

PROPOSITION DES AMÉLIORATIONS AUX MODÈLES DE RUPTURE DES MURS DE SOUTÈNEMENTS ANCRÉS

PROPOSED IMPROVEMENT OF FAILURE MODELS OF ANCHORED RETAINING WALLS

Réception : 24/10/2021

Acceptation : 01/12/2021

Publication : 05/01/2022

BENAMARA Fatima Zohra¹, BELABED Lazhar², ROUAIGUIA Ammar³¹Département de Génie Civil et Hydraulique, Laboratoire de Génie Civil et Hydraulique (LGCH), Université 8 Mai 1945, BP 401 Guelma, benamara_fati2003@yahoo.fr² Département de Génie Civil et Hydraulique, Laboratoire de Génie Civil et Hydraulique (LGCH), Université 8 Mai 1945, BP 401 Guelma, drbelabed@yahoo.de³ Département de Génie Civil et Hydraulique, Laboratoire de Génie Civil et Hydraulique (LGCH), Université 8 Mai 1945, BP 401 Guelma, arouaiguia@hotmail.com

Résumé- L'estimation de la longueur d'ancrage joue un rôle prépondérant dans l'étude de la stabilité des écrans de soutènement ancrés. Le but de cette étude est de déterminer la longueur d'ancrage en utilisant le modèle classique de Kranz et d'autres modèles proposés. Dans cet objectif, plusieurs études paramétriques ont été menées à travers l'analyse de la stabilité d'ensemble des écrans de soutènement ancrés dans le but d'obtenir des longueurs d'ancrage plus courtes et des murs plus stables. Afin de valider les modèles mécaniques proposés, une étude numérique est effectuée en utilisant les logiciels GEO FEM et PLAXIS 8.6 sur le même profil type étudié analytiquement. Les études comparatives effectuées ont montré que les modèles mécaniques proposés sont très utiles pour l'analyse de la stabilité des écrans de soutènements simplement ancrés en donnant des longueurs d'ancrage plus courtes et plus économiques par rapport aux modèles classiques.

Mots - clés : longueur d'ancrage, écrans de soutènement ancrés, modèles modifiés, surface de rupture, pression des terres, GEO FEM et PLAXIS 8.6.

Abstract- The estimation of the anchor length plays an important role in the study of the stability of anchored retaining walls. The aim of this study is to determine the anchor length using the classical Kranz model and other proposed models. Therefore, several parametric analyses were carried out through the analysis of the overall stability of the anchored retaining walls in order to achieve minimum anchor lengths and more stable walls. Aiming to validate the proposed mechanical models, a numerical analysis is carried out using the GEO FEM and PLAXIS 8.6 programs on the same standard profile which is studied analytically. The comparative studies have shown that the mechanical models proposed through this study are very effective for the analysis of the stability of simply anchored retaining walls by providing shorter anchor lengths and economic aspect compared to classical models.

Keywords: anchor length, anchored retaining walls, modified models, failure surface, earth pressure, GEO FEM and PLAXIS 8.6.

1-Introduction

Les écrans de soutènement ancrés sont utilisés pour stabiliser les excavations et les pentes [1]. Généralement, La stabilité globale des écrans de soutènement ancrés dépend de la longueur d'ancrage. La vérification de la stabilité globale est l'objectif des analyses de la stabilité basée sur la recherche de la position de la surface

de rupture potentielle et son point de passage par rapport à la paroi ou l'écran ancré.

Lorsque la surface de glissement coupe la paroi de l'écran de soutènement ancré au dessus du fond d'excavation, ce cas est désigné comme une coupe intérieure. Cependant, lorsqu'elle passe juste au-dessous du fond de l'excavation entre le pied de l'écran et le fond de

l'excavation elle est désignée dans ce cas comme une coupe extérieure [2].

Pour les modèles avec coupe intérieure, les forces provoquant la rupture sont : la force des pressions des terres actives (P_a), agissant derrière la paroi, le poids de la masse glissante du sol (G) et la force des pressions des terres actives agissant sur la surface de glissement secondaire (P_{a1}). Les forces empêchant la rupture sont la force de frottement (Q) et la force d'ancrage (A) [3]. Les modèles inclus dans ce cas sont le modèle de Kranz [3], le modèle de Ranke et Ostermayer [4] et le modèle de Heibaum.

Les modèles avec coupe extérieure sont : le modèle de Schulz et le modèle de Broms, caractérisés par la prise en considération de la force des pressions des terres passives (P_p) devant l'écran. Cependant, la force des pressions des terres actives (P_a) et la force d'ancrage (A) ne sont pas prises en compte dans l'analyse d'équilibre limite dans ce cas.

Dans la présente étude, nous avons proposé un nouveau modèle mécanique basé sur les modèles proposés par Kranz [3], Schulz [5] et Heibaum [6] en apportant quelques modifications à chaque modèle, en faisant varier l'inclinaison de la surface de glissement secondaire (ρ) et en prenant en compte l'effet de la force de cohésion (C_2) sur cette surface de glissement secondaire.

Ce modèle est basé sur les observations expérimentales issues des essais en modèles réduits qui ont montré qu'il existe trois zones autour de l'écran de soutènement ancré ; deux zones à l'état actif derrière l'écran et une zone à l'état passif devant l'écran [7].

2- Etude analytique des modèles mécaniques modifiés

Dans cette étude nous avons utilisé la méthode d'analyse à double corps rigides basée sur le principe qui considère les deux corps rigides comme des blocs rigides en équilibre avec le système externe séparés par une limite d'interface [8]. Cette méthode est fréquemment utilisée pour l'analyse de la stabilité des écrans de soutènement simplement ancrés [9].

Clayton et al. [10] ont simplifié la procédure en supposant que la surface de rupture entre les deux corps n'est pas verticale et en négligeant les forces de contact entre les deux corps [10]. La recherche de l'inclinaison de la surface de glissement critique (θ) se fait itérativement jusqu'à ce que la longueur d'ancrage horizontale nécessaire (X) soit déterminée pour vérifier juste l'équilibre du système. Les forces appliquées aux modèles, tels que le poids des terres (G), la surcharge (P), la pression des terres active (P_{ah} , etc.) sont déterminées en fonction de la longueur d'ancrage horizontale nécessaire (X) donnée par l'Eq. (1) [11].

Ces forces sont ensuite remplacées dans les équations d'équilibres de chaque modèle de rupture amélioré qui seront présentées et développées ultérieurement dans la section suivante. La longueur d'ancrage disponible (L) est alors calculée par l'Eq. (2).

$$X = \frac{3H/4 + f}{(\tan \varepsilon + \tan \theta)} \quad (1)$$

Avec : H = la hauteur de l'écran de soutènement simplement ancré ;

ε = inclinaison du tirant d'ancrage avec l'horizontal ;

θ = inclinaison critique de la surface de glissement profonde;

f = hauteur de la fiche de l'écran de soutènement simplement ancré.

$$L = \frac{X}{\cos \varepsilon} \quad (2)$$

La variation dans les angles et les positions des plans de rupture présentée sur la Fig. 1, contrôle la position de la surface de glissement critique pour les modèles étudiés. Par conséquent, nous avons divisé les modèles de rupture améliorés en deux groupes à savoir :

- Mécanismes avec coupe intérieure (modèle de Kranz modifié et modèle de Heibaum modifié).
- Mécanismes avec coupe extérieure (modèle de Schulz modifié et le nouveau modèle proposé).

2.1- Mécanismes avec coupe intérieure

Pour estimer les longueurs d'ancrages, divers calculs ont été effectués sur le même profil type de l'écran de soutènement simplement ancré en utilisant les caractéristiques géométriques et géotechniques définies sur la Fig. 1 et le Tab. 1.

Tableau 1 : La fiche, l'effort d'ancrage et le moment maximal pour différents types de sols
Table 1 : Embedded length, anchor force and bending moment

$\varphi(^{\circ})/c$ (kN/m ²)	40/0	35/5	30/10	25/20	20/30
f (m)	1.79	1.97	2.52	2.36	2.71
A _h (kN)	110.87	76.55	69.23	31.95	20.62
M _{max} (kN.m)	186.29	158.8	165.09	79.34	61.32

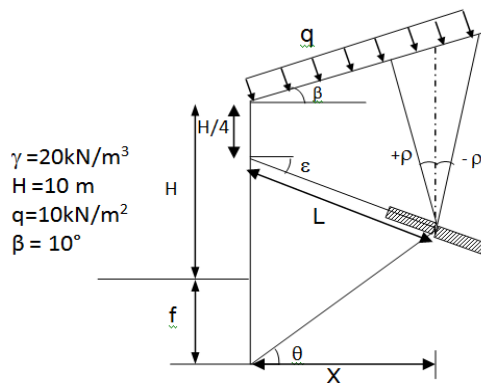


Figure 1 : profil type de l'écran.

Figure 1 : Standard wall profile.

2.1.1- Modèle de Kranz modifié

Nous avons proposé un nouveau modèle appelé modèle de Kranz modifié basé sur le modèle de Kranz présenté par la Fig. 2. Ce mécanisme de rupture est défini par une surface de rupture principale qui coupe la longueur de scellement (L_0) au centre et se divise en deux surfaces de glissement secondaires. Ce modèle se caractérise par un solide rigide (1) sur lequel sont appliquées les forces suivantes : la réaction de l'ancrage (A), la réaction de la paroi sur ce solide (P_a), le frottement du sol sur la ligne de rupture principale (Q), la force de cohésion (C_1), la

surcharge (P) et le poids du solide rigide (1) (G) [12]. La pression des terres actives (P_{a1}) remplace l'action de solide (2) sur le solide (1) par l'intermédiaire de la surface de glissement secondaire considérée comme un mur fictif incliné présenté sur la Fig. 2 [13].

Cependant, nous prenons les différentes valeurs d'inclinaison de la surface de glissement secondaire (ρ) par rapport à la verticale. L'angle de frottement entre les deux solides rigides est $\delta_f = \varphi$. La force de cohésion (C_2) est appliquée sur la même surface de glissement secondaire. Dans cette étude, l'angle de frottement entre l'écran et le sol ($\delta_a = 2/3\varphi$) est utilisé dans l'estimation des pressions des terres actives [14].

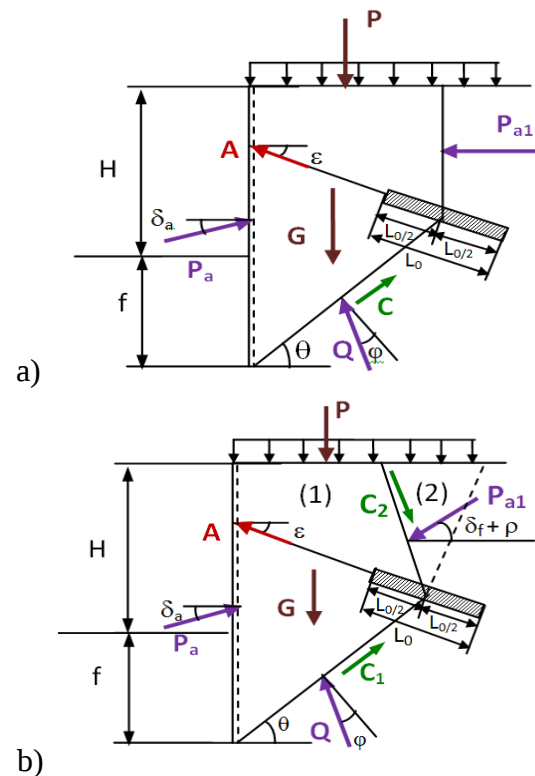


Figure 2 : bilan des forces appliquées aux :
a) modèle de Kranz ; b) Modèle de Kranz modifié

Figure 2 : results forces applied to:
a) Kranz model; b) Modified Kranz model

Pour formuler l'équation d'état limite correspondante au modèle de Kranz modifié, représenté sur la Fig. 2, on doit étudier l'équilibre des forces horizontales et verticales agissant sur ce modèle. Le solide (2) a été remplacé par la force des pressions des terres actives P_{a1} . L'équilibre des forces verticales et horizontales donne après transformation algébrique de l'Eq. (3). On obtient l'équation d'état limite correspondante au modèle de rupture.

$$[(P_{ah}\tan\delta_a + A_h\tan\varepsilon + C_{1h}\tan\theta)\tan(\theta - \varphi) + P_{ah} + C_{1h} + C_{2v}\tan\rho] - [(G + P + P_{a1h}\tan(\delta_f + \rho) + C_{2v})\tan(\theta - \varphi) + A_h + P_{a1h}] = 0 \quad (3)$$

Où (C_{2v}) et (C_{1h}) sont la composante verticale de la force de cohésion (C_2) et la composante horizontale de la force de cohésion (C_1), respectivement. (P_{ah}) est la composante horizontale de la pression des terres active (P_a), et (P_{a1h}) est la composante horizontale de la pression des terres active (P_{a1}).

2.1.2- Modèle de Heibaum modifié

Ce modèle se caractérise par une surface de rupture principale coupant la longueur de scellement à une longueur restante (L_c), derrière la surface de rupture avec le développement d'un effort d'arrachement de l'ancrage (A_1). La pression des terres active (P_{a1}) est inclinée suivant un angle ($\delta_f + \rho$) et la force de cohésion (C_2) est appliquée sur la surface de rupture secondaire comme indiquée sur la Fig. 3b. L'équilibre des forces est utilisé pour déterminer l'équation d'état limite correspondante à ce modèle définie par l'Eq. (4):

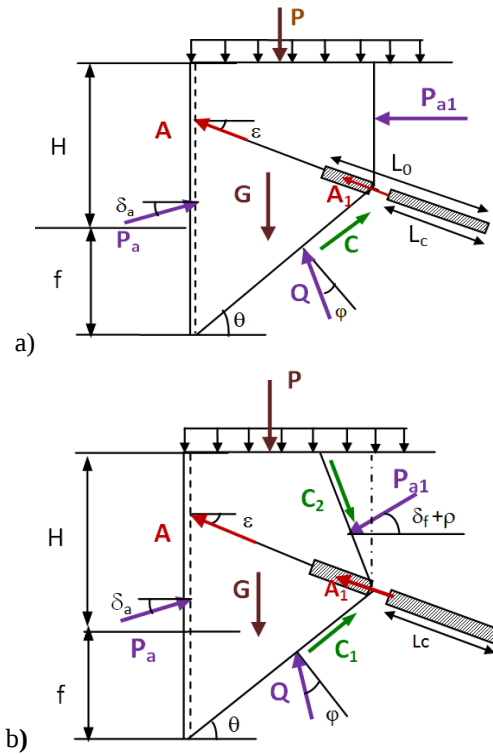


Figure 3 : bilan des forces appliquées aux : a) Modèle de Heibaum; b) Modèle de Heibaum modifié

Figure 3 : results forces applied to: a) Heibaum model; b) Modified Heibaum model

$$[(P_{ah}\tan\delta_a + A_h\tan\varepsilon + C_{1h}\tan\theta)\tan(\theta - \varphi) + P_{ah} + C_{1h} + C_{2v}\tan\rho + A_{1h}] - [(G + P + P_{a1h}\tan(\delta_f + \rho) + C_{2v} + A_{1h}\tan\varepsilon)\tan(\theta - \varphi) + A_h + P_{a1h}] = 0 \quad (4)$$

Les différents efforts agissant sur le modèle de Heibaum modifié sont les mêmes efforts définis précédemment pour le modèle de Kranz modifié avec l'addition de l'effort d'arrachement de l'ancrage au sol (A_1) qui est déterminée comme suit :

$$A_1 = \kappa L_c \quad (5)$$

$$\kappa = \frac{T}{a} \quad (6)$$

$$T = \frac{A_{rup}}{L_0} \quad (7)$$

$$a = \frac{A_s}{A} \quad (8)$$

Avec (κ) l'indice de transfert de l'effort par mètre de longueur, (T) la valeur limite du frottement de l'ancrage, (A_s) l'effort d'ancrage de service, (A_{rup}) l'effort d'ancrage de rupture, (a) l'espacement horizontal entre les ancrages, et (A) l'effort d'ancrage calculé précédemment.

$$\frac{A_{rup}}{A_s} \geq \eta \quad (9)$$

Pour le facteur de sécurité d'ancrage $\eta = 1,5$ selon la norme allemande [15] et après la transformation algébrique, nous obtenons :

$$\kappa = \frac{1.5 A}{L_o} \quad (10)$$

$$A_1 = \frac{1.5 A L_c}{L_o} \quad (11)$$

La longueur restante (L_c) varie dans l'intervalle $[0, L_o]$. Pour $L_c = 0.9L_o$.

2.2- Mécanismes avec une coupe extérieure

La coupe extérieure est caractérisée par un plan de glissement potentiel qui passe à la limite arrière de l'ancrage et sous le fond de l'excavation. L'ensemble « sol, écran et ancrage » est limité par la masse du sol se trouvant à gauche de l'écran de soutènement ancré et par la limite verticale de l'écran qui s'étend à l'arrière de l'ancrage sur le côté droit.

La pression des terres passives (P_p) agit suivant un angle $\delta_p = -1/2\varphi$, et la pression des terres actives (P_{a1}) est supposée agir sur la face verticale droite [16].

2.2.1- Modèle de Schulz modifié

Les forces exercées sur ce modèle sont: la pression des terres passives (P_p) inclinée d'un angle (δ_p), la force de cohésion (C_2) et la pression des terres active (P_{a1}) inclinée d'un angle ($\delta_f + \rho$). L'Eq. (12) d'état limite correspondant au modèle de Schulz modifié est développée par l'étude d'équilibre des forces présentées sur la Fig. 4 [5].

$$[(P_{ph} \tan \delta_p + C_{1h} \tan \theta) \tan(\theta - \varphi) + P_{ph} + C_{1h} + C_{2v} \tan \rho] - [(G + P + P_{a1h}(\delta_f + \rho) + C_{2v}) \tan(\theta - \varphi) + P_{a1h}] = 0 \quad (12)$$

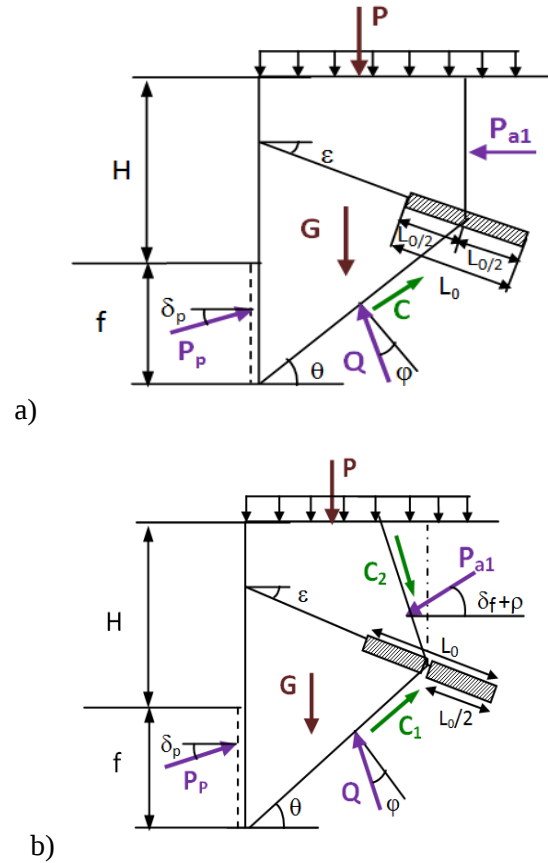


Figure 4 : bilan des forces appliquées aux : a) modèle de Schulz ; b) modèle de Schulz modifié

Figure 4 : results forces applied to : a) Schulz model; b) Modified Schulz model

L'Eq. (13) d'état limite correspondant au modèle de Schulz est déterminée pour une surface de glissement secondaire verticale, une force de cohésion C_2 nulle et un frottement (δ_f) négligeable.

$$[(P_{ph} \tan \delta_p + C_1 \tan \theta) \tan(\theta - \varphi) + P_{ph} + C_1] - [(G + P) \tan(\theta - \varphi) + P_{a1h}] = 0 \quad (13)$$

2.2.2- Le nouveau modèle proposé

Ce modèle est une combinaison de deux modèles (le modèle de Heibaum modifié et le modèle de Schulz modifié) dont les principaux éléments combinés sont : la pression des terres passives (P_p) appliquée devant l'écran de soutènement ancré, la coupe de la longueur de scellement par une surface de rupture à une longueur restante (L_c) avec le développement d'un effort d'arrachement au sol (A_1), l'application de la pression des terres actives (P_{a1}) et la force de cohésion (C_2) respectivement sur la surface de rupture secondaire inclinée d'un angle (ρ) avec la verticale.

L'Eq. (14) est développée par l'étude d'équilibre des forces agissant sur le modèle de rupture, comme il est représenté sur la Fig. 5.

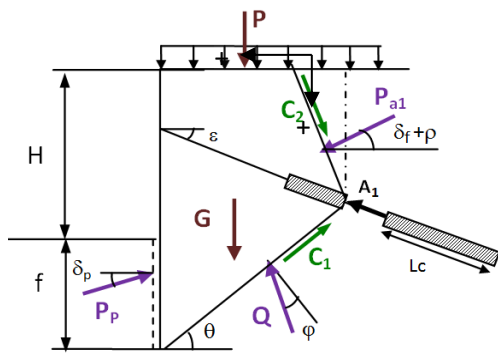


Figure 5 : bilan des forces appliquées au nouveau modèle proposé.

Figure 5 : results forces applied to new proposed model.

$$[(P_{ph}\tan\delta_p + C_{1h}\tan\theta)\tan(\theta - \varphi) + P_{ph} + C_{1h} + A_{1h} + C_{2v}\tan\rho] - [(G + P + P_{a1h}(\delta_f + \rho) + C_{2v} + A_{1h}\tan\epsilon)\tan(\theta - \varphi) + P_{a1h}] = 0 \quad (14)$$

2.3- Comparaison des modèles de rupture

Pour différents types de sol et différentes pressions des terres actives derrière la surface de rupture secondaire, nous avons déterminé les longueurs d'ancrage pour tous les modèles de rupture améliorés et les résultats obtenues sont présentés sur la Fig. 6.

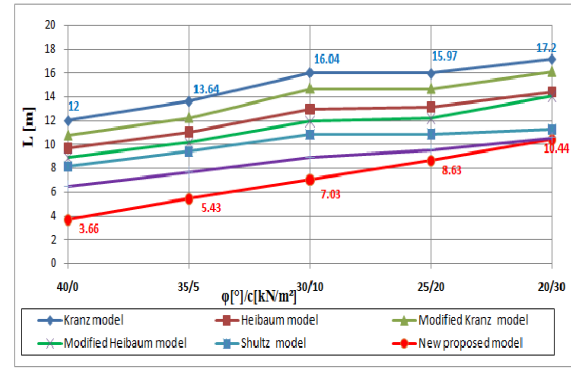


Figure 6 : Comparaison des longueurs d'ancrage entre les modèles de rupture avec coupe intérieure et extérieure.

Figure 6 : Comparison of anchor lengths between models with internal and external failure cuts.

En ce qui concerne les mécanismes avec coupe intérieure, comme le montre la Fig. 6, les modèles de Kranz et Heibaum ont donné des longueurs d'ancrage plus élevées (de 17,2 m à 14,4 m) alors que les modèles modifiés ont donné des longueurs d'ancrage plus courtes (de 16,1 m à 14 m) pour les sols cohérents (φ/c) = (20/30).

En ce qui concerne les mécanismes avec coupe extérieure, le nouveau modèle proposé a donné des longueurs d'ancrage plus courtes (de 3,6 m à 10,4 m) par rapport aux modèles de Schulz et Schulz modifié pour différentes variations de (φ/c).

La réduction enregistrée dans les longueurs d'ancrages aux niveaux des mécanismes avec coupe extérieure et intérieure est due principalement à l'inclinaison de la surface de glissement secondaire d'un angle ($\rho = 5^\circ$) et la prise en considération de l'effort d'arrachement de l'ancrage (A_1) à une distance ($L_c = 0.9L_0$) derrière la surface de rupture.

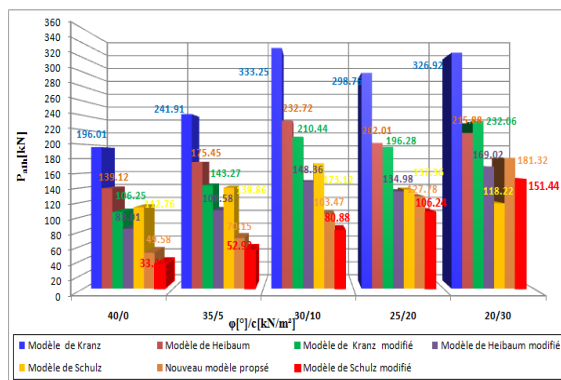


Figure 7 : Comparaison des pressions des terres actives derrière la surface de rupture secondaire

Figure 7 : Comparison of active earth pressures behind the secondary failure surface.

D'après la Fig. 7, nous avons observé que la pression des terres (P_{ah}) agissant sur la surface de glissement secondaire est élevée pour les sols cohérents. Néanmoins, elle diminue pour les modèles modifiés pour le même type de sol.

Les longueurs d'ancrage sont plus courtes lorsque la pression des terres actives diminue derrière la surface de rupture secondaire inclinée d'un angle ($\rho = 5^\circ$) et également lorsqu'on prend en considération la force de cohésion (C_2) appliquée sur la même surface de glissement plus l'effort d'arrachement de l'ancrage (A_1) développé derrière la ligne de rupture principale.

3- Validation des modèles de rupture proposes par la simulation numérique

Nous avons réalisé une étude basée sur la méthode des éléments finis pour valider les modèles mécaniques améliorés. Cette analyse est réalisée en utilisant le programme GEO FEM [17] intégré dans Geo4 et PLAXIS Professional Version 8.6 [18].

Des analyses numériques ont été effectuées dans des conditions drainées en utilisant les mêmes paramètres géométriques et géotechniques appliqués pour l'étude analytique du profil type, comme décrit dans le Tab. 1 [19].

Le modèle numérique envisagé pour exécuter la simulation au moyen des deux logiciel GEO FEM et PLAXIS 8.6 est de dimension (20m×35m). Les déplacements horizontaux et verticaux sont bloqués sur les faces latérales et la base du domaine étudié.

Nous avons considéré un ancrage situé à une profondeur 2,5m de la face libre du massif du sol, inclinée de 20° par rapport à l'horizontal. La longueur d'ancrage libre est de 7m et la longueur de scellement est de 4 m. Le tirant d'ancrage est défini par ses deux points limites et par sa rigidité présentée par la Fig. 8.

Pour l'application du logiciels PLAXIS 8.6, l'écran de soutènement est modélisé en utilisant des éléments plaque de rigidité à la flexion $EI=0,3 \times 10^5 \text{ kNm}^2/\text{m}$.

Les caractéristiques de l'écran sont celles du profilé choisi d'après l'étude analytique « Sheet pile In 436x157x 9.5 mm ». Le tirant d'ancrage est modélisé par deux éléments : un élément nœud à nœud considéré comme longueur libre et un élément géo-grille (longueur de scellement).

L'ancrage (nœud à nœud) est supposé élastique d'une rigidité EA égale à $6,6 \times 10^4 \text{ kN/m}$. La longueur de scellement est considérée comme étant elastoplastique d'une rigidité égale à $2,61 \times 10^6 \text{ kN/m}$.

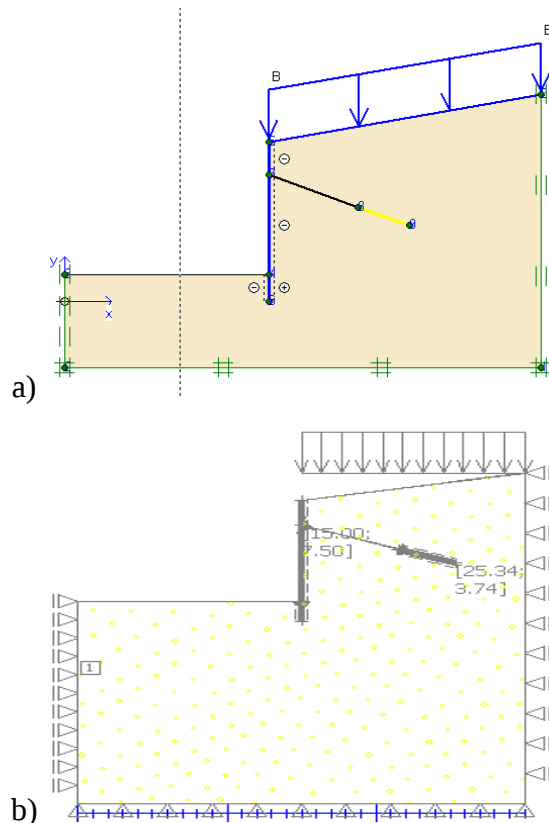


Figure 8 : Modèles numériques avec :
a) PLAXIS 8.6 ; b) GEO FEM.

Figure 8 : Numerical model with :
a) PLAXIS 8.6 ; b) GEO FEM.

Les tirants d'ancrages sont modélisés avec le logiciel GEO FEM au moyen d'un élément barre élastique résistant à la traction de diamètre 20mm sur la partie libre et d'élément poutre en béton sur la partie scellée. L'écran est modélisé en utilisant des éléments de poutre de module de Young $E = 2.1 \times 10^5$ MPa, de moment d'inertie $I = 1.485 \times 10^{-4}$ m⁴/m, de section transversale $A = 1.55 \times 10^{-2}$ m²/m et d'un module de cisaillement $G = 81000.00$ MPa. Ces caractéristiques sont celles du profilé choisi d'après l'étude analytique « Sheet pile In 436 x 157x 9.5 mm ».

3.1- Résultats obtenus par PLAXIS 8.6 et GEO FEM

Dans cette analyse, on s'est attaché à déterminer les déplacements horizontaux qui nous renseignent sur le type des mécanismes développés. Les mécanismes de rupture observés sont similaires aux modèles de rupture modifiés. D'après la Fig. 9, le modèle de rupture

développé est induit par les déplacements de l'ensemble (mur+sol+ancrage). Il est caractérisé par des surfaces de glissement partant du pied de l'écran ancré suivant un angle aigu avec le plan horizontal en traversant la longueur de scellement à une distance restante (L_c).

Le mécanisme de rupture obtenu à partir du logiciel GEO FEM peut être divisé en deux solides rigides séparés par des surfaces de glissement inclinées avec les mêmes angles, ce qui implique que la surface de glissement Δ secondaire est inclinée et non pas verticale.

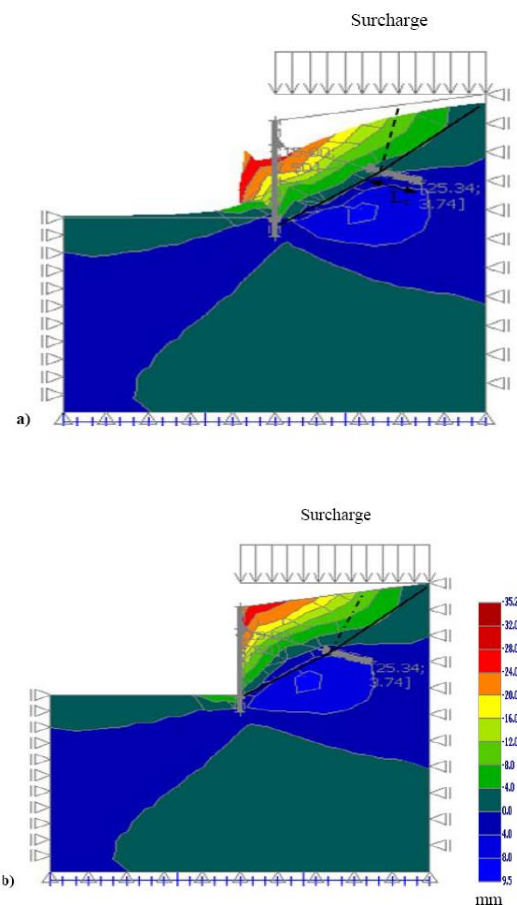


Figure 9 : Mécanismes de rupture déduit de la représentation des déplacements totaux réalisés avec GEO FEM : a) Modèle déformée; b) Modèle non déformée. Cas ϕ (°)/c (kN/m²) = 35/5.

Figure 9 : Failure mechanism deduced from the representation of the total displacements carried out with GEO FEM: a) Deformed model; b) undeformed model. Case ϕ (°)/c (kN/m²) = 35/5.

La présence de la force de cohésion sur la surface de rupture secondaire a provoquée un glissement en translation entre les deux surfaces. Par conséquent, la surface de rupture se situe dans un plan incliné, comme le montre la Fig. 10a.

Cependant, lorsque la force de cohésion est supposée nulle, il ne se produit pas un mouvement de translation entre les solides mais un déplacement dans des directions opposées et perpendiculaires au plan de la surface de rupture, ce qui entraîne la formation d'une surface de rupture verticale comme indiqué sur la Fig. 10b.

Comme le montrent les Figures 9 et 10, la surface de rupture principale ne coupe pas la longueur de scellement au milieu mais à une longueur restante $L_c > L_0/2$ derrière la surface de rupture principale, ce qui confirme les modifications apportées aux modèles précédemment présentés dans l'étude analytique.

L'analyse effectuée par PLAXIS 8.6, comme l'illustre la Fig. 11, présente des mécanismes de rupture composés de deux solides avec une surface de rupture secondaire plus raide, observée pour les sols cohérent (ϕ/c) = (25/20 & 20/30), cette dernière devient verticale pour les sols frottant (ϕ/c) = (40/0; 35/5) dans les cas associés.

Avec une cohésion croissante, la plupart des surfaces de rupture passent juste au-dessous de l'excavation entre le pied de l'écran et le fond de l'excavation. Nous pouvons noter également, que la ligne de glissement potentielle change de position le long de la longueur de scellement jusqu'à sa limite.

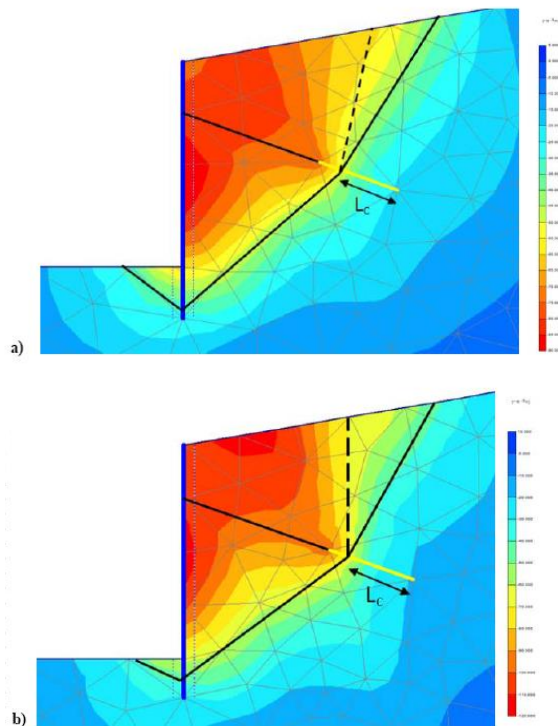


Figure 10 : Mécanismes de rupture déduits de la représentation des déplacements totaux obtenues d'après PLAXIS 8.6: a) ϕ ($^{\circ}$)/ c (kN/m²) = 30/10; b) ϕ ($^{\circ}$)/ c (kN/m²) = 40/0.

Figure 10 : Failure mechanism deduced from the representation of the total displacements carried out with Plaxis program: a) ϕ ($^{\circ}$)/ C (kN/m²) = 25/20; b) ϕ ($^{\circ}$)/ C (kN/m²) = 40/0.

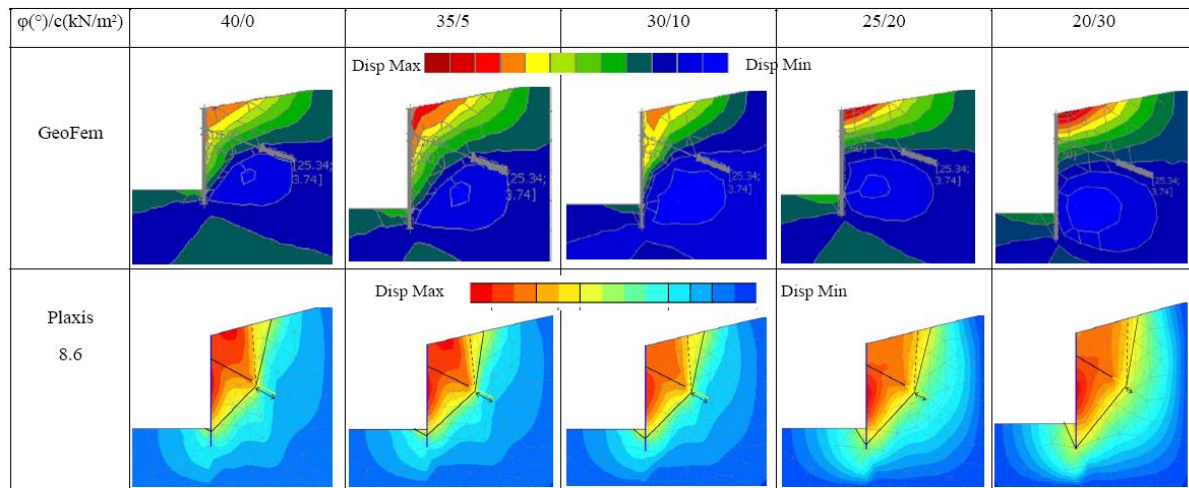


Figure 11 : mécanismes de rupture obtenus à partir des analyses effectuées par les logiciels PLAXIS 8.6 et GEO FEM.

Figure 11 : failure mechanisms obtained from the analysis performed with PLAXIS and GeoFem software applications.

Les contours de déformation des sols observés derrière l'écran indiquent que l'effondrement du sol dans cette région se présente sous la forme d'un solide rigide.

Le développement d'un solide rigide en aval de la paroi correspond à la pression des terres passives (Fig. 11), qui n'est prise en considération que dans le nouveau modèle proposé. Cependant, elle est négligée dans les modèles classiques (modèles de Kranz et Heibbaum).

5- Conclusion

Dans ce travail nous avons procédé à l'amélioration de quatre modèles mécaniques : deux avec coupe intérieure (Modèle de Kranz et modèle de Heibbaum) et les deux autres avec coupe extérieure (modèle de Shultz et modèle de Broms). La différence entre les deux groupes a été étudiée.

Après développement des équations d'état limite correspondantes à chaque modèle de rupture, on a pu déterminer les longueurs d'ancrages en faisant varier l'inclinaison de la surface de glissement principale (θ) pour différents types de sols.

Les modifications sur les modèles de rupture ont été effectuées afin d'estimer les

longueurs minimales d'ancrage pour les murs de soutènement ancrés. Nous avons proposés un nouveau modèle mécanique basé sur les modèles de Kranz, Schultz et Heibbaum en apportant quelques modifications sur chacun des modèles.

Les équations d'état limite des modèles de rupture ont été améliorées en prenant en considération les effets des forces internes telles que la cohésion et le frottement entre les solides rigides ainsi que la surface de glissement inclinée.

On peut confirmer que la variation dans l'inclinaison de la surface de glissement secondaire (ρ) induit à un changement des pressions des terres actives P_{a1h} derrière le mur fictif ce qui influe considérablement sur l'estimation des longueurs d'ancrages dans les modèles de rupture avec coupe intérieure et extérieure. Egalement, on a distingué que ces longueurs sont plus courtes pour ($\rho=+5^\circ$) et pour P_{a1h} minimale pour le même type de sol et augmente pour les sols cohérents.

La réduction dans les longueurs d'ancrage est plus perceptible lorsque l'effort d'arrachement de l'ancrage (A_1) est pris en considération à une distance ($L_c=0.9L_0$) derrière la surface de rupture. Cette réduction dans les longueurs d'ancrage est plus accentuée au niveau du nouveau modèle proposé. Le nouveau modèle proposé est une combinaison de toutes

les modifications apportées aux modèles de rupture tel que l'inclinaison de la surface de glissement secondaire ($\rho=+5^\circ$), la force de cohésion C_2 sur cette même surface, la pression des terres passive P_p et l'effort d'arrachement de l'ancrage A_1 .

Une série de calcul par éléments finis a été effectuée afin de valider les modifications apportées aux modèles de rupture. La modélisation des écrans de soutènement ancrés simplement ancré par un programme d'éléments finis tel que PLAXIS 8.6 et GEO FEM implique l'utilisation de plusieurs paramètres, y compris ceux du sol, des structures ou des charges, tous nécessaires pour compléter les calculs.

L'analyse effectuée par PLAXIS 8.6 présente des mécanismes de rupture composés de deux solides avec une surface de rupture secondaire incliné d'un certain angle (ρ), observée pour les sols cohérents et cette dernière devient verticale pour les sols frottants.

La surface de rupture principale ne coupe pas la longueur de scellement au milieu mais à une longueur restante (L_c) derrière la surface de rupture principale, ce qui confirme les modifications apportées aux modèles améliorés présentés dans l'étude analytique.

La réduction des longueurs d'ancrage pourrait être utile pour des raisons économiques ou techniques, notamment pour l'environnement urbain, où l'utilisation des ancrages longs peut être limitée.

Références bibliographiques

- [1] Wenping, G., Hongwei, H., Hsein Juang, C., et Wang, L., *Simplified-robust geotechnical design of soldier pile-anchor tieback shoring system for deep excavation*, Marine Georesources & Geotechnology, pp 157-169, 2015.
- [2] Sabatini, P.J., et Pass, D.G., *Geotechnical engineering circular no.4. Ground Anchors and Anchored System*, Report No.FHWA-IF-99-015, Office of Bridge Technology Federal Highway Administration, Washington, 1999.
- [3] Kranz, E., *Über die Verankerung von Spundwänden. Mitteilungen aus dem Gebiet des Wasserbaues und der Baugrundforschung*, Ernst & Sohn, 1953.
- [4] Ranke, A., et Ostermayer, H., *Beitrag zur Stabilitätsuntersuchung mehrfach verankerter Baugruben umschließungen*, Bautechnik, Vol. 45, No. 10, 1968, pp 341-350.
- [5] Schulz, H., *Überlegungen zur führung des mecheises der standsicherheit in der tiefen gleitfuge*, Mitt.Bl.d.BAW, 1977.
- [6] Heibbaum, M., *Zur Frage der standseicherheit verankerter stützwnde auf der tiefen gleitfuge.*, Institute for Foundation Engineering Soil and Rock Mechanics, Unpublished Thesis, University of Technology darmstadt, Germany, 1987.
- [7] Masrouri, F. et Kastner, R., *Essai sur modèle de rideaux de soutènement: confrontation à diverses méthode de calcul*, Revue Française de Géotechnique, 1991.
- [8] Dobie, M.J.D., et Combie. P.F., *Reinforced soil design using a two-part wedge mechanism: justification and evidence*, Proc. of the XVI ECSMGE Geotechnical Engineering for Infrastructure and Development, ICE Publishing, 2015.
- [9] Gäßler, G. et Gudehus, G., *Anchored wall, Model tests and statiscal design.*, 12th international conference of soil mechanics and foundation engineering, Rio de Janeiro, 1989.



- [10] Clayton, C.R.I. Woods, R.I. Bond, A.J. et Milititsky, J., *Earth Pressure and Earth-Retaining Structures.*, Taylor & Francis publications, Florida, USA, 2013.
- [11] Benamara, FZ., Belabed, L., et Rouaiguia, A., *Proposed Improvements To Analytical Models of Anchored Retaining Walls*, Environmental & Engineering Geoscience, pp 115-126, 2019.
- [12] Belabed, L., *New method for the determination of the anchor lengths for double-propped retaining walls*, Bautechnik, pp 803-815, 2007.
- [13] Gäßler, G., *Vernagelte Geländesprünge Tragverhalten und standsichereit Veröffentlichungen.*, Unpublished thesis, Ridericiana Universität, Karsruhe, 1987.
- [14] Costet, J. et Sanglerat, G., *Cours pratique de mécanique des Sol 2 calcul des ouvrages*, Dunod, Paris, 1988.
- [15] DIN4125, *Ground anchorages, design construction and testing*, Institut allemand de normalization, 1990.
- [16] Whitlow, R., *Basic Soil Mechanics*, U.K Longman group limited publication, 1995.
- [17] Bures, P., Blas, P. et Jiri, L., *GEO4 FEM User's Guide*, GeoFem Version 4.0.7.62: Fine company lader ship Milos Vodolan and Jiri Laurin, Prague, Czech Republic, 2003.
- [18] Brinkgreve, R.B.J., *Manuel de Référence de PLAXIS Version 8.6* : Delft University of Technology, Delft, Netherlands, and PLAXIS BV, Pays-Bas, Netherlands, 2003,
- [19] Wen, Z., Jian, Y.H., Yang, C., Peng, J.J. Shen, G.L., et Zhen., Z., *A numerical study on the influence of anchorage failure for a deep excavation retained by anchored pile walls*, Advances in Mechanical Engineering, pp 1-17, 2018.