des caractéristiques ainsi que l'équilibre de contraintes et les conditions aux limites pour l'intégration numérique et la résolution de ces équations. Entre autre, Mazindrani et Ganjali [14] ont étudié analytiquement le problème de pression des terres en fournissant une expression analytique pour les coefficients de pression des terres, chose qui a été développée par la suite par d'autres auteurs. Cependant, des études expérimentales importantes menées par plusieurs chercheurs ont permis de bien comprendre le phénomène de la poussée et de la butée des terres, comme par exemple, Rowe et Peaker [15], qui ont mesuré la pression passive du sable sec par un appareil qui permet le contrôle du déplacement du mur et le coefficient de mobilisation du frottement du mur qui en résulte.

En outre, les méthodes numériques ont permis d'étudier simultanément le comportement des murs et des massifs de sol soutenus, en tenant compte de leurs déformations, et dans différentes situations d'interaction sol-structure. Potts et Fourie [16] ont employé la méthode des éléments finis pour examiner l'effet des modes de mouvement du mur sur la génération de la pression des terres, en examinant également l'influence de l'état de surface du mur, la dilatance du sol, la contrainte horizontale initiale et la rigidité du sol en profondeur. Ils ont conclu que la distribution des pressions des terres est fortement liée au mode de mouvement assumé par le mur, la résultante des pressions est aussi légèrement influencée. Par ailleurs, Hazarika et Matsuzawa [17] ont proposé une méthode numérique pour l'analyse de la pression active agissant contre un mur de soutènement rigide pour les différents modes de déplacement. Cette méthode est valable pour des conditions de déformation plane. Cependant, Shiau et Smith [18] ont traité l'effet de l'associativité ou non de la règle d'écoulement, ainsi que du frottement à l'interface sol-mur,

sur la pression passive des terres appliquée sur un mur-poids, en employant la méthode des différences finies explicite de FLAC [19].

L'application proposée dans le présent travail, est une étude numérique de la poussée et de la butée des terres par la méthode des éléments finis, en utilisant le code de calcul Plaxis 2D [20], pour un sol pulvérulent soutenu par un écran vertical, rigide et lisse ; cette étude a permis de calculer les coefficients passifs et actifs des pressions des terres pour différentes configurations géométriques et mécaniques, et ce dans l'objectif d'étudier particulièrement l'influence de l'angle de frottement, l'inclinaison de la surface du sol, la distance entre l'écran et la crête de la pente du massif, sur les pressions passives et actives des terres.

Les résultats numériques de la méthode des éléments finis seront comparés avec ceux disponibles dans la littérature et qui ont été déterminés, pour le même problème, et dans les mêmes conditions géo-mécaniques, par la méthode des différences finies en utilisant le code de calcul FLAC 2D [19], établi par Benmeddour et al [21], et comparés également avec les résultats analytiques en Analyse Limite de Soubra et Macuh [22].

2 PRÉSENTATION DU PROBLÈME

Le problème étudié considère un écran rigide lisse et vertical, de hauteur $h = 1$ m, permet de soutenir un massif de sol constitué de sable dense. Cet écran est soumis à un déplacement imposé horizontalement soit vers le massif du sol pour provoquer le phénomène de la butée, soit dans le sens contraire pour procréer le phénomène de la poussée. Les dimensions du modèle dans les directions x et y sont pour valeur de huit et six fois la taille du mur respectivement (Fig.1), ce qui permet d'éliminer l'effet des frontières du modèle sur les résultats de calcul. Les analyses numériques présentées dans cet article comprennent deux cas pour évaluer les coefficients passifs et actifs des pressions des terres. Dans le premier cas la surface supérieure de la terre est supposée inclinée avec un angle β , qui a les valeurs suivantes : $0, \pm\varphi/3, 0, \pm\varphi/3, \pm\varphi/2, \pm 2\varphi/3$, où le positif de β est pour la poussée des terres et le négatif de β est pour la butée des terres, suivant les indications de la figure 1.a. Le deuxième cas traite le même problème, avec un décalage de la crête du massif de sol, situé à une distance s , comme illustré dans la figure 1.b.

L'étude paramétrique établie sur ce problème permet de montrer :

L'influence de la variation de l'angle de frottement interne de sol sur les pressions actives et passives des terres, cet angle varie de 20° à 40° avec un incrément de 5° ; en appliquant, pour chaque valeur de l'angle de frottement φ , la règle d'écoulement associée $\psi = \varphi$. Et afin d'analyser l'effet d'une règle d'écoulement non associée sur les pressions actives et passives des terres, quelques analyses numériques ont été également effectuées en tenant l'angle de dilatance $\psi \neq \varphi$ dans le cas de $\varphi=30$ et $\varphi=40$.

L'influence de la variation de la distance s entre le mur et le début de la pente sur les pressions des terres.

L'influence de l'inclinaison de la surface du sol.

Le modèle numérique a été établi en déformation plane, avec des éléments finis triangulaire à 15 nœuds, en adoptant un maillage moyen raffiné au voisinage du mur, comportant 2420 éléments, ainsi le mur a été modélisé par un déplacement imposé horizontalement et libre verticalement pour avoir une interface lisse (Fig.2).

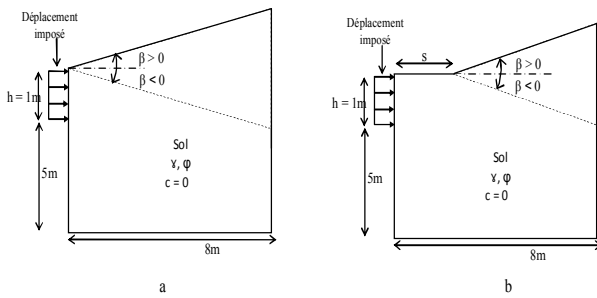


Figure 1: Présentation du problème

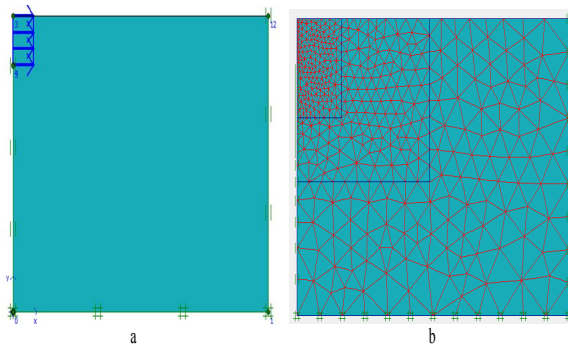


Figure 2: Le modèle géométrique (a) et le maillage (b) faits par Plaxis ($s=0$ et $\beta=0$).

Le modèle de comportement adopté pour le sol est celui de Mohr-Coulomb, un modèle élastoplastique parfait, avec les caractéristiques géotechniques du sol représentées dans le tableau 1 ci-dessous.

Une seule phase de calcul a été envisagée dans le cas de surface horizontale ($s=0$ et $\beta=0$), il s'agit d'un calcul plastique en appliquant un déplacement imposé horizontalement au niveau du mur. Et deux phases de calcul ont été envisagées dans le cas de surface inclinée, la première est un calcul plastique en appliquant le chargement gravitaire pour calculer les contraintes effectives initiales, et la deuxième phase est un calcul plastique en remettant les déplacements engendrés dans la première phase à zéro, tout en appliquant le déplacement imposé au niveau du mur.

Le mur de soutènement rigide est déplacé horizontalement à partir ou vers le sol homogène, cependant le déplacement du mur requis pour mobiliser la pression passive est plus

grand que celui exigé pour mobiliser la pression active des terres

Tableau 1: Les caractéristiques géotechniques du sol

Poids volumique	γ (kN/m ³)	20
Module d'Young	E (kN/m ²)	27000
Coefficient de Poisson	ν	0,35
Cohésion	c (kN/m ²)	0
Angle de frottement interne du sol	ϕ (°)	de 20° à 40° Par pas de 5°
Angle de dilatace	ψ (°)	($\psi = \phi$ ou 0)

3 RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

Pour bien exploiter les résultats de calcul, ils sont présentés sous forme de tableaux et graphes qui montrent l'influence des différents paramètres (l'angle de frottement, la règle d'écoulement, l'inclinaison de la surface de sol et la distances s de la crête) sur les coefficients passifs et actifs des terres K_p et K_a , ces derniers sont calculés à partir des relations suivantes :

$$K_p = 2F_{px} / \gamma h^2 \cos \delta \quad (1)$$

$$K_a = 2F_{ax} / \gamma h^2 \cos \delta \quad (2)$$

Avec :

F_{px} : Résultante de la butée du terrain ;

F_{ax} : Résultante de la poussée du terrain ;

γ : Poids volumiques du sol ;

h : la hauteur du mur ;

δ : Angle de frottement de l'interface. ($\delta = 0$ pour un écran lisse)

Les résultats obtenus sont comparés avec des résultats obtenus par d'autres chercheurs qui ont étudié le même problème dans les mêmes conditions et avec les mêmes caractéristiques du sol, en l'occurrence les travaux de Benmeddour D. et al [21], effectués par un calcul numérique en différences finies sous le code FLAC 2D [19], ainsi que les travaux de Soubra Ah et Macuh B [22], par une méthode analytique dite analyse limite.

3.1 Cas de la butée

3.1.1 L'effet de la variation de l'angle de frottement interne du sol

Le tableau 2 ci-après présente les résultats de calcul du coefficient de butée K_p pour différentes valeurs de l'angle de frottement ϕ qui varie de 20 à 40 et pour différentes valeurs de β/ϕ (0, -1/3, -1/2, -2/3, $s=0$ et $\phi=\psi$), la

comparaison des résultats présentés dans ce tableau montre généralement une bonne concordance entre la méthode des éléments finis utilisée dans ce travail en utilisant le code Plaxis et les deux autres méthodes, d'analyse limite selon Soubra et Macuh [22], et la méthode des différences finies (Flac) selon Benmeddour [21].

Il est à noter ici que la variation de l'angle de frottement interne du sol influe directement sur le coefficient de butée. En outre, la figure 3 montre que l'augmentation de l'angle de frottement interne du sol provoque une augmentation de la composante horizontale de la force de butée, donc la force de butée et proportionnelle directement avec l'angle de frottement interne du sol.

Tableau 2: Comparaison de K_p obtenu avec les résultats de Soubra et Macuh [22], et de Benmeddour [21] pour φ varie de 20° à 40° et $\beta/\varphi = 0, -1/3, -1/2, -2/3, s=0$ et $\varphi=\psi$

φ°	β/φ	K_p		
		Benmeddour et al [21]	Soubra et Macuh [22]	Présent e étude
20	0	2,075	2,04	2,065
	-1/3	1,763	1,71	1,738
	-2/3	1,604	1,55	1,584
	-1/2	2,502	1,39	1,409
25	0	2,435	2,46	2,496
	-1/3	2,021	1,94	2,000
	-2/3	1,784	1,71	1,737
	-1/2	1,538	1,47	1,691
30	0	3,061	3,00	3,043
	-1/3	2,308	2,20	2,248
	-2/3	1,971	1,87	1,911
	-1/2	1,631	1,55	1,578
35	0	3,799	3,69	3,747
	-1/3	2,652	2,50	2,569
	-2/3	2,170	2,03	2,074
	-1/2	1,730	1,55	1,637
40	0	4,765	4,60	4,677
	-1/3	3,046	2,83	2,942
	-2/3	2,409	2,20	2,230
	-1/2	1,843	1,67	1,661

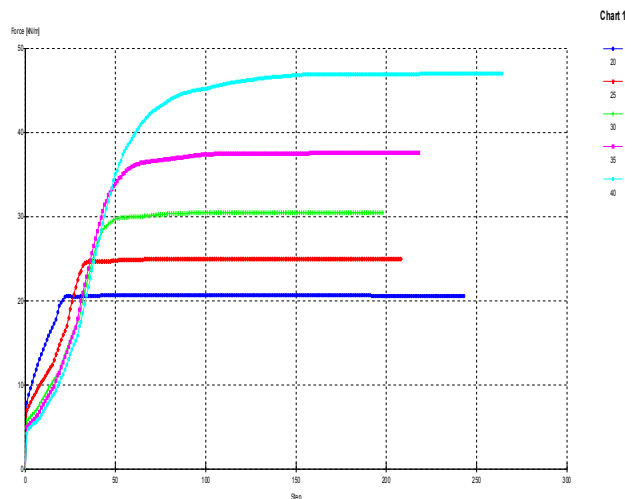


Figure 3: La variation de F_{px} en fonction des étapes de calcul pour φ varie de 20 à 40 (Plaxis)

Pour une surface horizontale $\beta/\varphi = 0$, la figure 4 montre une bonne conformité des résultats de K_p obtenus par les différentes méthodes de calcul pour différentes valeurs de l'angle de frottement interne du sol

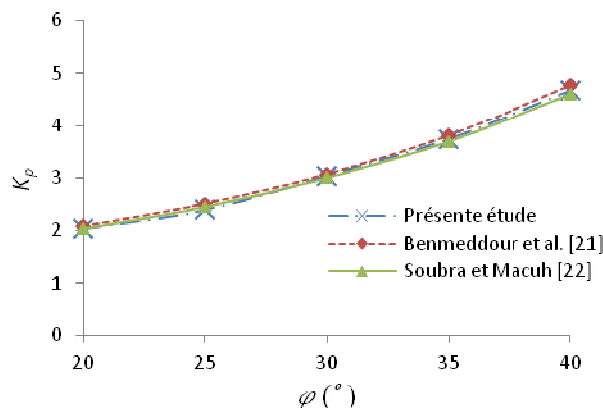


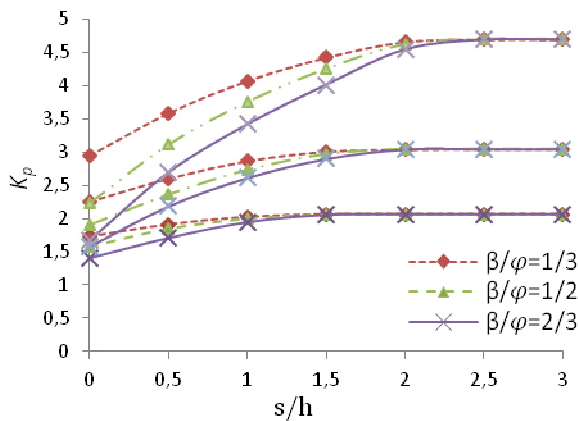
Figure 4: Comparaison de K_p calculé par Plaxis, Flac et Analyse Limite

3.1.2 L'effet de la variation de la distance entre le mur et la crête du massif sur les pressions des terres

Le tableau 3 et la figure 5 montrent les résultats de calcul relatifs au coefficient de butée K_p obtenus dans le présent travail par Plaxis en fonction de la variation de l'angle de frottement interne du sol et du rapport s/h qui varie de 0 à 3. Il est bien remarquable ici, que les coefficients passifs des terres augmentent avec l'accroissement du facteur s/h jusqu'à une valeur de 2,5 à partir de laquelle une stabilisation des valeurs de K_p a été enregistrée. En signalant également que le rapport s/h a une grande influence sur la valeur de K_p notamment pour les grandes valeurs de φ .

Tableau 3: Résultats de K_p avec φ varie de 20 à 40, $\beta/\varphi = 0, -1/3, -1/2, -2/3$, s/h varie de 0 à 3 et $\varphi = \psi$

φ°	β/φ	K_p						
		s/h						
		0	0,5	1	1,5	2	2,5	3
20	-1/3	1,738	1,912	2,021	2,062	2,063	2,062	2,062
	-2/3	1,584	1,846	1,994	2,059	2,062	2,063	2,062
	-1/2	1,409	1,710	1,943	2,054	2,061	2,062	2,063
30	-1/3	2,248	2,599	2,865	3,01	3,04	3,047	3,047
	-2/3	1,911	2,367	2,734	2,969	3,045	3,046	3,046
	-1/2	1,578	2,184	2,611	2,898	3,042	3,046	3,045
40	-1/3	2,942	3,583	4,069	4,422	4,659	4,694	4,694
	-2/3	2,230	3,111	3,751	4,249	4,618	4,698	4,694
	-1/2	1,661	2,690	3,416	4,012	4,543	4,691	4,691


Figure 5: La variation du K_p en fonction de s/h (Plaxis)

3.1.3 L'effet d'inclinaison de la surface du sol sur le coefficient de butée

A partir du tableau 2, il est à noter que les résultats obtenus par Plaxis dans le présent travail sont légèrement plus proches aux résultats analytiques de Soubra et Macuh [22] par rapport aux résultats numériques de Benmeddour [21]. En remarquant aussi que l'augmentation de l'inclinaison de la surface du massif de sol provoque une diminution du coefficient de butée, donc la variation de l'inclinaison du massif du sol influe d'une manière proportionnelle indirecte sur le coefficient de butée ; en outre, la figure 5 montre également que les coefficients passifs des terres K_p augmentent avec la diminution de l'inclinaison de la surface du massif de sol.

3.2 Cas de la poussée

3.2.1 L'effet de la variation de l'angle de frottement interne du sol

Une simple lecture des résultats présentés dans le tableau 4 ou bien dans la figure 6, qui montrent la comparaison des valeurs du coefficient de poussée K_a obtenus par les trois méthodes précitées, permet premièrement de remarquer la bonne concordance des résultats de ces méthodes de calcul, ainsi de noter concernant l'effet de la variation de l'angle de frottement interne du sol, que son augmentation provoque une diminution des valeurs du coefficient de poussée K_a . Également la figure 7 montre que la force de poussée F_{ax} diminue avec l'augmentation de φ , donc elle est proportionnelle indirectement avec l'angle de frottement interne du sol.

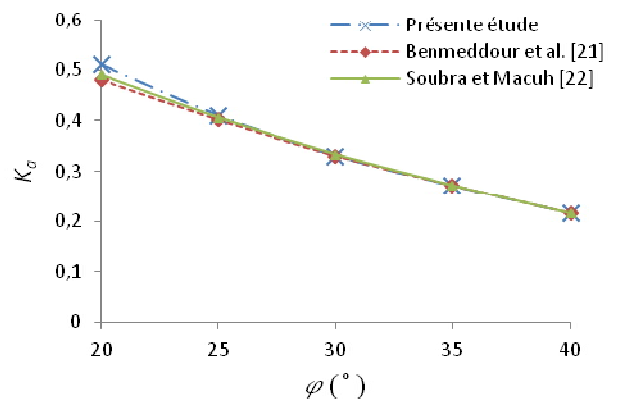

Figure 6: Comparaison de K_a entre Plaxis, Flac et Analyse Limite

Tableau 4: Comparaison de K_a avec les résultats de Soubra et Macuh[22], et de Benmeddour [21] pour φ varie de 20° à 40° , $\beta/\varphi = 0, -1/3, -1/2, -2/3, s=0$ et $\varphi=\psi$

φ°	β/φ	K_a		
		Benmeddour [21]	Soubra et Macuh [22]	Présente étude
20	0	0,481	0,490	84
	1/3	0,524	0,537	0,539
	2/3	0,560	0,569	0,564
	1/2	0,600	0,611	0,620
25	0	0,402	0,406	0,396
	1/3	0,447	0,451	0,456
	2/3	0,477	0,482	0,483
	1/2	0,511	0,523	0,529
30	0	0,330	0,333	0,330
	1/3	0,373	0,374	0,373
	2/3	0,407	0,402	0,400
	1/2	0,440	0,441	0,435
35	0	0,271	0,271	0,246
	1/3	0,295	0,306	0,325
	2/3	0,320	0,330	0,302
	1/2	0,355	0,365	0,300
40	0	0,215	0,217	0,215
	1/3	0,246	0,246	0,240
	2/3	0,262	0,267	0,259
	1/2	0,291	0,296	0,320

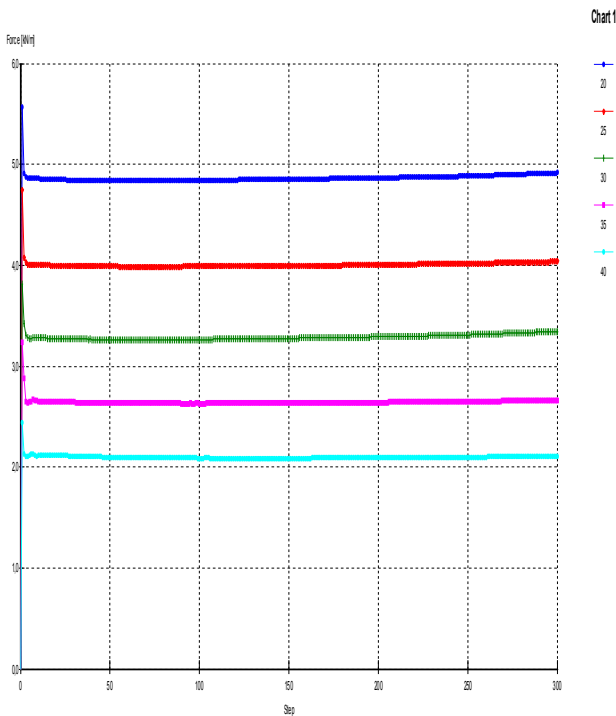


Figure 7: La variation de Fax en fonction des étapes de calcul pour φ varie de 20 à 40 (Plaxis)

3.2.2 L'effet de la variation de la distance entre le mur et la crête du massif de sol

Les résultats de calcul présentés dans le tableau 4 portant sur la variation de K_a en fonction des différentes valeurs de l'angle de frottement $\varphi=20, 30$ et 40 , et pour différentes valeurs du rapport s/h qui varie de 0 à 2, présentés également sur la figure 8, ont permis de mettre en évidence que les coefficients de la poussée K_a diminuent avec l'accroissement du facteur s/h , jusqu'à une stabilisation de K_a pour une valeur de s/h comprise entre 0,5 et 1. En signalant que le rapport s/h a une grande influence sur le coefficient K_a particulièrement pour les petites valeurs de φ .

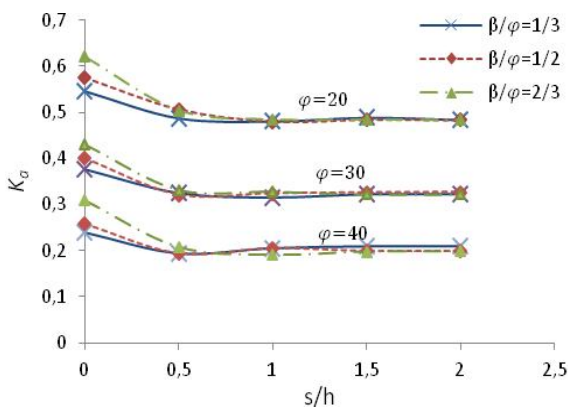


Figure 8: La variation du K_a en fonction de (s/h) .

3.2.3 L'effet d'inclinaison de la surface du sol sur le coefficient de poussée

Encore à partir du tableau 4 et de la figure 8, il est clair que l'augmentation de l'inclinaison de la surface du massif de sol engendre une augmentation du coefficient de poussée K_a , donc la variation de l'inclinaison du massif de sol influence d'une manière proportionnellement directe sur le coefficient de poussée.

3.3 L'effet d'inclinaison de la surface du sol et de la distance de la crête du massif du sol sur le champ de déplacements

La figure 9 ci-dessous montre la distribution des déplacements pour $\varphi=30$ avec $\beta/\varphi=0; 1/3$ dans le cas de la butée et de la poussée. La zone de concentration des déplacements est évidemment plus petite dans le cas de la poussée et elle est beaucoup plus large pour le cas de la butée. Cette figure permet aussi de noter que le mécanisme de rupture éventuel est influencé par le rapport s/h et par l'inclinaison de la surface du sol β/φ , dont la surface de rupture est plus au moins rectiligne pour une surface de sol horizontale ($s/h = 0$ et $\beta/\varphi = 0$) que ce soit pour la poussée ou pour la butée, et elle est plus au moins courbée pour une surface de sol inclinée.

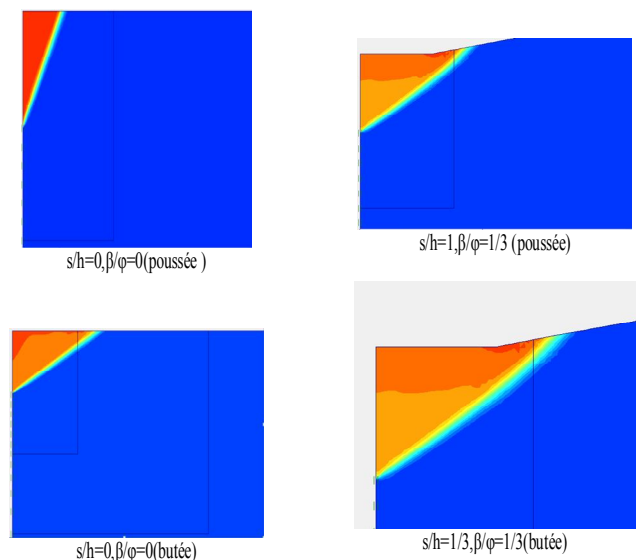


Figure 9: Les déplacements maximums pour le cas de la de poussée et de la butée avec $\varphi=30$

3.4 Influence de la règle d'écoulement sur les pressions des terres

Les tableaux 6 et 7 représentent les résultats des pressions active et passive des terres respectivement, calculés par Plaxis et Flac avec une règle d'écoulement non associée, en les comparant avec ceux déjà calculés par une règle

d'écoulement associée, dans le cas de $\varphi=30, 40$ et $\beta/\varphi = 0, 1/3, 2/3$. Ce qui permet de noter que pour un angle de frottement interne élevé, la règle d'écoulement non associée influe considérablement sur les coefficients passifs et actifs des terres ; et cette influence diminue avec la diminution de

φ . En outre, la règle d'écoulement non associée provoque une diminution du coefficient de butée et une augmentation du coefficient de poussée par rapport à la règle d'écoulement associée.

Tableau 5: Comparaison de K_p calculé avec les deux règles d'écoulement associée et non associée

φ°	β/φ	K_p			
		Benmeddour et al [21]		Présente étude	
		$\psi = \varphi$	$\psi=0$	$\psi = \varphi$	$\psi = 0$
30	0	3,061	2,983	3,043	2,844
	-1/3	2,308	2,206	2,248	2,191
	-2/3	1,631	1,540	1,911	1,527
40	0	4,765	4,147	4,677	4,415
	-1/3	3,046	2,650	2,942	2,626
	-2/3	1,843	1,540	2,230	1,535

Tableau 6: Comparaison de K_a calculé avec les deux règles d'écoulement associée et non associée

φ°	β/φ	K_a			
		Benmeddour et al [21]		Présente étude	
		$\psi = \varphi$	$\psi=0$	$\psi=\varphi$	$\psi = 0$
30	0	0,330	0,361	0,330	0,369
	1/3	0,373	0,411	0,373	0,388
	2/3	0,440	0,486	0,400	0,445
40	0	0,215	0,281	0,215	0,276
	1/3	0,246	0,327	0,240	0,289
	2/3	0,291	0,398	0,259	0,369

4 CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Le calcul des forces de poussée et de butée dépendent de plusieurs facteurs tels que les propriétés physiques, mécaniques et géométriques du massif du sol. Le problème posé dans cet article est la détermination des coefficients de butée K_p , et de poussée K_a , ainsi que l'étude de l'influence de la variation de l'angle de frottement, l'inclinaison de la surface du sol, la distance entre le mur et la pente du massif, et la règle d'écoulement sur les pressions passives et actives des terres. Pour cela un modèle numérique a été élaboré à l'aide du logiciel Plaxis 2D [20] en éléments finis, afin d'étudier l'influence de plusieurs paramètres mécaniques et géométriques du sol sur les coefficients de butée et de poussée.

Les expérimentations numériques ont permis de tirer les conclusions suivantes :

- La simulation numérique avec le code de calcul Plaxis a donné des résultats satisfaisants en comparaison avec les résultats analytiques en analyse limite de Soubra et

Macuh [22] et numériques en différences finies (FLAC) établis par Benmeddour [21].

- L'étude de l'influence de la proximité de la pente et son inclinaison a permis de mettre en évidence que les valeurs de K_p augmentent considérablement pour atteindre sa valeur maximale en fonction de l'augmentation du rapport s/h. Tandis que K_a diminue de manière significative pour atteindre sa valeur minimale avec l'augmentation du rapport s/h. Le maximum et le minimum des coefficients passifs et actifs des pressions des terres respectivement, correspondent aux valeurs obtenues pour la surface du sol horizontale. Cependant, l'influence de la distance de la crête sur le coefficient actif des pressions des terres est moins importante que sur le coefficient passif des pressions des terres.
- L'influence de l'angle d'inclinaison de la pente sur le coefficient K_p s'avère plus grande quand le rapport s/h est petit.
- Le champ de déplacement et le mécanisme de rupture engendrés par les forces de poussée ou de butée dépendent de la proximité de la pente (le rapport s/h) et de l'inclinaison de la surface du massif du sol.
- Pour un angle de frottement interne (φ) élevé, la règle d'écoulement non associée influe considérablement sur les coefficients passifs et actifs calculés ; cette influence diminue avec la diminution de cet angle. Il est à noter également que la règle d'écoulement non associée sous-estime les coefficients passifs des terres et surestime les coefficients actifs des terres.

Enfin, plusieurs perspectives peuvent être soulignées, il est recommandé ainsi d'étudier ce problème pour d'autres types de mur de soutènement et pour d'autres types de sol avec des lois de comportement plus avancés. Il convient aussi

d'étudier ce problème en introduisant à notre modèle d'autres ouvrages comme les blocs d'ancrage et les cavités souterraines pour voir leur influence sur les résultats de calcul. D'autres travaux de recherches peuvent être envisagés en étudiant les pressions passives et actives des terres dans le cas d'un mur de soutènement soumis à un mouvement de translation ou de rotation, ou soumis aux forces sismiques.

RÉFÉRENCES

- [1] Coulomb CA. Essai sur une application des règles des maximis et minimis à quelques problèmes de statique relatifs à l'architecture, vol. 7. Paris: Mém Math Phys Acad Roy Sci par divers Savants; 1776.
- [2] Rankine WJM. On the stability of loose earth. Philos Trans Roy Soc London 1857;147.
- [3] Mayniel, K. Traité expérimental, analytique et pratique de la poussée des terres et des murs de revêtement. 1808, Paris.
- [4] Muller-Breslau, H. Erddruck auf Stutzmauert. Alfred Kroner, Stuttgart. 1906
- [5] Culmann C. Graphische statik. Zurich: Mayer and Zeller; 1866.
- [6] Jambu N. Earth pressure and bearing capacity calculations by generalised procedure of slices. In: Proceedings of 4th international conference on soil mechanics and foundation engineering, vol. 2, London; 1957. p. 207–12.
- [7] Shields, D.H., Tolunay, AZ. (1973). Passive pressure coefficients by method of slices. J Soil Mech Found Div., ASCE; 99(12):1043–1053.
- [8] Zuyu, C.; Songmei, L. Evaluation of active earth pressure by the generalized method of slices, Canadian Geotechnical Journal, 1998, Vol. 35, No. 4 : pp. 591-599
- [9] Zhu, D-Y., Qian, Q. Determination of passive earth pressure coefficients by the method of triangular slices. Canadian Geotechnical Journal, 2000, 37(2), 485–491.
- [10] J.Boussinesq. Essai théorique sur l'équilibre des massifs pulvérulents, comparé à celui de massifs solides et sur la poussée des terres sans cohésion. , Mémoires présentés à l'Académie royale des sciences de Belgique, 2, 40, 1876, F. Hayez, Bruxelles.
- [11] Résal, J. (1910). Poussées des terres. Vol. II. Théorie des terres cohérentes. Ch. Béranger, Ed., Librairie Polytechnique, Paris.
- [12] Sokolovskii, V.V. (1965). Statics of granular media. Pergamon Press, Oxford.
- [13] Sokolovskii, VV. (1960). Statics of soil media (translated from the 1942 Russian edition). Butterworths, London.
- [14] Mazindrani, Z.H., Ganjali, M.H. Lateral earth pressure problem of cohesive backfill with inclined surface. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering; ASCE. 1997, 123(2) : 110-112
- [15] Rowe, P.W., Peaker, K. Passive earth pressure measurements. *Géotechnique*, 1965, Vol 15 N°1,57–78.
- [16] Potts DM, Fourie AB, A numerical study of the effects of wall deformation on earth pressures, International journal for numerical and analytical methods in geomechanics, 1986, Vol:10, ISSN:0363-9061, Pages:383-405
- [17] Hazarika, H, Matsuzawa, H. Wall displacement modes dependent active earth pressure analyses using smeared shear band method with two bands. Computers and Geotechnics, 1996, Volume 19, Issue 3, 1996, Pages 193–219
- [18] Shiao, J., Smith, C. Numerical analysis of passive earth pressures with interfaces. III European Conference on Computational Mechanics. 2006, Lisbon, Portugal.
- [19] FLAC-Fast Lagrangian Analysis of Continua, version 5.0. (2005). Itasca Consulting Group, Inc., Minneapolis.
- [20] Brinkgreve R.B.J et Vermeer P.A, Plaxis Finite Element Code for Soil and Rock Analyses, Version 8, BALKEMA 2002.
- [21] Benmeddour D. Mellas M. Frank R. Mabrouki A. Numerical study of passive and active earth pressures of sands. Computers and Geotechnics 2012 Volume 40 Pages 34–44.
- [22] Soubra AH, Macuh B. Active and passive earth pressure coefficients by a kinematical approach. Proceedings of the ICE - Geotechnical Engineering, Volume 155, Issue 2, April 2002, pages 119 – 131