

Modélisation avancée des sols et analyse numérique de la stabilité du ravin de Kotto à Douala 5^{ème} au Cameroun

ZOA AMBASSA^{1*}, Cyprien Félix OSSENDE OWONA² et Robert MEDJO EKO²

¹ *Laboratoire 3S-R, Université de Grenoble-Alpes, CNRS, BP 53 - 38041 Grenoble Cedex 9, France*

² *Laboratoire de Géologie de l'Ingénieur, Département des Sciences de la Terre, Faculté des Sciences, Université de Yaoundé I, BP 812 Yaoundé, Cameroun*

* Correspondance, courriel : daniel.zoa77@yahoo.fr

Résumé

Cette étude s'intéresse à la stabilité au grand glissement d'un talus instable dans la ville de Douala. A partir des données expérimentales issues des essais géotechniques, nous avons déterminés les paramètres du modèle de Mohr-Coulomb qui décrit correctement le comportement des sols fins. En se basant sur des levés topographiques du site d'étude et du modèle numérique du terrain (MNT), l'analyse de la stabilité au grand glissement par la méthode des éléments finis s'est faite sur PLAXIS. Au terme de la dernière étape d'analyse, le facteur de sécurité F_s , obtenu par la méthode « c-Phi réduction » de PLAXIS, vaut 1,036 pour ce talus. En se référant aux critères de stabilité des ouvrages géotechniques de l'Eurocode 7, il ressort que les flancs du ravin de Kotto sont très instables. Une confortation des flancs de ce talus par des méthodes géotechniques de renforcement appropriées telles que le clouage industriel ou la terre armée est nécessaire pour sa stabilité au grand glissement.

Mots-clés : *ravin de Kotto, stabilité au grand glissement, modélisation des sols, c-phi reduction, confortation.*

Abstract

Advanced modelling of soil and numerical simulation of the stability of the Kotto ravine at Douala 5th, Cameroon

This article treats of the stability to large land sliding of an insdiagram slope in Douala city. As of experimental data resulting from geotechnical testing, parametres of the Mohr-Coulomb model which correctly determines the behaviour of fine soil, have been determined. Based on topographical surveys made on the site and on Digital Terrain Model (DTM), the analysis of the stability to high sliding has been conducted with the finite elements method on PLAXIS software. At the last staged of the analysis the safety factor F_s obtained through the PLAXIS "c-Phi reduction" was about 1.036 for this slope. Referring to the criterion of stability mentioned in Eurocode 7, geotechnical works; it appears that the sides of the ravine in Kotto are highly unstable. A reinforcement of the slope sides with appropriate geotechnical methods such as industrial nailing or reinforced soil is necessary for the stability to large land sliding.

Keywords : *Kotto ravine, stability to large land sliding, soil modelling, c-phi reduction, reinforcement.*

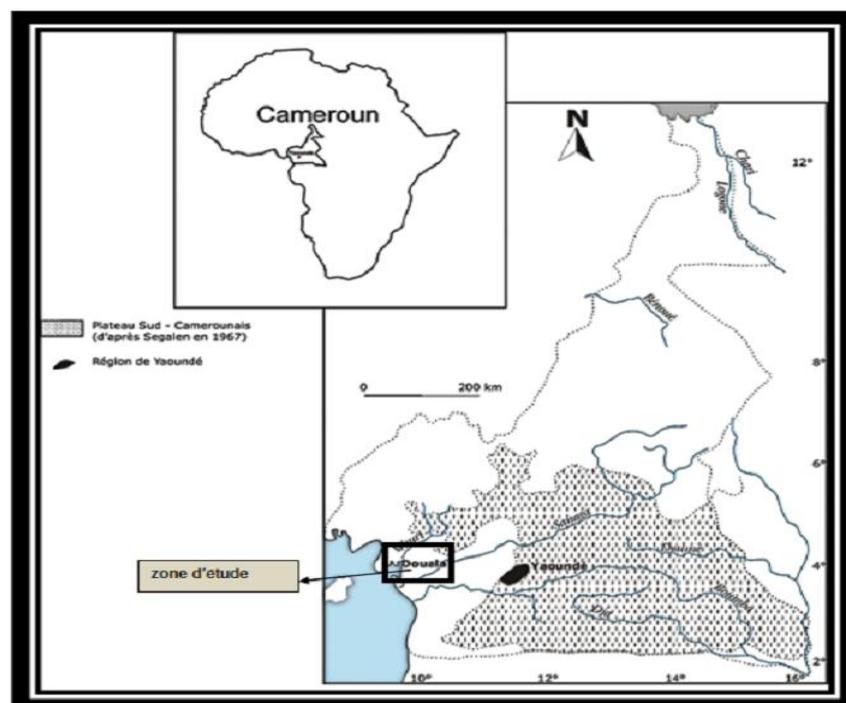
1. Introduction

Le développement des outils numériques de calcul sur ordinateurs et les progrès réalisés dans le domaine de l'informatique ont permis de mettre au point des modèles rhéologiques et des algorithmes de résolution, conduisant à des modélisations qui prennent mieux en compte le comportement observé sur le terrain. Le modèle élastique de Mohr-Coulomb a été développé pour décrire le comportement des sols fins pour lesquels l'état de contraintes dépend de l'état actuel des déformations et du chemin de contraintes suivi, mais le temps n'intervient pas de façon explicite. Ses paramètres sont complètement identifiables à partir d'essais classiques de laboratoire géotechnique et faciles à mettre en œuvre dans les codes de calcul des ouvrages géotechniques. Dans cet article, on expose l'approche suivie dans la détermination des paramètres mécaniques, à partir de données expérimentales acquises sur le site d'étude à Kotto, dans l'arrondissement de Douala 5^e au moyen d'essais triaxiaux classiques, puis on discutera des résultats de leur validation numérique dans le code PLAXIS [1, 2], logiciel d'analyse aux éléments finis des ouvrages géotechniques. On présente enfin les résultats d'une série de calculs effectués à l'aide du code PLAXIS, pour la vérification de la stabilité du talus à long terme.

2. Méthodologie

2-1. Présentation du site d'étude

Le site d'étude est situé entre le carrefour bloc J et le carrefour de la mosquée de BONAMOISSADI dans l'arrondissement de Douala 5^{ème}. Le quartier Kotto est limité au Sud par BONAMOISSADI, au Nord par MBANGUE, à l'Est par LOGPOM et à l'Ouest par le fleuve Wouri. Le climat qui règne dans la ville de Douala est de type équatorial côtier nord à deux saisons. Les précipitations moyennes mensuelles de 56 années (1951 à 2006) montrent que celles-ci, y sont abondantes soit environ 3230,12 mm en moyenne par an. Les *Figures 1 à 6* présentent un aperçu du site d'étude.



a)

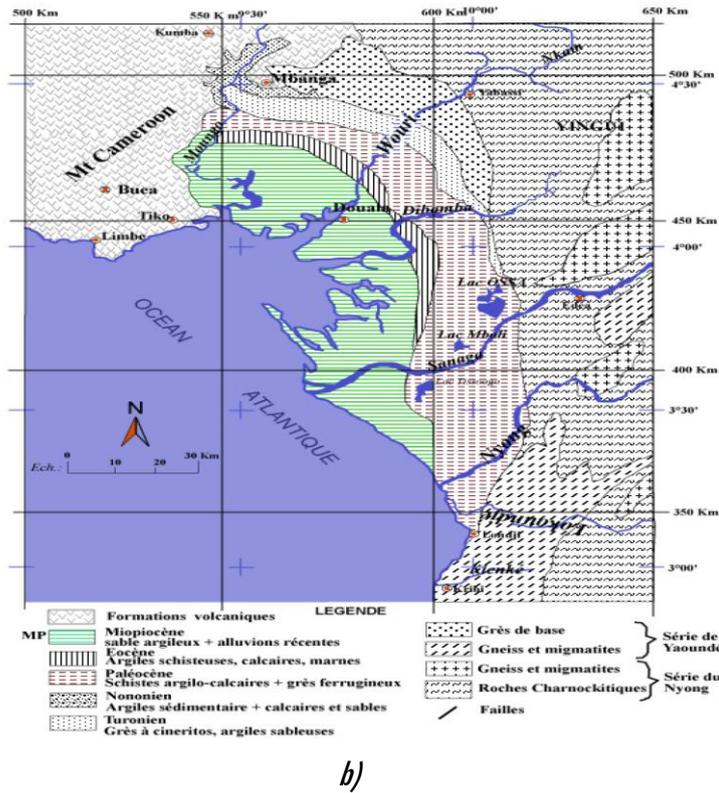


Figure 1 : a) Localisation de la zone d'étude ; b) Carte géologique du bassin sédimentaire de Douala [3]

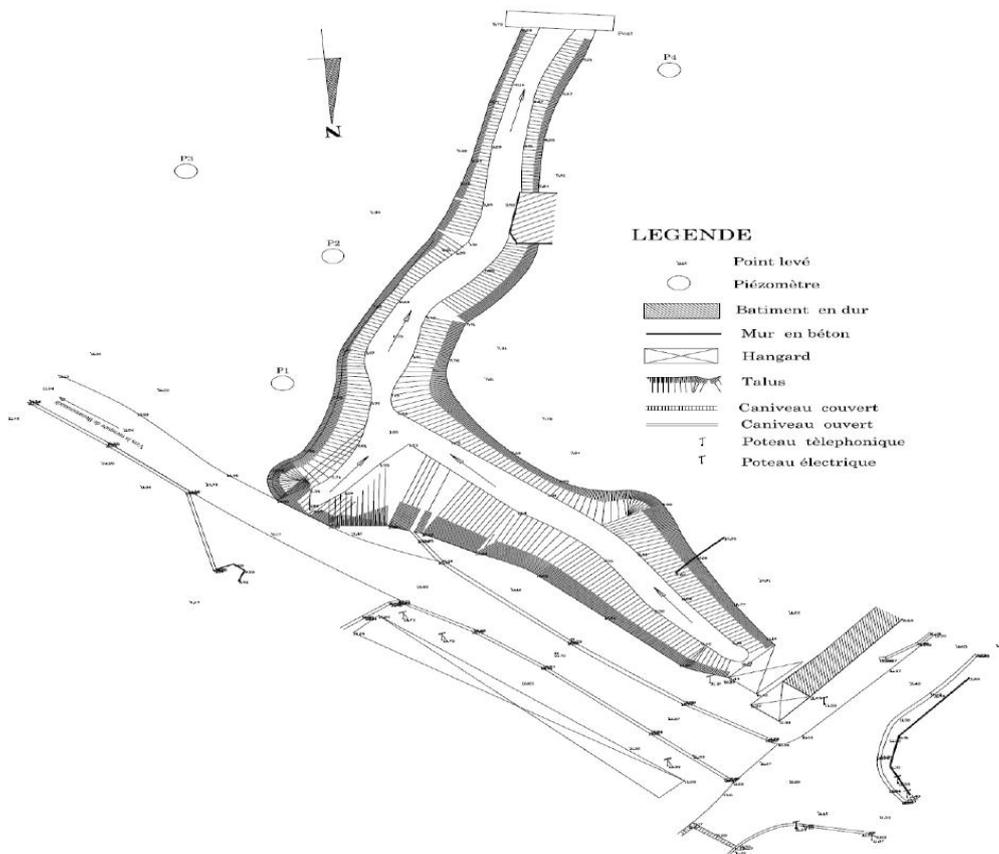


Figure 2 : Vue en plan du ravin de Kotto et ses environs [3]

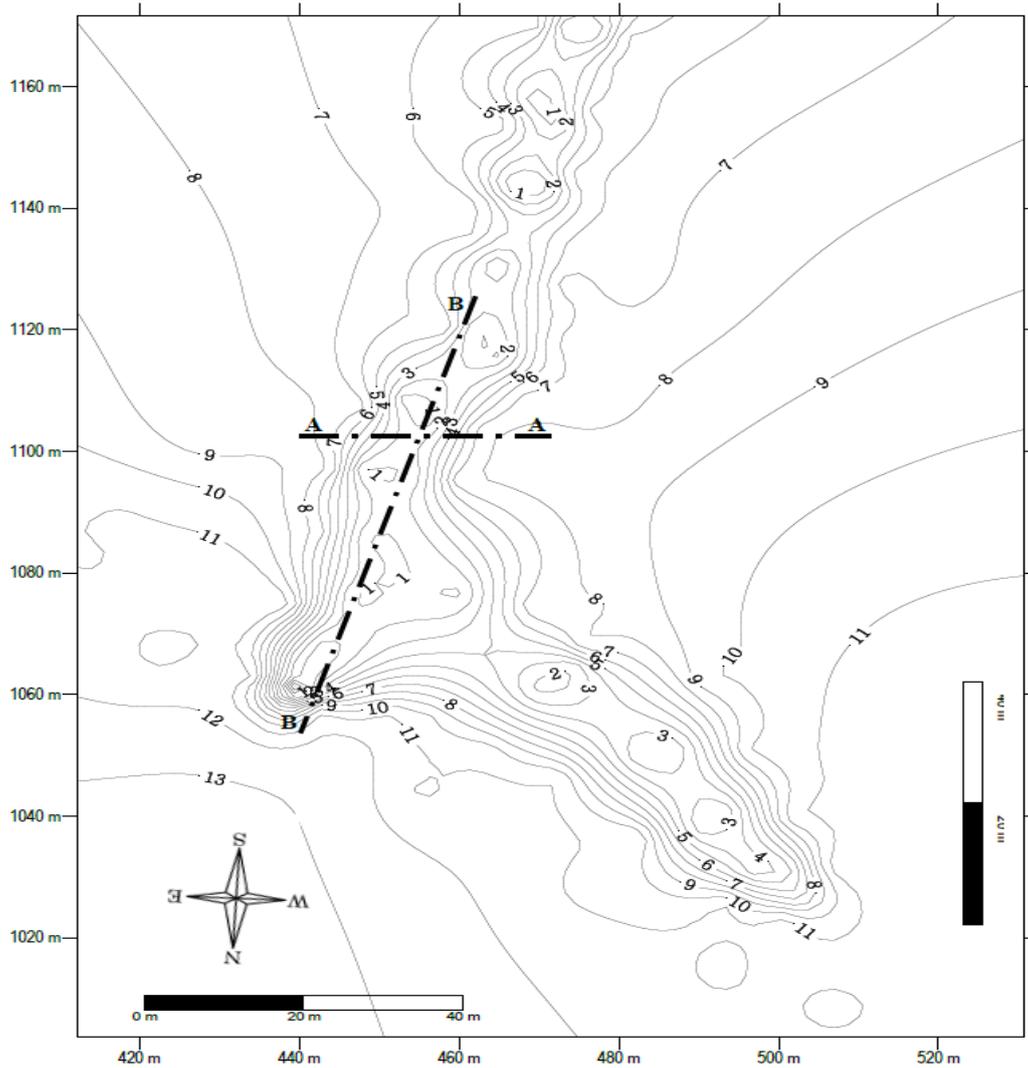


Figure 3 : Carte orographique du ravin de Kotto [3]

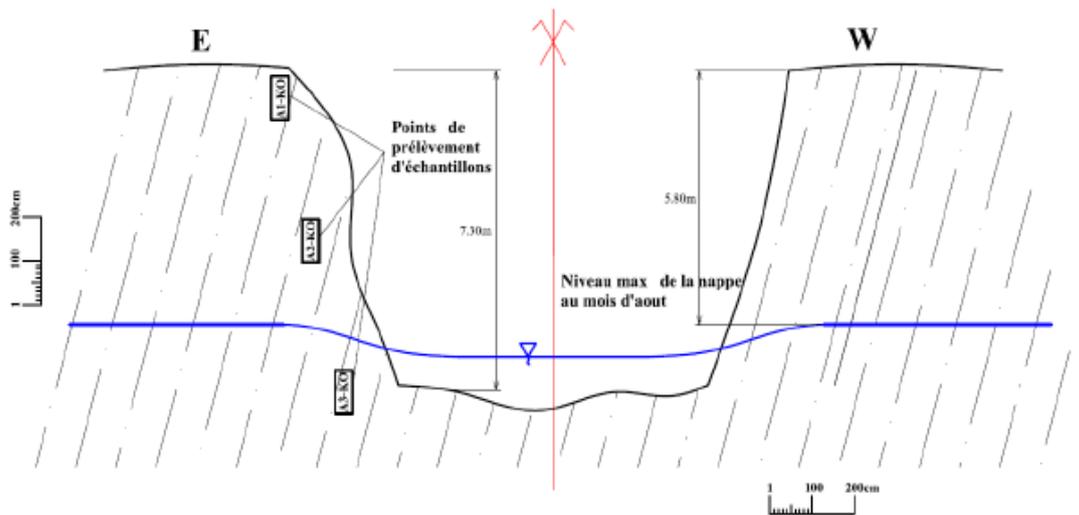


Figure 4 : Profil en travers du ravin de Kotto - coupe A-A de la Figure 3[3]

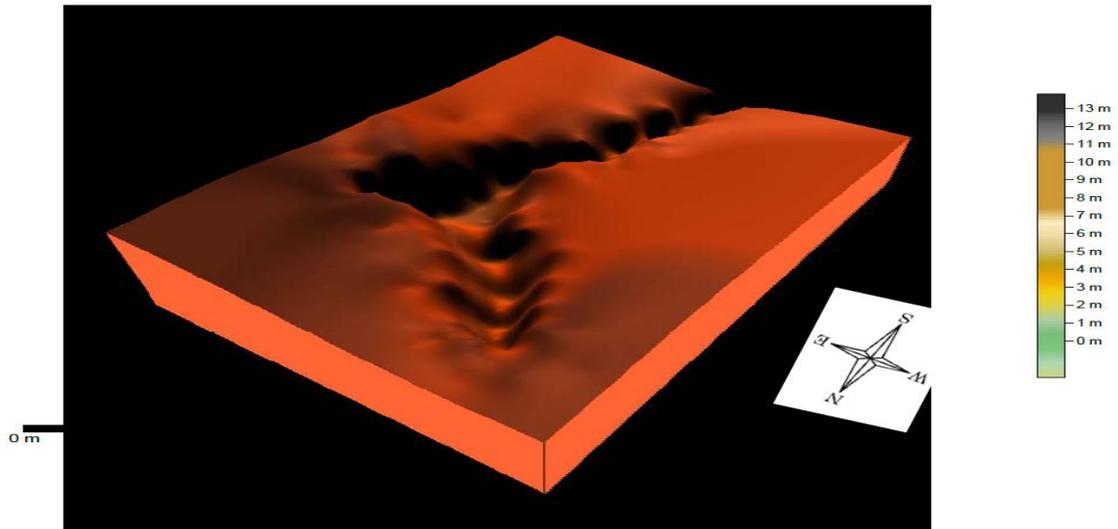


Figure 5 : Vue 3D du modèle numérique du terrain [3]



Figure 6 : Photos du ravin de Kotto [3]

2-2. Modèle de Mohr-Coulomb et méthode c-phi reduction de PLAXIS

2-2-1. Description et paramètres du modèle de Mohr-Coulomb

Le modèle élastique de Mohr-Coulomb a été développé pour décrire le comportement des sols fins pour lesquels l'état de contrainte dépend de l'état actuel des déformations et du chemin de contraintes suivi, mais le temps n'intervient pas de façon explicite. Ses paramètres sont complètement identifiables à partir des essais triaxiaux classiques ou de cisaillement direct de laboratoire géotechnique. Cinq paramètres du modèle de Mohr-Coulomb sont identifiés après essais de laboratoire et implémentés dans le code PLAXIS, il s'agit de deux paramètres d'élasticité parfaite répondant à la loi de Hooke, E : le module d'Young et ν : le coefficient de Poisson et de trois paramètres de rupture du matériau dans le plan de Lambe, c : la cohésion, ϕ : l'angle de frottement interne et ψ : l'angle de dilatance. Les paramètres de Mohr-coulomb identifiés après prélèvement de trois échantillons sur le site sont présentés dans la partie 2-3.2 de cet article.

2-2-2. Présentation de la méthode « c-Phi reduction »

L'étude de la stabilité des pentes est basée sur la réduction des caractéristiques mécaniques qui est une option disponible dans PLAXIS, appelée « c-Phi » et qui permet de calculer des coefficients de sécurité. Dans l'approche « c - phi réduction », les caractéristiques, angle de frottement « $\tan \varphi$ » et cohésion « c » du sol sont réduites progressivement jusqu'à l'obtention de la rupture [4 - 7]. Le coefficient total « ΣM_{sf} » permet de définir des caractéristiques du sol à une étape donnée de l'analyse [1, 2, 7].

$$\Sigma M_{sf} = \frac{C_{don}}{C_{réduit}} = \frac{\tan \varphi_{don}}{\tan \varphi_{réduit}} \quad (1)$$

Les caractéristiques notées « don » se réfèrent aux propriétés entrées dans les caractéristiques des matériaux. Quant aux caractéristiques notées « réduit » elles se rapportent aux valeurs réduites utilisées au cours de l'analyse. $\Sigma M_{sf} = 1$ au début d'un calcul pour utiliser les valeurs non réduites des caractéristiques des matériaux. Les caractéristiques sont réduites progressivement jusqu'à l'apparition de la rupture, caractérisée par un coefficient F_s . Le coefficient de sécurité F_s dans les problèmes géotechnique est basé sur le concept de la mobilisation des contraintes dans le sol.

$$\tau = c^n + \sigma \cdot \tan \varphi^n \text{ avec } , c^n = \frac{c}{F_s} \text{ et } \tan \varphi^n = \frac{\tan \varphi}{F_s} \quad (2)$$

où, c_n et φ_n sont respectivement la cohésion mobilisée et l'angle de frottement interne mobilisé du critère de Mohr-Coulomb. F_s caractérise l'équilibre entre les efforts moteurs et les efforts résistants :

- $F_s \geq 1$: le talus est stable, sachant qu'on recherchera $F_s \geq 1,5$ dès que les constructions seront susceptibles d'être concernées par l'instabilité ;
- $F_s < 1$: il y a rupture. Ceci entraîne de grandes déformations et de ce fait la géométrie du talus est partiellement modifiée (à l'endroit de la zone de rupture). Il faut alors prendre des hypothèses portant sur des caractéristiques des matériaux glissées ou remaniées.

Dans cette méthode, le facteur de sécurité F_s représente la valeur de M_{sf} à la rupture. Cette approche ressemble à la méthode de calcul des coefficients de sécurité adoptée conventionnellement dans les analyses de rupture circulaire.

2-3. Détermination des valeurs des paramètres de Mohr-Coulomb

2-3-1. Données expérimentales du talus

Les données expérimentales utilisées sont extraites d'une campagne d'essais de laboratoire géotechnique du ravin de Kotto. Outre les essais d'identification, le programme expérimental a comporté des essais triaxiaux de consolidation isotrope et des essais triaxiaux de cisaillement drainé. Les éprouvettes soumises aux essais ont été découpées dans des blocs prélevés au front de taille du ravin à différentes profondeurs. Le **Tableau 1**, résume les valeurs moyennes des paramètres d'identification des sols du talus. La **Figure 7** présente les courbes granulométriques des trois échantillons prélevés sur le site et analysés au laboratoire.

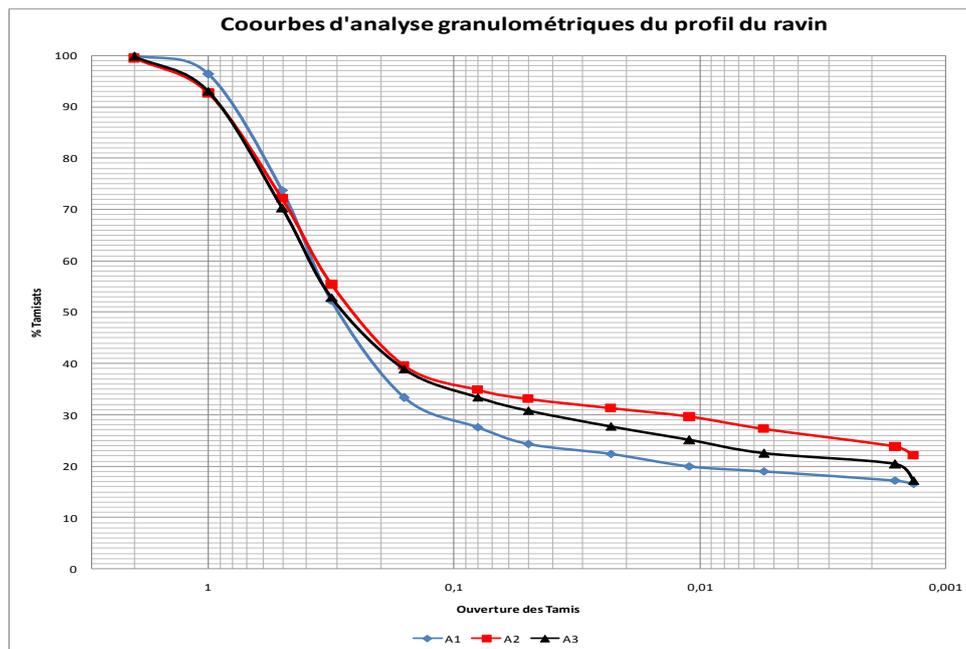


Figure 7 : Courbes granulométriques des trois échantillons prélevés sur le profil du massif

Tableau 1 : Valeurs moyennes des paramètres d'identification du site

Série	Paramètres d'identifications physiques									
	Yd	Ys (kN/m ³)	Yh (kN/m ³)	Ysat (kN/m ³)	Y' (kN/m ³)	e	perméabilité k(m/s)	n	Sr	Wnat (%)
A1-KO de 0,3 à 1,1m	15,80	25,70	18,42	19,65	9,70	0,627	0,000229	0,385	0,681	16,56
A2-KO de 1,1 à 5,7m	15,60	25,80	18,25	19,55	9,60	0,654	0,0000147	0,395	0,671	16,99
A3-KO de 5,7 à 7,3m	15,30	25,60	18,66	19,32	9,30	0,673	0,00000604	0,402	0,835	21,98

2-3-2. Détermination des paramètres c' et φ'

Le critère de Mohr-Coulomb, représenté sur le plan de rupture $p' - q$ (**Figure 8**), est une droite de pente θ et d'ordonnée à l'origine δ . les paramètres c' et ϕ' sont équivalents à $\phi' = \arcsin(\tan \delta)$ et $c' = \delta / \cos \phi'$. Les valeurs de c' et ϕ' déterminées par cette méthode sont affichées sur le plan de rupture de chaque échantillon.

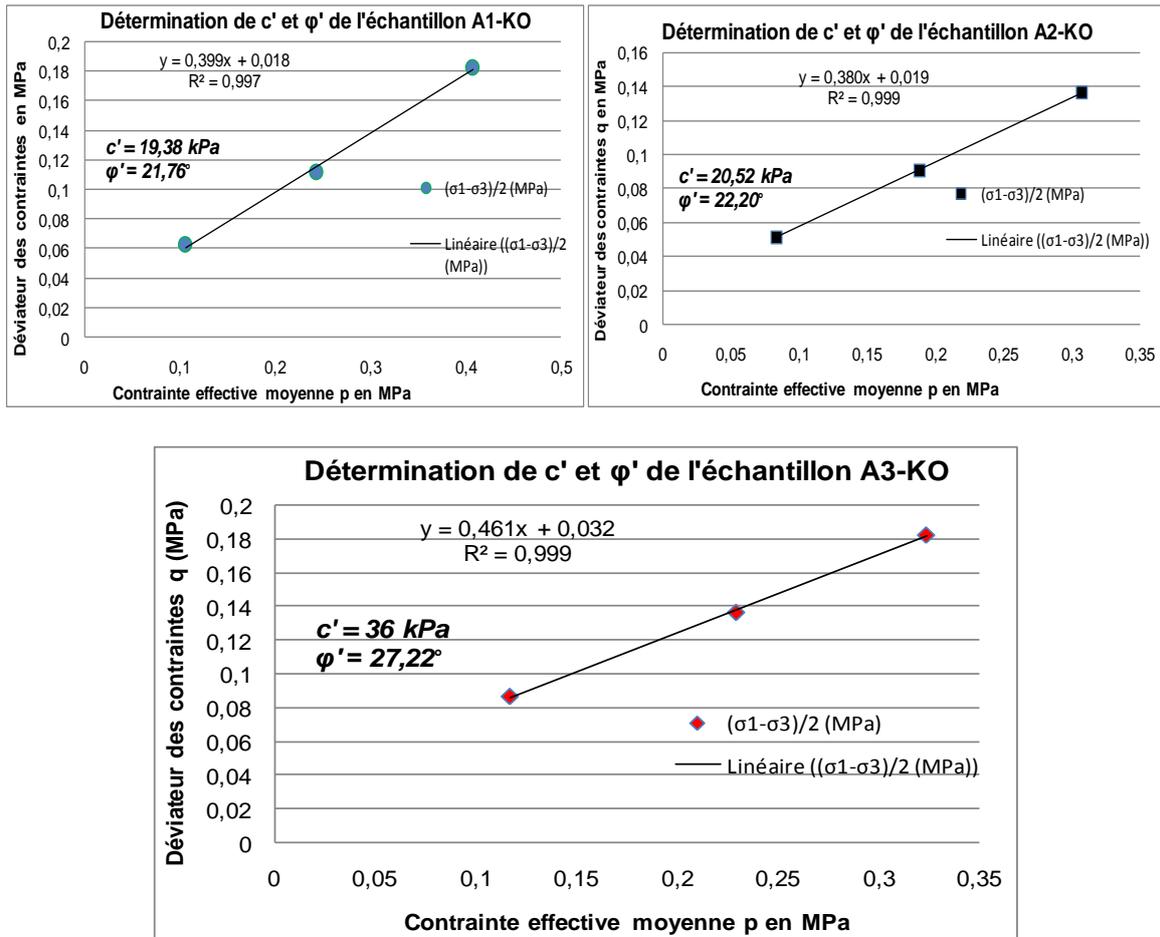


Figure 8 : Représentation de l'état critique du massif de sol dans le plan p' q

Outre, les paramètres c' et ϕ' , un autre paramètre dépendant est déterminé, il s'agit de l'angle de dilatance, au sens du critère de Mohr-Coulomb, sa valeur est consignée dans le **Tableau 2**.

2-3-3. Paramètres d'élasticité linéaire isotrope

Il s'agit du module d'Young E et du coefficient de Poisson ν . Ces deux paramètres ont été déterminés à partir des courbes de contrainte - déformation et de contractance - dilatance des échantillons lors des essais triaxiaux. Les paramètres estimés pour les trois échantillons sont présentés dans le **Tableau 2**.

Tableau 2 : Paramètres d'élasticité isotrope et de Mohr-Coulomb

Profil / échantillon	E (kPa)	ν	Dilatance Ψ' (en degré)
A1-KO de 0,3 à 1,1 m	4800	0,38	0
A2-KO de 1,1 à 5,7 m	10000	0,38	0
A3-KO de 5,7 à 7,3 m	10630	0,35	0

Le modèle de Mohr-Coulomb, qui est implémenté dans le code PLAXIS, utilise donc cinq paramètres [1, 2, 8 - 10], deux paramètres de la loi de Hooke (E et ν) et trois paramètres dépendant du critère de rupture du matériau, cohésion effective c' , angle de frottement interne effectif ϕ' et l'angle de dilatance Ψ' .

2-4. Application à l'évaluation de la stabilité du ravin de Kotto avec PLAXIS

2-4-1. Maillage et conditions aux limites

Dans cet article, seule la moitié gauche du ravin est modélisée (voir coupe de ravin sur la **Figure 4**). Le talus analysé est modélisé par une portion rectangulaire de largeur 106 mètres sur 43,75 mètres de hauteur (**Figure 9**). Le massif de sol en présence correspond à une couche de sable argileux. La géométrie du problème permet un espace de travail à deux dimensions en déformations planes avec des éléments finis triangulaires à 15 nœuds à haute précision [1, 8, 9, 11, 12]. Le modèle mécanique associé au maillage est celui de Mohr-Coulomb dont les paramètres ont été déterminés et présentés sur la **Figure 8** et les **Tableaux 1 et 2** de la partie 2-3. Les conditions aux limites du modèle sont standards (**Figure 9**): Le modèle est bloqué en déplacements horizontaux sur ses frontières verticales gauches et droites et en déplacements (horizontaux et verticaux) sur sa base qui est le plan d'encastrement du substratum.

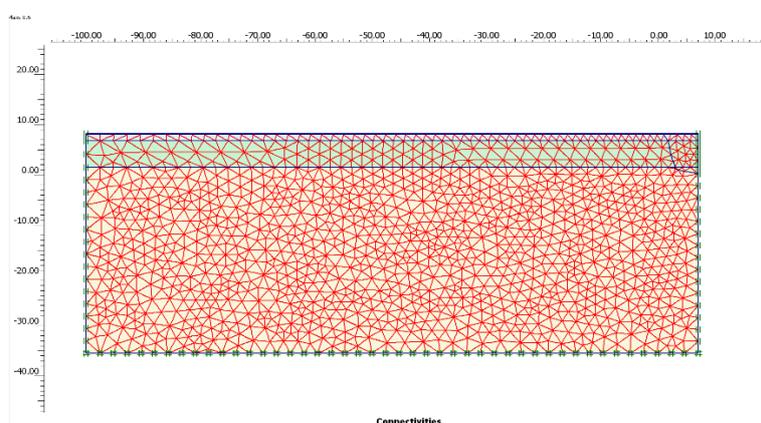


Figure 9 : Maillage du modèle 2D en déformation plane du flanc gauche du ravin de Kotto

2-4-2. Chargement et conditions initiales

Dans cette partie, nous générons les contraintes initiales dans le ravin en fonction du niveau de la nappe phréatique dans le sol. Une prise en compte d'un poids volumique de l'eau d'une valeur de $10 \text{ kN} / \text{m}^3$ est nécessaire pour générer les contraintes initiales dans le massif de sol. Une frontière en consolidation est ensuite créée sur les bords gauches, droites et à la base du modèle pour éviter la dissipation dans ces directions. Les pressions interstitielles générées dans le modèle sont affichées sur la **Figure 10**. La valeur maximale vaut $381,52 \text{ kPa}$ à la base du modèle. La contrainte effective maximale dans le modèle est de $468,48 \text{ kPa}$.

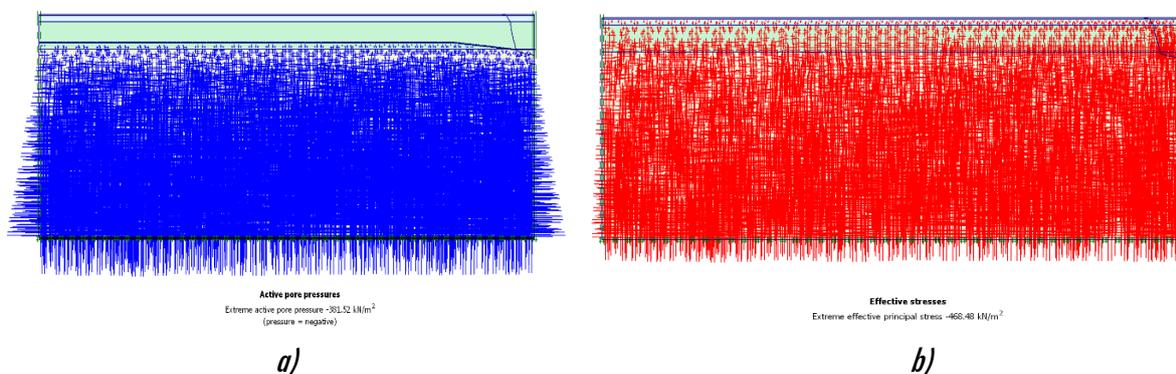


Figure 10 : Contraintes initiales dans le massif de sol du ravin de Kotto : a) Pressions interstitielles, b) Contraintes effectives

Afin d'évaluer la fiabilité du calcul numérique à partir du maillage d'éléments finis présenté plus haut, les contraintes initiales dans le modèle peuvent être obtenues théoriquement par les formules classiques de Terzaghi.

- La pression interstitielle est équivalente à : $\gamma_w \times z$, le point le plus élevé de la nappe phréatique dans le massif de sol est à la cote + 2,7 m du modèle (**Figure 9**). Soit $z = 35,5 + 2,7 = 38,2$ m ; d'où $u = 10 \times 38,2 = 382$ kPa ;
- La contrainte effective vaut : $\gamma_h \times z_1 + (\gamma_{sat} - \gamma_w) \times z$, le point le plus élevé de la nappe phréatique est à la cote + 2,7 m. Donc $z = 35,5 + 2,7 = 38,2$ m ; et $z_1 = 8,25 - 2,7 = 5,55$ m. d'où $\sigma' = 18,42 \times (8,25 - 6,75) + 18,25 \times (6,75 - 2,7) + (19,55 - 10) \times (2,7 - 1,5) + (19,32 - 10) \times (1,5 + 35,5) = 457,8425$ kPa.

Les valeurs théoriques de la pression interstitielle et de la contrainte effective initiale sont équivalentes aux valeurs obtenues par modélisation numérique sur PLAXIS.

3. Résultats et discussion

Dans cette partie, le calcul est effectué suivant deux phases, la première phase correspond à la mise en place d'un chargement triangulaire (**Figure 11**), correspondant à une surcharge à la surface du modèle, celle-ci, correspond aux différents dépôts superficiels qui se font sur la couverture supérieure du ravin liés éventuellement à l'érosion. Une valeur de 70 kPa, a été prise en compte pour ce chargement. Le calcul est de type plastique dans cette première phase. La deuxième phase de calcul qui est l'ultime phase correspond à l'analyse de la stabilité au grand glissement en faisant un calcul de type « c-phi reduction ». Lorsqu'un calcul est effectué pour évaluer les risques potentiels de rupture de pente, c'est la stabilité au grand glissement qui est recherchée [13, 14]. En d'autres termes, comme dans le cas de toutes les pentes instables, c'est le facteur de sécurité qui est recherché. D'après les règlements, sa valeur fournit des informations précieuses permettant d'apprécier qualitativement l'état du ravin ou du talus [15, 16]. Les déplacements verticaux et horizontaux obtenus après la phase 1 de calcul sont affichés sur la **Figure 11**. Les contraintes principales, la contrainte déviatorique ainsi que la pression interstitielle sont présentées sur les **Figures 12 à 14**. La **Figure 15** présente la cartographie de la surface de rupture du massif de sol après la deuxième phase de calcul par la méthode « c-phi reduction ».

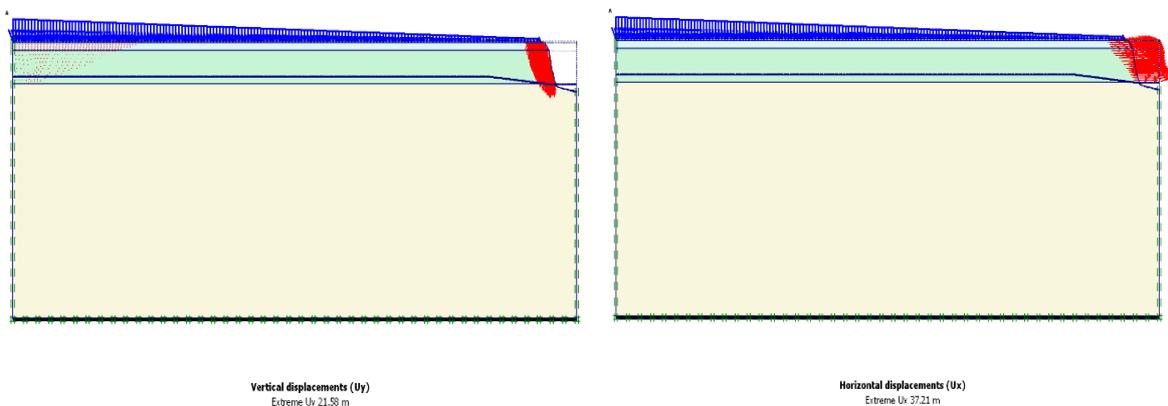


Figure 11 : Déplacements verticaux et horizontaux dans le modèle après la phase 1 de calcul

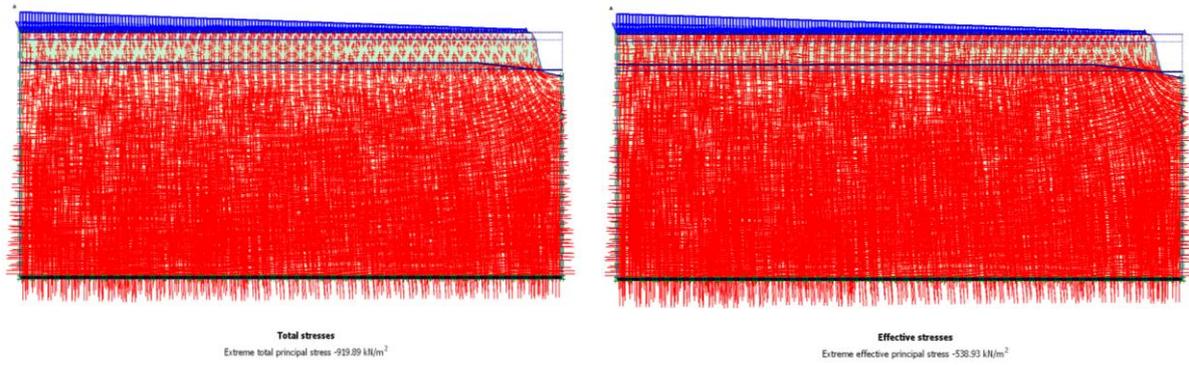


Figure 12 : Contraintes totales principales et contraintes effectives principales dans le modèle après la phase 1 de calcul

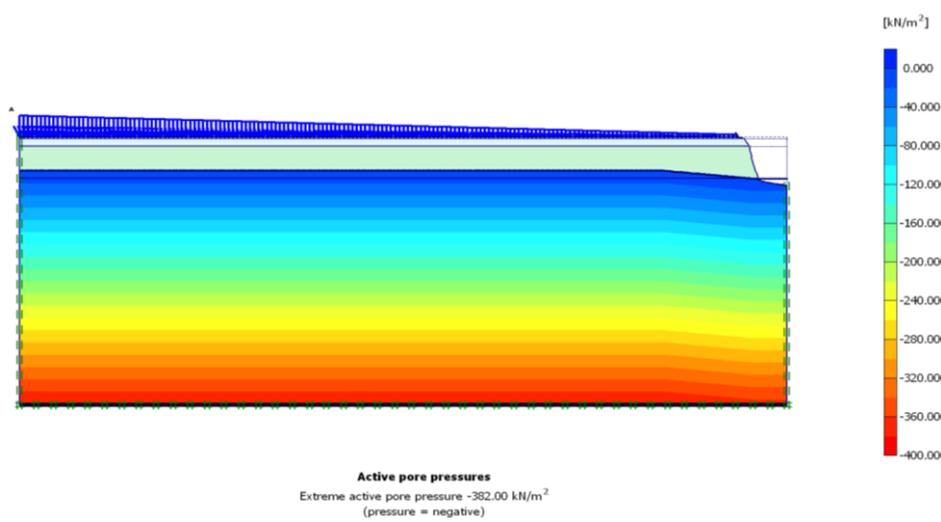


Figure 13 : Cartographie de variation de la pression interstitielle dans le modèle après la phase 1 de calcul

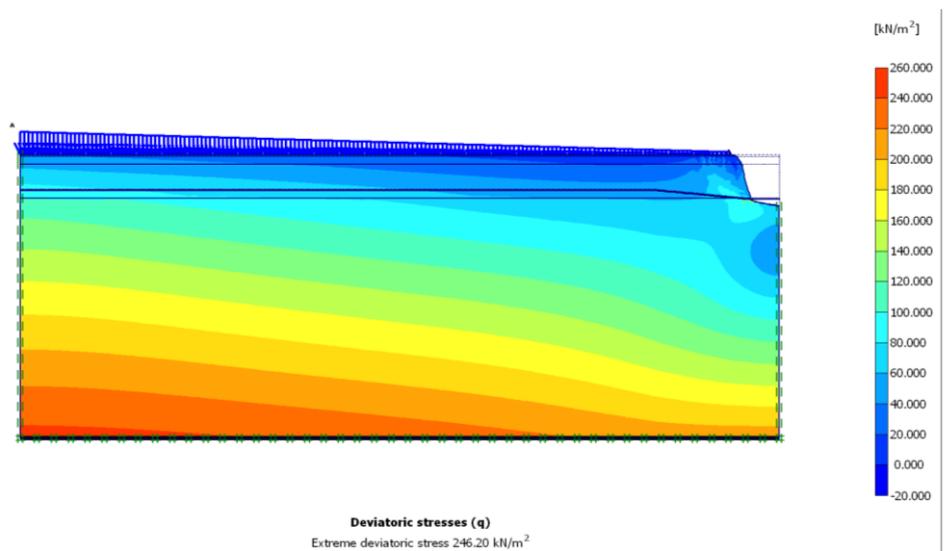


Figure 14 : Cartographie de variation de contrainte déviatorique dans le modèle après la phase 1 de calcul

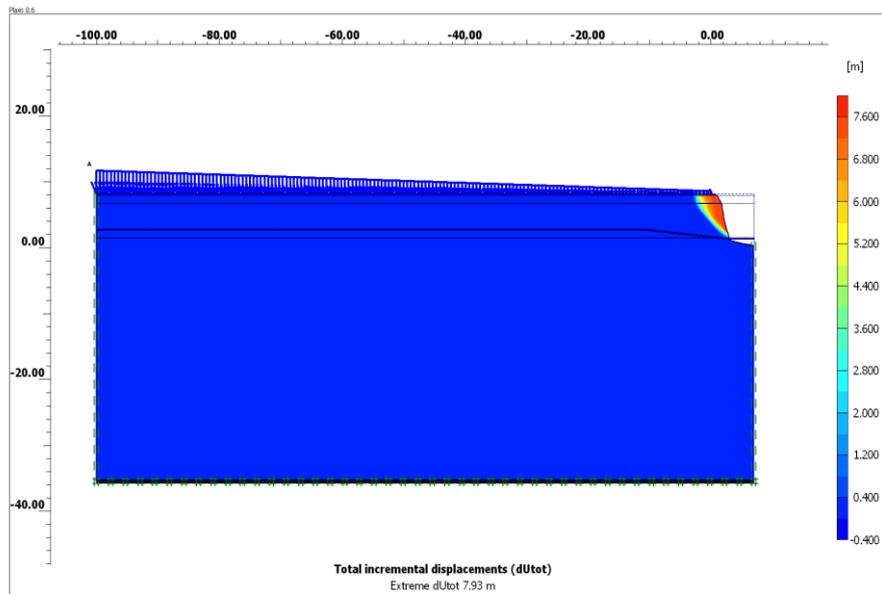


Figure 15 : Déplacements incrémentaux dans le modèle et surface de rupture du massif après la phase 2 de calcul de stabilité par la méthode « c-phi reduction » de PLAXIS

Après cette ultime étape, le facteur de sécurité F_s trouvé par la méthode « c-Phi réduction » de PLAXIS, vaut 1,036 pour ce talus. En se référant aux critères de stabilité au grand glissement des ouvrages géotechniques de l'Eurocode 7, il ressort que les flancs du ravin de Kotto sont très instables. Une confortation des flancs de ce talus par des méthodes géotechniques appropriées de renforcement telles que le clouage industriel, les tirants d'ancrage ou la terre armée est nécessaire pour sa stabilité au grand glissement. Les valeurs de c_n et φ_n mobilisées du critère de Mohr-Coulomb dans le calcul « c-phi reduction » de PLAXIS du ravin de Kotto sont présentées dans le **Tableau 3** ci-dessous.

Tableau 3 : Paramètres de Mohr-Coulomb mobilisés dans le calcul c-phi reduction

Profil / échantillon	c' (kPa)	c'_n (kPa)	ϕ' (degré)	ϕ'_n (degré)
A1-KO de 0,3 à 1,1 m	19,38	18,71	21,76	21,07
A2-KO de 1,1 à 5,7 m	20,52	19,81	22,20	21,50
A3-KO de 5,7 à 7,3 m	36,00	34,75	27,22	26,40

4. Conclusion

Dans le cadre d'un projet de construction des grands ouvrages géotechniques, il est nécessaire de vérifier chaque phase des travaux pour s'assurer que la stabilité est garantie durant les phases provisoires et définitives. Dans le cadre de cette analyse, la géologie du site présente un terrain de nature peu perméable et des efforts dus à des pressions interstitielles survenant après une pluie diluvienne impactent la stabilité du talus. Des solutions alternatives de renforcement (clouage industriel, tirants d'ancrage, terre armée), couplées aux modèles avancés de comportement des sols fins, et la méthode « c-phi reduction » seront analysées dans nos travaux futurs afin de consolider cette méthode originale et d'en déterminer la solution technico-économique.

Références

- [1] - PLAXIS[®], “Finite Element Code for Soil and Rock Analyses”, *Reference manual*, Vol. 8 (2012) 178 p.
- [2] - PLAXIS[®], “Finite Element Code for Soil and Rock Analyses”, *Material Models Manual*, Vol. 8 (2016) 218 p.
- [3] - C. F. OSSENDE OWONA, “Instabilité géomorphologique des sols de la ville de Douala : Cas du ravin de Kotto”, Mémoire de Master 2 en Sciences Géotechniques et Hydrotechniques, Département des Sciences de la Terre, Université de Yaoundé 1, (2011) 129 p.
- [4] - J. M. DUNCAN, C. Y. CHANG, “Nonlinear analysis of stress and strain in soil”, *Journal of Soil Mech. Found. Div. ASCE96*, (1970) 1653 - 1692
- [5] - M. HUSEIN, “Etude du comportement différé des sols et des ouvrages géotechniques”, Thèse de Doctorat, Université Joseph Fourier-Grenoble 1, France, (2001) 272 p
- [6] - N. JANBU, “The resistance concept applied to soils”, *Proceedings of the 7th ICSMFE*, Mexico City, Vol. 1 (1985) 191 - 196
- [7] - R. BRINKGREVE, H. BAKKER, “Non-linear finite element analysis of safety factors c-phi reduction”, *Proceedings of the 7th International Conference on Computer Methods and Advances in Geomechanics*, Balkema, Rotterdam, The Netherlands, ISBN 70 6191 1893, (6 - 10 may 1991) 1116 - 1123
- [8] - D. ZOA AMBASSA, “Cours d’éléments finis, 4^e année, élèves ingénieurs géotechniciens”, Polytech Grenoble, France, (2014) 165 p.
- [9] - D. ZOA AMBASSA, “Cours d’Application des éléments finis/Modélisation numérique des ouvrages, 4^e année, élèves ingénieurs géotechniciens”, Polytech Grenoble, France, (2014) 57 p.
- [10] - A. CUVILLIER, H. MROUEH, F. VAN LAETHEM, “Modélisation numérique du recul des falaises argileuses”, *Actes des Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l’ingénieur*, Lille, France, (28 - 30 juin 2004) 293 - 302
- [11] - MESTAT P., “Maillage d’éléments finis pour les ouvrages de géotechnique: Conseils et recommandations”, *Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées*, N° 212 (novembre-décembre 1997) 39 - 64
- [12] - P. D. NGUYEN, “Modélisation numérique des soutènements d’excavation”, Thèse de Doctorat, ENPC, France, (2003) 297 p.
- [13] - T. YANG, R. MAN-CHU, B. YANG, Y. YANG, “Three-dimensional stability of landslides based on local safety factor”, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, (2016)
- [14] - A. KAYA, S. ALEMDAG, S. DAG, Z. GUROCAK, “Stability assessment of high-steep cut slope debris on a landslide”, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, (2015)
- [15] - R. DEY, R. HAWLADER, R. PHILLIPS, “Modeling of large-deformation behavior of marine sensitive clays and its application submarine slope stability analysis”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 53 (2016) 1138 - 1155
- [16] - S. ALEMDAG, A. KAYA, M. KARADAG, F. BULUT, “Utilization of the Limit Equilibrium and Finite Element Methods for the Stability Analysis of the Slope”, *Journal of African Earth Sciences*, (2017)