

Méthode cinématique pour l'estimation de la longueur d'ancrage d'un tirant.

Benamara Fatima Zohra^{1*}, Pr. Belabed Lazhar²

1 Laboratoire de Génie Civil et d'Hydraulique (LGCH), Université 08 mai 45 Guelma, Algérie.

2 Laboratoire de Génie Civil et d'Hydraulique (LGCH), Université 08 mai 45 Guelma, Algérie.

*[*benamara_fati2003@yahoo.fr](mailto:benamara_fati2003@yahoo.fr)*

RÉSUMÉ.

La construction des murs de soutènement ancrés gagne de jour en jour de l'ampleur dans le domaine de Génie Civil en particulier les travaux publics. L'objectif de cet article est le calcul de la stabilité des murs de soutènement ancrés à travers la détermination des différents paramètres influents sur leur comportement mécanique, on proposant un nouveau modèle mécanique basé sur la méthode cinématique des solides de rupture rigides. La vérification de la stabilité d'ensemble (tirant-sol) et la détermination des longueurs d'ancrage nécessaire est réalisée par l'étude de la rupture le long de la surface de glissement pour différents types de sols. L'étude de la stabilité du mur de soutènement ancré a été effectuée également par éléments finis au moyen du logiciel GEO4.

ABSTRACT.

The construction of retaining walls grounded earns every day on the increase in the field of civil engineering in particular public works. The objective of this paper is the calculation of the stability of the grounded retaining walls around the determination of different parameters influencing the mechanical behavior: We propose a new mechanical model based on the kinematic approach of the failure rigid solid. The verification of the overall stability (tied-ground) and the determination of the lengths of anchor is made necessary by the study of the failure along the slip surface for different soil types. The study of the stability of anchored retaining wall was also performed by using the finite element software GEO4.

MOTS CLÉS: *tirant d'ancrages, stabilité, méthode cinématique des solides rigides, Equation d'état limite, longueur d'ancrage.*

KEYWORDS: *anchors, stability, kinematic method of the rigid bodies, equations of state limit anchor length.*

1. Introduction

La vérification de la stabilité des ouvrages de soutènement (Murs cloutés, Murs ancrés, ...) se fait dans la pratique généralement en étudiant le modèle mécanique classique « rupture circulaire » (Corfidir, 2008). Dans ce travail on va montrer qu'il existe d'autres modèles mécaniques prouvés par des essais en modèles réduits et en vraie grandeur, qui sont plus instables (défavorables) que ce modèle classique.

L'objet principal de ce travail est d'étudier la stabilité des murs ancrés vis-à-vis de la rupture d'ensemble parement-sol-ancrage. Dans ce but on a étudié les différents mécanismes de rupture possibles, en particulier ceux basés sur la méthode cinématique des solides rigides, afin de trouver le mécanisme ou le modèle mécanique le plus instable.

2. Méthode cinématique des solides de rupture rigides et principe de la sécurité minimale

L'expérience a montré (Pellet, 1995), que les murs de soutènement ancrés dans la plus part des cas préfèrent se rompre le long des surfaces de glissement. Le calcul de cet état limite de rupture peut être effectué donc d'après la méthode cinématique (Gäßler, 1987). A travers la prise en compte d'une résistance au cisaillement et éventuel les forces de cohésion le long des surfaces de glissement secondaire les réserves de sécurité du système sont correctement exploitées. On suppose qu'à l'état de rupture des murs ancrés, les déformations de cisaillement plastiques se concentrent dans les surfaces de glissement pendant que le reste du massif de sol ne se déforme pas *intact* (Salençon, 1989). C'est seulement dans ces conditions qu'on peut appliquer la méthode cinématique des solides de rupture rigides sur les murs de soutènement. (Gäßler et al, 1989).

3. Modèles mécaniques

On se basant sur les travaux de (Franke et al, 1988) des solides de rupture rigides se forment en état de rupture d'ensemble devant et en arrière de mur. Ces solides sont séparés entre eux par des surfaces de glissement intérieures. La recherche de l'inclinaison critique de la surface de glissement profonde avec l'horizontale (θ_1) se fait itérativement jusqu'à ce que la longueur d'ancrage nécessaire est obtenue qui vérifie juste l'équilibre du système. Ce calcul s'effectue itérativement. On procède de la même manière pour les deux modèles étudiés dans ce travail. Les modèles mécaniques de rupture d'ensemble d'un mur ancrés au moyen de tirant d'ancrage étudiés dans ce travail sont :

M.C pour l'estimation de la L.A d'un tirant 3

-Modèle I : à deux solides rigides : la ligne de rupture coupe le scellement au milieu.

-Modèle II : à deux solides rigides : la ligne de rupture coupe le scellement à une longueur résiduelle de scellement derrière la ligne de rupture.

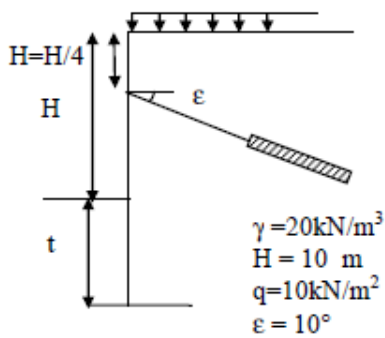


Figure 1. *Modèle type*

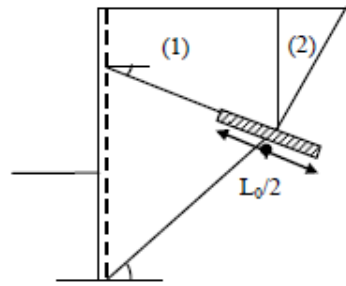


Figure 2. *Modèle I*

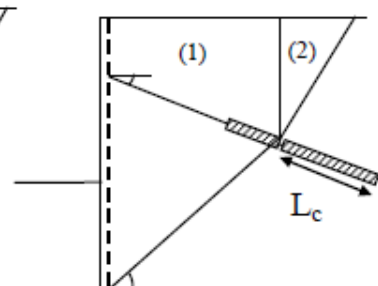


Figure 3. *Modèle II*

3.1. Mécanisme à deux solides rigides : la ligne de rupture coupe le scellement au milieu.

Pour ce modèle cinématique, l'étude de la stabilité de l'ensemble *mur-solancre* se ramène alors à l'étude d'un seul corps rigide (1) sur lequel s'exercent la réaction A de l'ancrage sur le corps rigide (1), la réaction de la paroi sur ce même massif E_a et les frottements Q_1 , la cohésion C_1 et C_2 et le poids propre W du massif (1) (FHWA, 1999). En outre aucune force d'ancrage n'agit sur le solide actif (2) situé à l'arrière Figure 4, car la partie libre de l'ancrage n'est pas coupée par une surface de glissement (Belabed, 2000). C'est pour cela dans ce cas on a remplacé le solide (2) par la pression des terres active E_1 . L'inclinaison de la surface de glissement extérieure avec l'horizontale (θ_{11}) est prise égale à celle de la surface de glissement active ($\pi/4 + \phi/2$) (Gäßler, 1987).

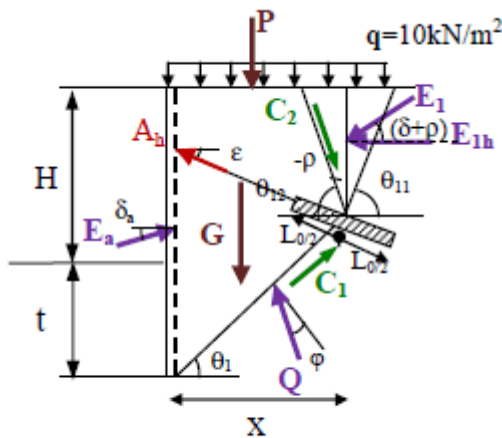


Figure 4. *Modèle I avec forces*

-L'équilibre des forces verticales donne :

$$P + G + E \tan(\rho + \delta) - E \tan \delta - A \tan \varepsilon - Q \cos(\theta - \phi) - C \tan \theta + C_2 v \tan \rho = 0$$

-L'équilibre des forces horizontales donne :

$$E1h - Eah + Ah + Q \sin(\theta1 - \varphi) - C1h - C2v \tan \rho = 0 \quad [2]$$

-De l'équation (2) on tire Q :

$$Q = \frac{Eah - E1h - Ah + C1h + C2v \tan \rho}{\sin(\theta - \varphi)} \quad [3]$$

-On remplaçant l'équation (3) dans (1), On obtient après transformation algébrique l'équation d'état limite correspondant à la rupture au niveau de l'ancrage de mur de soutènement.

$$[G + P - Eah \tan \delta + E1h \tan(\delta + \rho) + C2v - C1h \tan \theta1] \tan(\theta1 - \varphi) - Eah + E1h - C1h - C2v \tan \rho - Ah [\tan(\theta1 - \varphi) \tan \varepsilon - 1] = 0 \quad [4]$$

- En calculant les différentes actions (G, Eah, P, E1h, C1h, et C2v) en fonction de la

longueur d'ancrage coupé x et après des transformations mathématiques trop longues à citer dans ce présent article, on obtient l'équation d'état limite de 2^{ème} degré sous la forme suivante :

$$Mx^2 + Nx + H = 0 \quad [5]$$

-La résolution de cette équation nous permet de déterminer la longueur minimale de tirant d'ancrage coupé (x).

3.2. Mécanisme à deux solides rigides : la ligne de rupture coupe le scellement à une longueur résiduelle de scellement derrière la ligne de rupture.

Pour ce modèle en plus des efforts et des réactions illustrés sur la Figure 4 on ajoute l'effort d'arrachement du scellement A1 développé dans ce cas à une distance Lc derrière la ligne de rupture principale. L'équation d'état limite correspondant à la rupture au niveau de l'ancrage de mur de soutènement est déterminée selon le modèle-II Figure 5.

$$[G + P - Eah \tan \delta + E1h \tan(\delta + \rho) + C2v - C1h \tan \theta1 + A1h \tan \varepsilon \tan(\theta1 - \varphi) - Eah + E1h - C1h - C2v \tan \rho - Ah [\tan(\theta1 - \varphi) \tan \varepsilon - 1] - A1h = 0 \quad [6]$$

$$A_1 = \kappa L_0 \text{ avec } \left(\kappa = \frac{f_a}{a}, a = \frac{A_s}{A} \right) \quad [7]$$

$$\eta = \frac{A_{rup}}{A_{adm}} \geq 1.5 \quad [8]$$

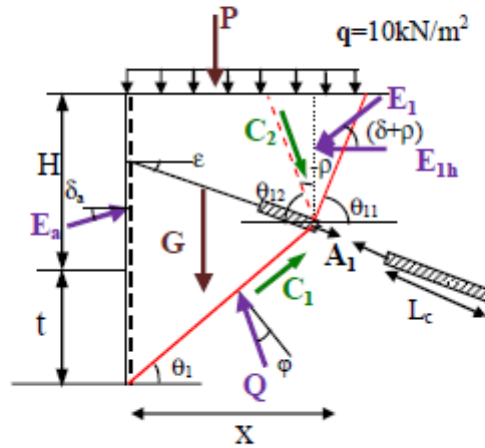


Figure 5. *Modèle II, avec forces.*

-D'après din 4125 $\eta=1.5$ et $A_s=A_{adm}$.

A_{rup}	L'effort de rupture d'ancrage
A_{adm}	L'effort admissible d'ancrage.
η	Coefficient de sécurité d'ancrage
A	L'effort d'ancrage déterminé par la méthode statique.
A_s	L'effort de service calculé
a	Espacement horizontal des ancrages
κ	Indice de transfert de l'effort par mètre de longueur
f_a	La valeur limite de frottement de l'ancrage.

Tableau 1. *Liste des symboles*

-Après transformation algébrique on trouve :

$$\kappa = \frac{1.5 A}{L_0}$$

[9]

4. Analyse de la stabilité par logiciel GEO4

Le même profil type abordé par la méthode cinématique a été étudié au moyen du logiciel GEO4 qui étudie la stabilité interne des murs par la méthode classique à la rupture (De Buhan, 1986) et au moyen du programme GEOFEM. Pour l'étude de la stabilité interne, on part d'une valeur initiale de la longueur d'ancrage égale à 14m ainsi qu'une surface de rupture polygonale ou circulaire, par une optimisation des calculs, qui nous donne la longueur d'ancrage coupé minimale en avant de la ligne de rupture pour les différents paramètres de sol [ϕ/c] Tableau 2. Ce pendant l'étude en élément finie réalisée par le programme GEOFEM consiste à créer une structure dans le régime topologique (les paramètres des sols, spécifie les interfaces entre les sols, les conditions aux limites, etc.) (Benamara, 2005) suivi par la génération du maillage d'élément finie. Les calculs ont été réalisés en configuration bidimensionnelle sur un domaine de 40m de long. Le maillage comporte 1284 noeuds et 603 éléments. Sur les bords latéraux, les déplacements horizontaux sont nuls et les déplacements verticaux libre. Le profil type et le maillage du modèle de calcul sont représentés sur la Figure 6.

M.C pour l'estimation de la L.A d'un tirant

ϕ [°]	40	35	30	25	20
c[kN/m ²]	0	5	10	20	30

Tableau 2. les paramètres de sol

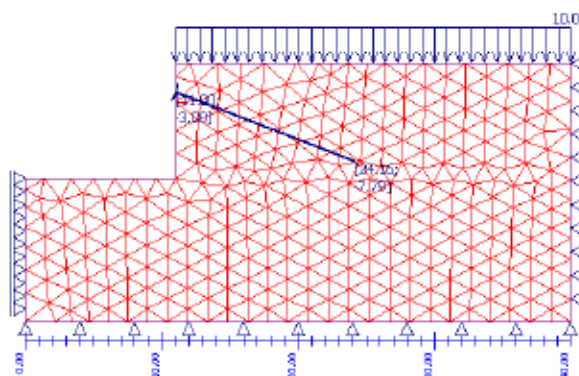


Figure 6. Maillage du modèle de calcul

5. Comparaison des deux modèles cinématique

L'étude des deux modèles cinématiques I et II ont été effectués sur la base des équations d'équilibre précédemment déterminés. Les études paramétriques sont faites avec les combinaisons des paramètres de sol ϕ et c Tableau 2, On a développé un programme de calcul en Matlab basé sur cette méthode, tout en faisant varier l'inclinaison de la surface de glissement (θ_1) jusqu'à ce que la longueur d'ancrage nécessaire est obtenue, qui vérifie juste l'équilibre du système. Ce calcul s'effectue itérativement. Les résultats des études comparatives effectuées pour $\rho = 0^\circ, -5^\circ$ et $+5^\circ$ sont représentés sur la Figure 7. Dans le cas où la ligne de rupture coupe le scellement à une longueur résiduelle derrière la ligne de rupture. Le modèle II donne des tirants d'ancrages plus courts que le modèle I. On remarque que la différence maximale atteint 1.5m qui reste très économique lors de dimensionnement des murs ancrés. On remarque aussi que la variation dans l'inclinaison de la surface de glissement secondaire (ρ) entre $[-5,5]$ influe sur les longueurs d'ancrage, et la pression active derrière le mur fictif. Les longueurs d'ancrage sont d'autant plus longues que la pression E_1 augmente et la cohésion du sol augmente.

XXIX^e Rencontres Universitaires de Génie Civil. Tlemcen, 29 au 31 Mai 2011.

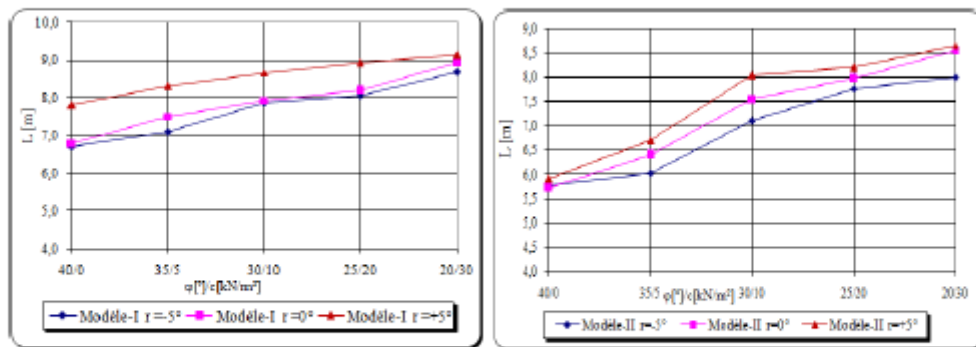


Figure 7. Comparaison des longueurs d'ancrage Modèle I et II

6. Les résultats de calcul par logiciel GEO4

Ayant fait d'une étude complète du profil type étudié par la méthode cinématique, l'analyse de la stabilité interne des murs par la méthode classique à la rupture (Bishop et ...) nous a permis de déterminer les coefficients de sécurité, les efforts d'ancrage ainsi que les longueurs coupées entre la paroi de mur de soutènement et la ligne de rupture ces résultats ne sont pas présentés dans le présent travail. On se basant sur les résultats obtenus par modélisation par élément finie du profil, nous pouvons déduire que les déplacements horizontaux et verticaux sont assez importants que la cohésion de sol augmente. Le cas illustré sur les Figures 9 et 10 donne des déplacements horizontaux de

l'ordre de 1.8mm à 11.8mm pour ($c = 5 \div 30 \text{ kN/m}^2$). Le logiciel Geo4 nous a permis de déterminer l'effort normal de tension dans la barre d'ancrage.

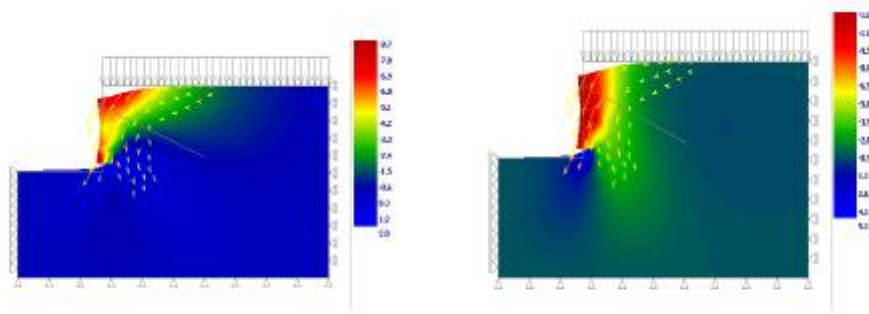


Figure 9. Les déplacements suivant (X) Figure 10. Les déplacements suivant (Z)

7. Conclusion

Dans ce travail nous avons étudié deux modèles mécaniques sur la base de la méthode cinématique de rupture des solides rigides. Les équations d'état limite décrivant les deux mécanismes de rupture ont été développés. Les longueurs d'ancrages ont été déterminées en faisant varier l'inclinaison de la surface de glissement pour différents types de sols. On peut conclure que les longueurs d'ancrage sont d'autant plus longues que la cohésion est élevée. La modélisation par élément fini au moyen du logiciel Géo4 nous a permis aussi de compléter l'étude d'analyse du profil type du talus. Par ailleurs, cette étude confirme que le logiciel GEO4, bien que sa mise en œuvre demande beaucoup d'attention, constitue un outil performant et utilisable pour des études théoriques et, à l'occasion, des études de cas réels.

8. Bibliographie

- Belabed L., « Murs de soutènement ancrés : Modélisation de la surface de glissement profonde », *Revue française de Géotechnique* 2000, n°92.
- Benamara F.Z., Stabilité des murs en sol cloué, Thèse de magister, université 08 Mai 45 Guelma, Algérie, 2005.
- De Buhan P., Approche du calcul à la rupture des ouvrages en sols renforcés, Thèse de doctorat d'état, Université Paris, 1986.
- Corfidir A., « la méthode de Kranz d'hier à aujourd'hui : une revue critique », *Revue française de Géotechnique*, 2008.
- Gäßler G., Vernagelte Geländesprünge Tragverhalten und standsicherheit Veröffentlichungen, Universität Fridericiana, Karlsruhe, 1987.
- Franke E., Heibaum M., « Ein betrag zum nachweis der standsicherheit and der tiefen gleitfuge », *Bauingenieur* 63, 1988.

FHWA - Geotechnical engineering circular n°4, Ground anchor and anchored system, Publication FHWA-IF-99-017-015, US. Department of transportation, 1999.

Gäßler, G. , Gudehus G., « Anchored Wall. Model tests and statistical design », *Proceeding of the 12th international conference of soil mechanics and foundation engineering*, Rio de Janeiro, 1989.

Pellet F., « Comportement mécanique d'une paroi expérimentale renforcée par clouage », *Revue française de géotechnique*, 1995 (n°71).

Salençon J., *Failure calcul and Analyzes limit*, Press ENPC, Paris, 1983.