

Impact des effluents de déchets miniers sur la résistance au cisaillement des sols latéritiques compactés utilisés dans les digues de confinement des rejets (RD Congo)

[Impact of mining waste effluents on the shear strength of compacted lateritic soils used in waste containment dikes (DR Congo)]

G. MUKOKO KALENDA^{1,2}, Y. KIYUKENO KITWANYOKA¹, G. LILE AMISI¹, G. MUKENA MWABA¹, D. VERASTEGUI²,
and K. GUERRIER³

¹Université de Lubumbashi, Département de Génie Civil, 1825 Lubumbashi, RD Congo

²Université Catholique de Louvain, Pôle Génie-Civil et Environnemental (GCE), 1348 Louvain-la-Neuve, Belgium

³ Université d'Etat d'Haïti, Unité de Recherche en Géotechnique (URGéo), Port-au-Prince, Haïti

Copyright © 2016 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the *Creative Commons Attribution License*, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: In most cases of failure of dikes, hydraulic fracturing is the evoked main cause. Several authors analyzed the properties of soils under mechanic and hydric solicitation. However, these analyses do not take into account the chemical influence of the liquid percolating the matrix of soil. This article analyzes the impact of the liquid effluents emanating from ore concentrators on the behavior of compacted lateritic soils in waste containment dikes. It emphasizes the shear strength parameters of the compacted laterites and percolated by liquid effluents with different chemical nature. Demineralized water was taken as prototype. The tests include the shear strength measures consolidated drained and undrained when the specimens were imbided with the different fluids. The results show that acid and basic liquid effluents affect the shear strength parameters and the strain modules are appreciably modified. The effect of the initial suctions and the density before the imbibition was also investigated, what reveals that the fall of shear strength parameters of lateritic soils, on wetting path (during the passage of the state partially saturated in the saturated state), is all the rougher as the moisture content of implementation during compaction is widely lower than the optimum water content. However, structural changes caused by initial saturation and density of specimens seem to be more important for explaining the volumetric and deviator behavior than chemical interaction

KEYWORDS: mining waste effluents, lateritic soil, chemical interaction.

RESUME: Dans la plupart des cas de rupture des digues, le craquage hydraulique est la principale cause évoquée. Plusieurs auteurs ont analysé les propriétés des sols sous sollicitation mécanique et hydrique. Cependant, ces analyses ne tiennent pas compte de l'influence chimique du liquide percolant la matrice de sol chimisorbé. Cet article analyse l'impact des effluents liquides issus de concentrateurs de minerai sur le comportement des sols latéritiques compactés dans les digues de retenue des rejets miniers. Il met l'accent sur les paramètres de résistance au cisaillement des latérites compactés et percolé par les effluents liquides de nature chimique différente. L'eau déminéralisée a été prise comme prototype. Les tests comprennent les mesures de résistance au cisaillement consolidées drainés et non drainés lorsque les éprouvettes ont été saturées avec les différents liquides. Les résultats montrent que les effluents liquides acides et basiques influent sur les paramètres de résistance au cisaillement et les modules de déformation sont sensiblement modifiés. L'effet des succion et densité initiales avant l'imbibition a également été étudié, ce qui révèle que la chute des paramètres de résistance au cisaillement des sols latéritiques, sur chemin de mouillage (lors du passage de l'état partiellement saturé à l'état saturé), est d'autant plus importante que la teneur en humidité de la mise en œuvre au cours du compactage est largement inférieure à la teneur en

eau optimale. Cependant, les changements structurels causés par la saturation initiale et la densité des éprouvettes semblent être plus importants pour expliquer le comportement déviatorique que l'interaction chimique

MOTS-CLEFS: effluents de déchets miniers, sol latéritique, interaction chimique.

1 INTRODUCTION

Les effets chimiques de percolation des effluents liquides de rejets miniers sur les paramètres de résistance au cisaillement et le module de déformation des sols latéritiques compactés, utilisés dans la construction des digues de retenue des rejets miniers au Katanga (RD Congo), sont étudiés dans cet article. Les paramètres de résistance au cisaillement consolidés drainés et non drainés ont été mesurés en utilisant de l'eau distillée, des effluents liquides basique et acide émanant des concentrateurs à minerais. Le comportement déviatorique a été analysé par des essais de cisaillement triaxial consolidé drainé (CD), consolidé non drainé (CU) et non consolidé-non drainé (UU). La succion initiale avant imbibition a été analysée au travers des essais UU et a révélé avoir un impact significatif sur le comportement observé.

L'interaction de la fraction d'argile contenue dans le sol latéritique avec des ions contenus dans les effluents liquides percolant la matrice de sol est un aspect lié à la succion osmotique [1], difficile à interpréter dans les tests classiques de sol saturé. Cette interaction explique le changement du comportement déviatorique observé en remplaçant l'eau distillée par les effluents liquides acide ou basique.

2 EQUIPEMENTS ET MATERIAUX UTILISES DANS CETTE ÉTUDE

2.1 EQUIPEMENTS ET MÉTHODES UTILISÉES

Pour la caractérisation physique, nous avons effectué une analyse granulométrique par voie sèche et par voie humide selon la norme CME 01.01. La teneur en eau a été déterminée par la méthode d'étuvage selon les normes NF P94-050 et NBN 589-203. La détermination de la masse volumique absolue s'est faite au pycnomètre selon la procédure: N03-09. Les limites d'Atterberg ont été obtenues selon la norme NF P94-051 et la limite de retrait suivant la procédure Peltier 108. Le poids volumique maximal sec ainsi que la teneur en eau optimum ont été obtenus par un essai Proctor Normal selon la norme NF P 94-093. Les matériels utilisés sont des appareils classiques de laboratoire qui ne nécessitent aucune description particulière.

2.2 LES MATERIAUX UTILISES DANS CETTE ETUDE: LATÉRITES ET EFFLUENTS LIQUIDES

Le sol étudié est la latérite utilisée dans la construction des remblais routiers et des digues de retenue des rejets miniers par les entreprises minières et de génie civil de l'ex Katanga en R.D. Congo. La densité moyenne de particules solides est de $G_s = 2,77$. Les échantillons ont été prélevés à Kakanda sur la grande digue de Kakanda, à Kipushi sur la digue de Kipushi et dans des carrières où les matériaux de remblais routiers sont extraits.

Les proportions pondérales sur le sol brut (figure 1-a) et sur la fraction inférieure à 2 mm (figure 1-b) nous confèrent environ 31 et 19% ; 71 et 41% d'argiles respectivement pour les latérites de Kakanda et Kipushi.

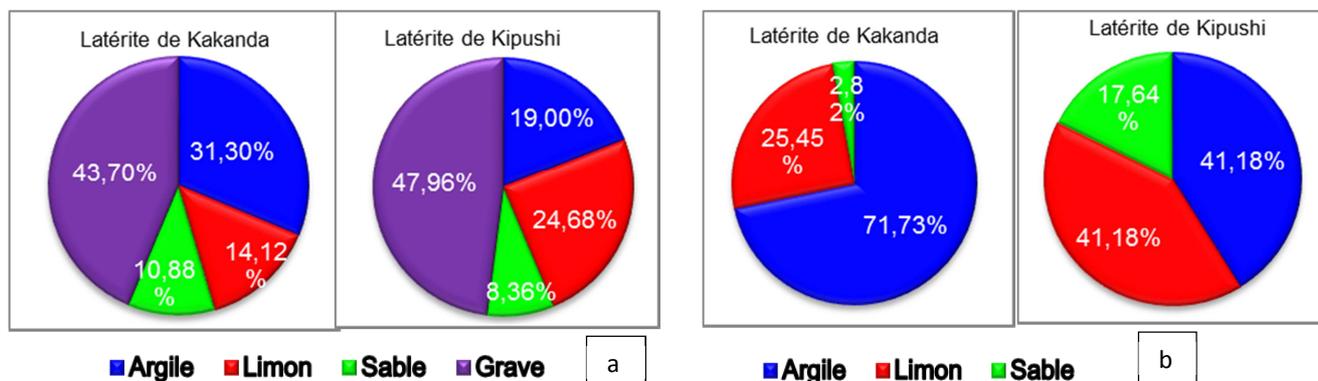


Figure 1: Fractions granulométriques de latérite sur l'échantillon brut (gauche a) et sur le tamisât au 2 mm (droite b)

Les effluents liquides utilisés proviennent des bassins de rétention des digues de Kakanda et de Kipushi. Ils ont un pH faiblement basique se situant entre 7,5 et 8,7 pour Kakanda et faiblement acide pour Kipushi avec des valeurs comprises entre 5,9 et 6,5 [2]. Ces effluents liquides ont été échantillonnés dans les différents bassins de rétention dans l'intervalle de 3 ans sur différentes périodes de l'année. La figure 2 présente les variations de pH durant ces trois ans.

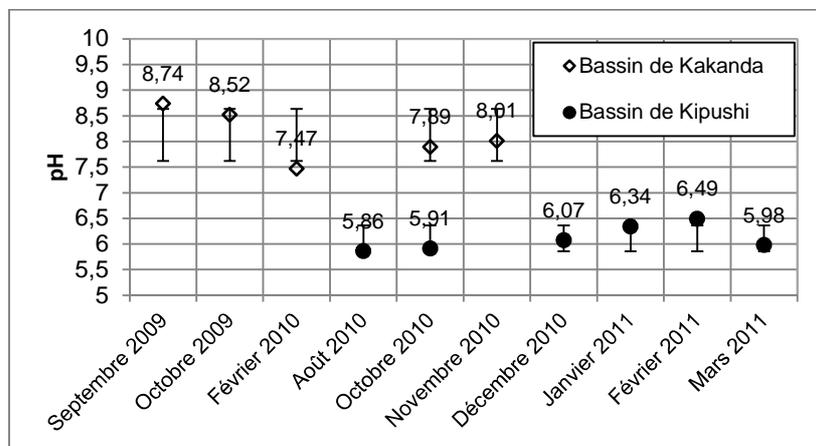


Figure 2: Variation de pH au fil du temps

La composition chimique des effluents liquides utilisés dans cette étude est présentée dans le tableau 1. Le dosage des éléments chimiques (chimie totale) a été fait par fusion au métaborate et tétraborate de Lithium suivie d'une mise en solution et une analyse des éléments par spectrométrie d'émission atomique ICP AES (Inductively Coupled Plasma Absorption Emission Spectral), modèle ICAP 2500. Les valeurs des mesures présentées dans le tableau 1 et sur la figure 2 sont des moyennes sur une trentaine de mesures faites pour le pH et une dizaine pour la composition chimique.

Tableau 1 : Composition chimiques des effluents liquides

Soil	Éléments chimiques [ppm]													
	Al	Ca	K	Mg	Mn	Na	P	S	Fe	Co	Cu	Zn	Ni	Pb
Kakanda	3	11,9	68	58	0,313	274	2,4	290	65,4	6,87	5,9	0,09	0,03	0,02
Kipushi	200	328	22	1058	130	405	1,6	2693	70	81	350	35	1	<0,01

Le tableau 1 montre la concentration en éléments polluants, ces éléments qui polluent l'eau des bassins des digues ne sont tout de même pas en quantité faible au regard de la législation en vigueur en RDC (annexe XI du code minier de la RDC) [3]. Ces ions contenus dans les effluents liquides ont une influence sur les propriétés de la fraction argileuse de la latérite.

La classification usuelle des polluants comprend: les polluants chimiques solubles; les métaux lourds; et les composés hydrocarbonés dérivés du pétrole brut parmi les polluants, on distingue trois catégories à savoir: métalliques (métaux lourds), minéraux (Ca, Mg, Na, K, Fe, Si, Sr, Ti, Al, N, Cl, F, P, S et cyanures) et organiques (comprenant entre autres les hydrocarbures, les alcools, les phénols, les esters, les sulfures, les pesticides...) [04].

Les minéraux cristallins ont été identifiés par diffraction de rayons X (DRX). L'appareillage utilisé comprend le diffractomètre D8 Advance de Brüker (cuka, $\lambda = 0,15418$ nm, 40 kV, 30 mA et $2\theta = 1/2$ min), muni d'une anticathode en cuivre et une baie de mesure (Philips PW 1710) pilotée via un ordinateur par le logiciel PC-APD.

Les minéraux argileux ont été identifiés sur la fraction < 2 microns. L'argile a été respectivement saturée par les ions K et Mg. L'argile traitée au potassium a été soumise au chauffage à 105, 300 et 550°C, celle traitée au magnésium a suivi le traitement à la solvatation à l'éthylène glycol (Mg eg). Les spectres ont été obtenus sur les échantillons orientés, leurs interprétations montrent que les minéraux argileux sont principalement de la kaolinite et de l'illite présents dans tous nos échantillons. La Capacité d'Echange Cationique (CEC) mesurée par la méthode à l'acétate d'ammonium à pH 7 confirme la présence des minéraux argileux non gonflants et donc moins actives.

• *Composition minéralogique des échantillons des latérites*

En se basant sur les formules chimiques des minéraux secondaires néoformés lors de processus de latérisation, les résultats des analyses chimiques élémentaires (chimie totale, DCB) et minéralogiques (DRX, MEB), nous avons pu déterminer par calcul les quantités approximatives des minéraux majeurs contenus dans nos échantillons. L'approche consiste à considérer le bilan de masse entre les compositions chimiques mesurées exprimées en oxydes d'éléments chimiques contenus dans le sol et les compositions chimiques classiques des minéraux monophasiques, en principe, de même nature que ceux identifiés par la DRX dans les échantillons analysés [5]. Le Tableau 2 présente la composition minéralogique (en % massique).

Tableau 2. Composition minéralogique des échantillons de latérite et oxydes contenus dans le sol

Minéraux	Kakanda	Kipushi	Oxydes	Kakanda	Kipushi
Quartz [%]	32,90	45,70	SiO ₂ [%]	56,27	66,34
Kaolinite et Halloysite [%]	34,87	19,77	TiO ₂ [%]	1,10	1,06
Illite [%]	11,64	16,24	Al ₂ O ₃ [%]	16,31	15,62
Muscovite ou feldspath	2,23	4,93	Fe ₂ O ₃ [%]	15,29	8,78
Hématite [%]	-	8,78	MgO [%]	0,38	0,53
Goëthite [%]	17,02	-	MnO [%]	0,02	0,01
Corindon [%]	-	3,02	CaO [%]	0,08	0,06
Anatase [%]	1,10	1,06	K ₂ O [%]	1,15	1,82
Calcite [%]	0,18	0,14	Na ₂ O [%]	0,29	0,59
Pyrolusite [%]	0,02	0,01	PF* [%]	8,83	5,01
Total[%]	99,96	99,65	Total [%]	99,72	99,82

3 IMPACTS DES INFLUENTS LIQUIDES SUR LES PARAMETRES DE RESISTANCE AU CISAILLEMENT DE LATERITES COMPACTEES

Dans le but d'analyser le comportement déviatorique du sol en présence d'un milieu favorable à l'échange ionique, les éprouvettes ont été confectionnées avec les mêmes paramètres initiaux et saturées à l'eau polluée issue des bassins de rétentions ou à l'eau distillée.

L'appareil triaxial de révolution utilisé lors de nos travaux est constitué d'une cellule triaxiale de type Bishop et Wesley [6] et d'un système de chargement. Le tout est relié à un système d'acquisition. L'éprouvette de forme cylindrique est placée dans une enceinte étanche, qui est reliée aux différents systèmes de mise en pression et de mesure. La cellule est remplie du liquide (de l'eau déminéralisée ou des effluents liquides), ce qui permet d'appliquer à l'éprouvette un champ de contrainte isotrope lors de la consolidation et anisotrope lors de l'écrasement (cisaillement). Les contrôleurs de pression volume (de marque GDS) sont utilisés pour appliquer les sollicitations sur l'éprouvette. Les sollicitations dépendent du type d'essai, qui peut être soit un essai drainé ou non drainé, soit un essai avec ou sans phase de saturation, de consolidation (isotrope ou anisotrope), suivie par une phase de cisaillement (drainé ou non drainé). Ces essais triaxiaux ont été pilotés en vitesse de déformation constante (0,2062. [mm/min]), sous des pressions de confinement σ_3 de 100, 150, 200 et 300 kPa.

L'effet des succions et densités initiales avant l'imbibition a été aussi examiné en préparant certaines éprouvettes plus ou moins sèches avec une teneur en eau très faible et en les soumettant à des essais non consolidé – non drainé. En effet, lorsqu'on prélève un échantillon, il a une humidité initiale et donc une succion initiale que l'on peut déduire de la courbe de rétention. De même, lorsqu'on reconstitue des échantillons, on les soumet à une certaine succion et en les cisillant directement, on peut avoir une idée de l'effet de la succion initiale sur les caractéristiques de résistance du sol. Mais un inconvénient est que l'état de l'échantillon n'est ni sur le chemin de séchage, ni sur le chemin de mouillage de la courbe de rétention.

3.1 INFLUENCE SUR L'ANGLE DE FROTTEMENT INTERNE ET LA COHESION NON DRAINEE DE LATERITE COMPACTEE

3.1.1 EFFET DE L'EFFLUENT LIQUIDE ACIDE OU BASIQUE DES BASSINS DE RETENTION SUR LES PARAMETRES DE CISAILLEMENT

L'influence de la pollution sur la réponse des sols latéritiques au chargement triaxial monotone non drainé est décrite dans les figures qui suivent. Sous même état initial ($\gamma_d = 17,31 \text{ kN/m}^3$ et $w = 14,95\%$), la figure 3 présente les enveloppes de rupture de Mohr-Coulomb et les paramètres de cisaillement γ afférents. Il ressort que la pollution acide diminue la cohésion, avec une légère augmentation du frottement interne. Ce constat est fait sur une quinzaine d'essais dont la répétabilité semble uniforme comme le montre les figures 4 et 5.

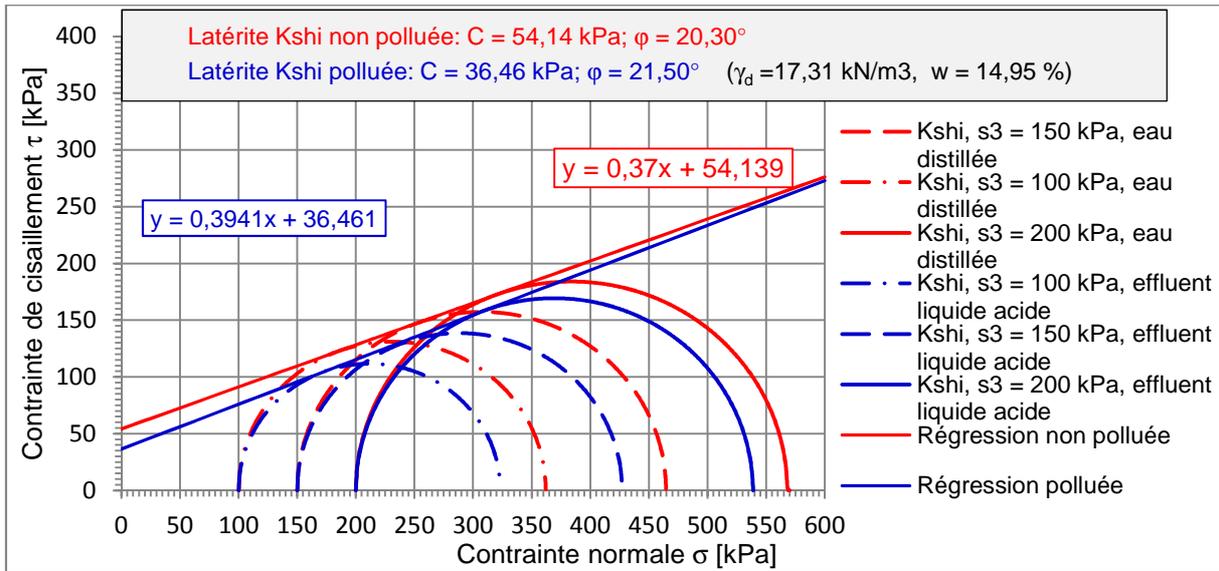


Figure 3: Cercle de Mohr et droite intrinsèque pour le sol de Kipushi

Par contre, il y a une augmentation de plus ou moins 42% de la cohésion effective et une diminution de l'angle de friction en conséquence de la contamination par l'effluent liquide basique pour les éprouvettes testées à 90% de la densité sèche OPN pour le sol de Kakanda (figure 4). Cette augmentation de la cohésion pourrait être attribuée à l'apport des cations échangeables par l'effluent liquide basique dans les ligands du sol latéritique après interaction avec l'effluent.

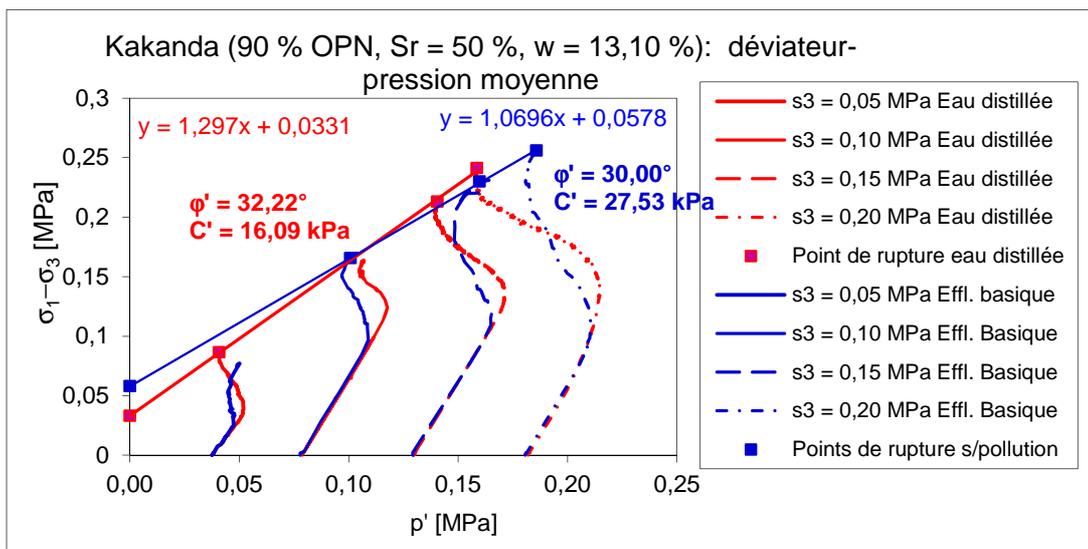


Figure 4: Chemin de contraintes effectives et lignes d'état critique pour le sol de Kakanda

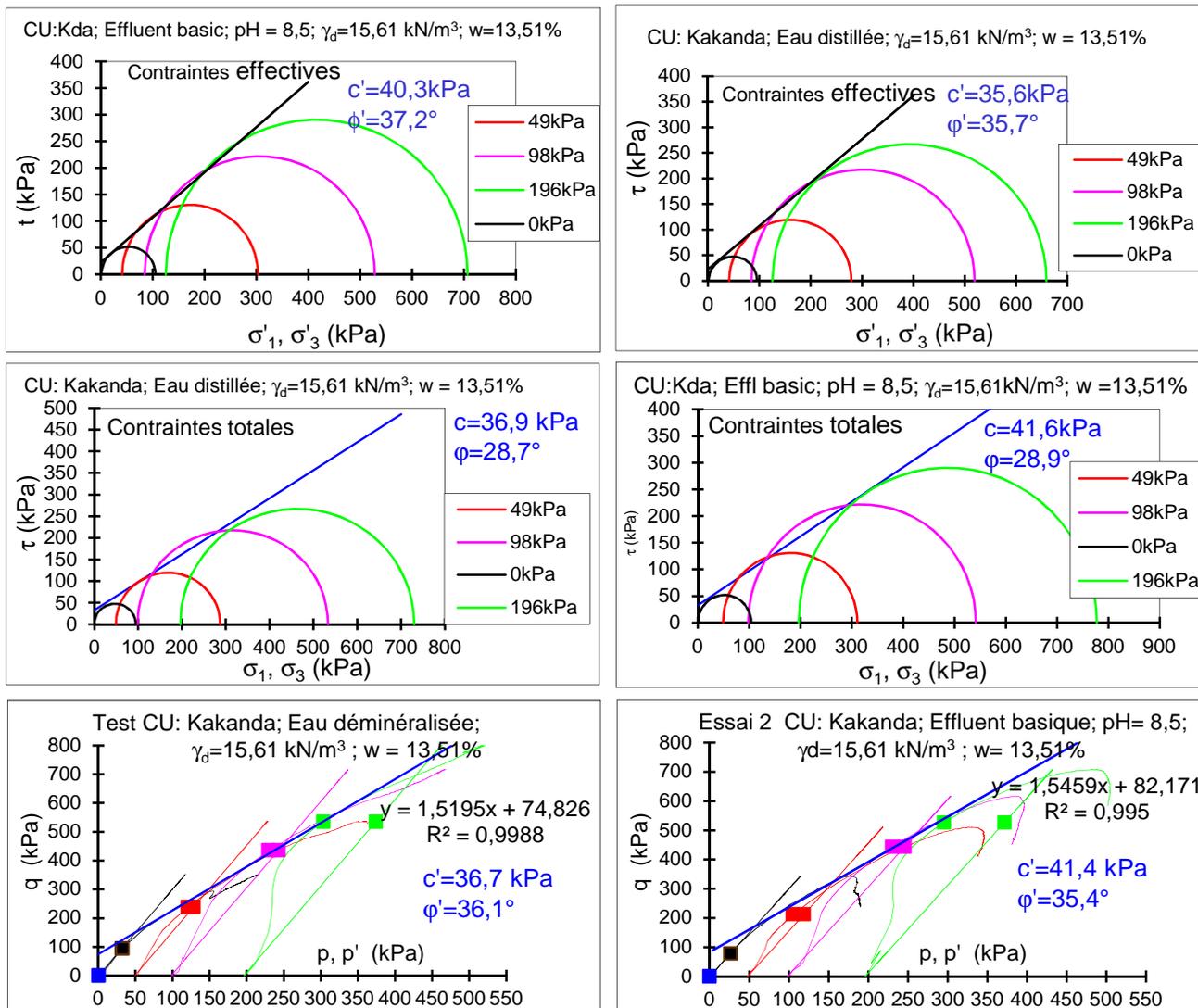


Figure 5: Cercle de Mohr, droite intrinsèque, et lignes d'état critique pour le sol de Kakanda

Sur les figures 6 et 7 nous comparons les variations du déviateur et de la pression interstitielle en fonction de la déformation axiale (en CU) respectivement dans le cas des sols de Kakanda (a) et de Kipushi (b) non contaminés et pollués aux effluents liquides des bassins. Nous n'observons aucune influence de la pollution des sols dans le domaine élastique où les courbes sont confondues. Par contre dans le domaine plastique, le déviateur pour le sol saturé en effluent liquide basique est légèrement supérieur à son équivalent saturé en eau déminéralisée, tandis qu'il est largement inférieur pour le sol saturé en effluent liquide acide par rapport au sol saturé en eau distillée.

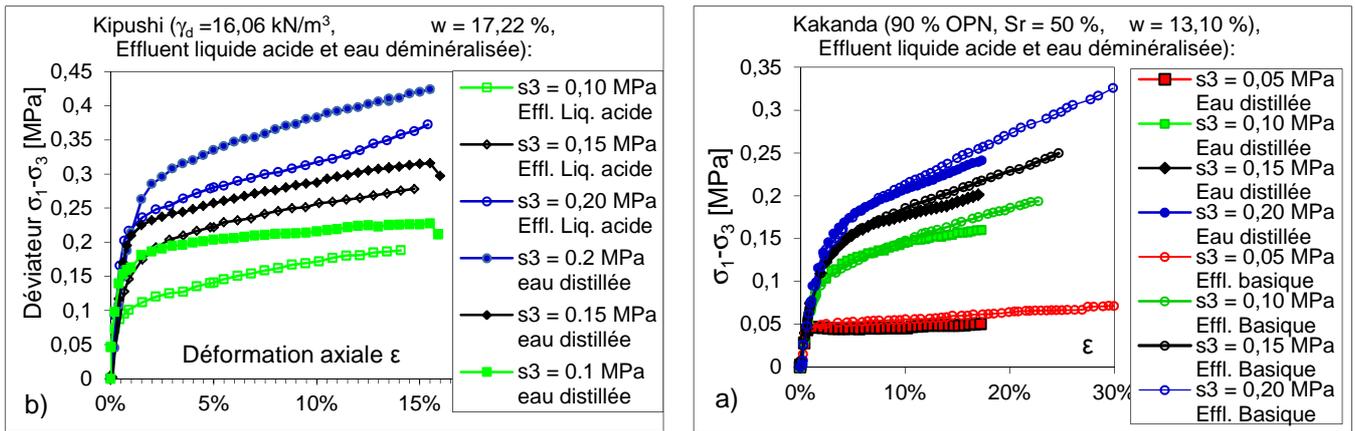


Figure 6: Diagramme Déviateur – déformation axiale en CU

Quant à la surpression interstitielle, le comportement est tout à fait inverse, la forte augmentation de la pression interstitielle dans le cas du sol saturé à l’effluent liquide acide (figure 7-b) va de pair avec la conductivité hydraulique élevée sous pollution acide [7]. Des résultats disponibles dans la littérature [8,9] attribuent ce comportement à la diminution du pH en milieu acide.

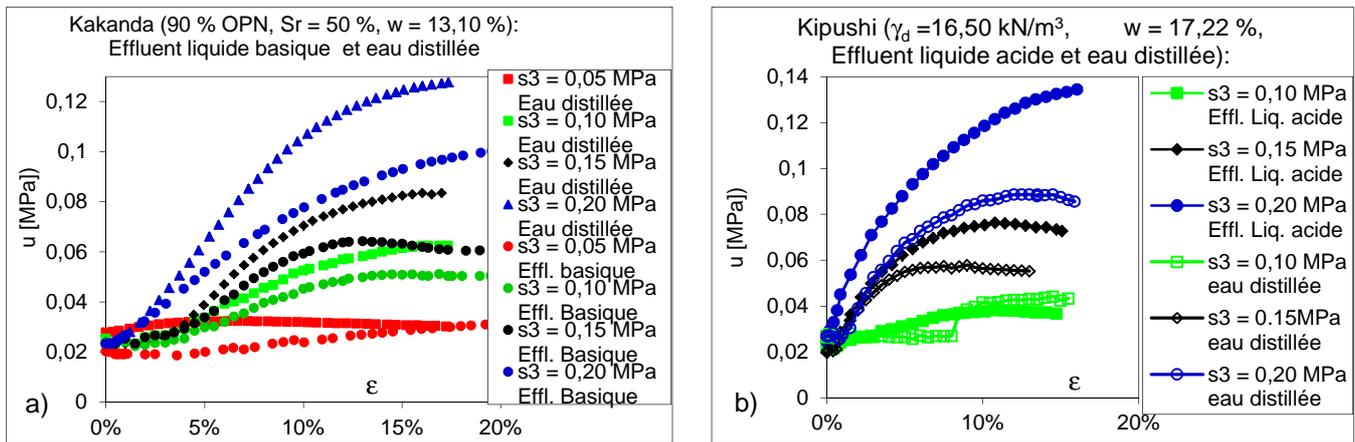


Figure 7: Diagramme Pression interstitielle – Déformation axiale

Les figures 8 et 9 présentent quelques résultats des essais UU et montrent l’impact de la succion initiale des éprouvettes sur le déviateur à la rupture. Sur la figure 8 nous comparons les résultats en non consolidé et non drainé. Le comportement reste le même c’est-à-dire une diminution du déviateur sous contamination acide (figure 8-a) et une légère augmentation en milieu basique (figure 8-b).

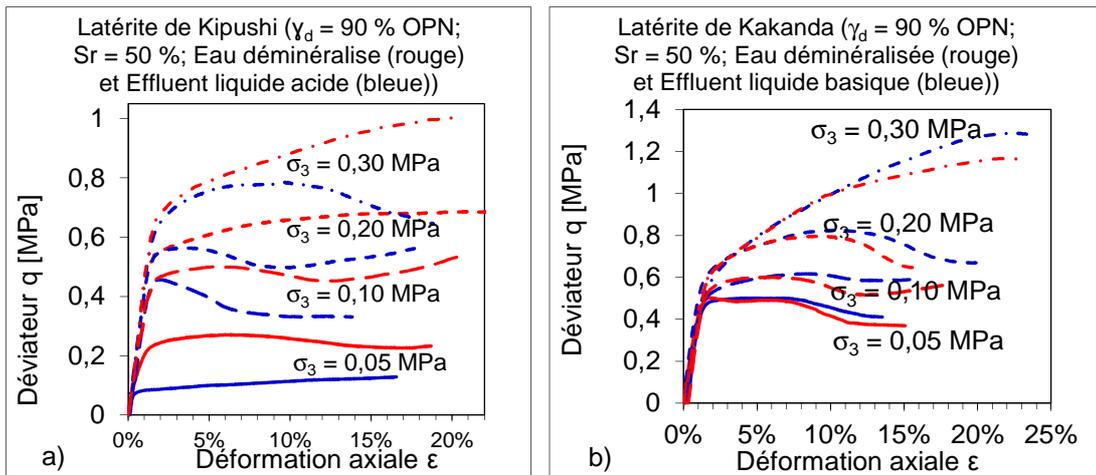


Figure 8 : Diagramme Déviateur – déformation axiale en UU

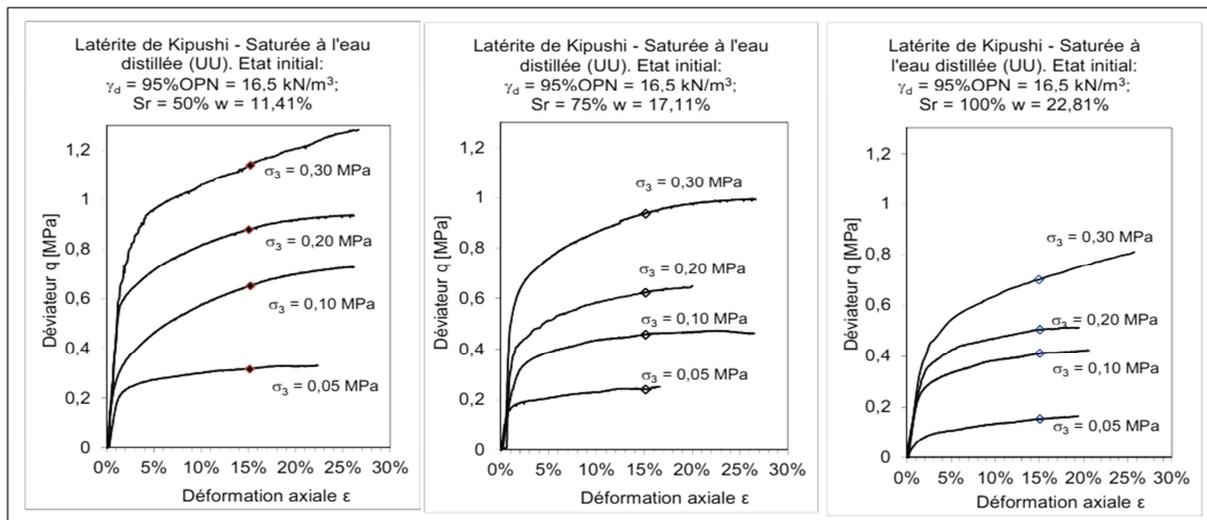


Figure 9: Influence de l'état de saturation initiale des éprouvettes sur le déviateur à la rupture (UU)

Nous remarquons aussi, contrairement aux résultats de la figure 9 où les éprouvettes compactées à 95 % de l'OPN sont durcissantes, que le matériau partiellement sec ($S_r = 50\%$) et faiblement compacté à 90 % OPN présente un comportement radoucissant sous faible confinement pour le sol sain (figure 8-a), comme pour le sol pollué en milieux acide et basique (figure 8-a-b).

3.1.2 EFFET DE L'EFFLUENT LIQUIDE ACIDE OU BASIQUE DES BASSINS DE RETENTION SUR LE MODULE DE DEFORMATION

Les études expérimentales de laboratoire sur différents sols ont montré que le module de déformation dépend de nombreux facteurs, notamment de la granulométrie des sols, de la densité, du niveau de confinement, de l'histoire de chargement, du mode de préparation des éprouvettes et du remaniement [10].

Ces différents facteurs sont connus et ont été étudiés il y a longtemps. Si l'on tient compte de l'influence de la granulométrie et du type de sol, de l'indice des vides (ou compacité) et de la pression de confinement, le module de déformation peut s'écrire sous la forme:

- Module = A (matériau) x B (compacité) x C (pression)

avec:

- A (matériau) : un paramètre qui traduit l'influence de la nature du matériau,
- B (compacité): une fonction qui prend en compte la compacité du sol,
- C (pression) : une fonction qui rend compte de l'influence de la pression moyenne ou de confinement.

La figure 10 montre la variation du module de déformation en fonction de la pression de confinement et indique la chute de ce module en milieu acide.

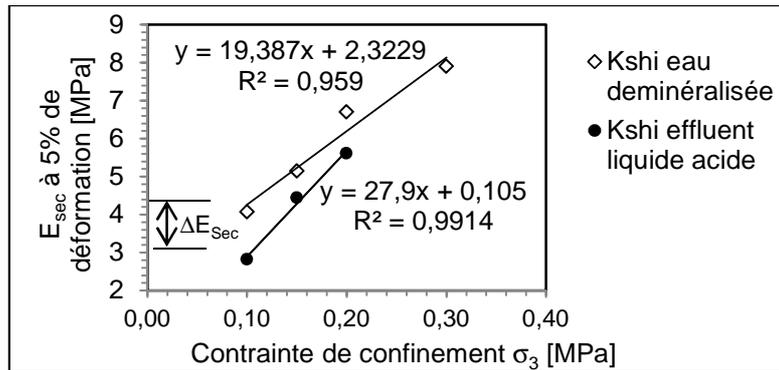


Figure 10: Variation du module de rigidité sécant en fonction de $\sigma_{latérale}$

Pour les sols utilisés dans les digues de retenue des rejets miniers, l'influence de la pollution (par les effluents liquides acides ou basiques) n'est pas négligeable, le module de déformation diminue pour les effluents liquides acides et augmente pour ceux basiques, du moins pour les sols latéritiques analysés.

Dans ce cas, le module de déformation peut s'écrire :

- **Module = A (matériau) x B (compacité) x C (pression) x D (chimisme du fluide percolant)**

Avec: D (fluide percolant) : un paramètre qui traduit l'influence du pH du liquide percolant la matrice de sol chimisorbé.

3.1.3 INFLUENCE DE LA SATURATION INITIALE DES EPROUVETTES SUR LE DEVIATEUR ET LE MODULE DE RIGIDITE SECANT

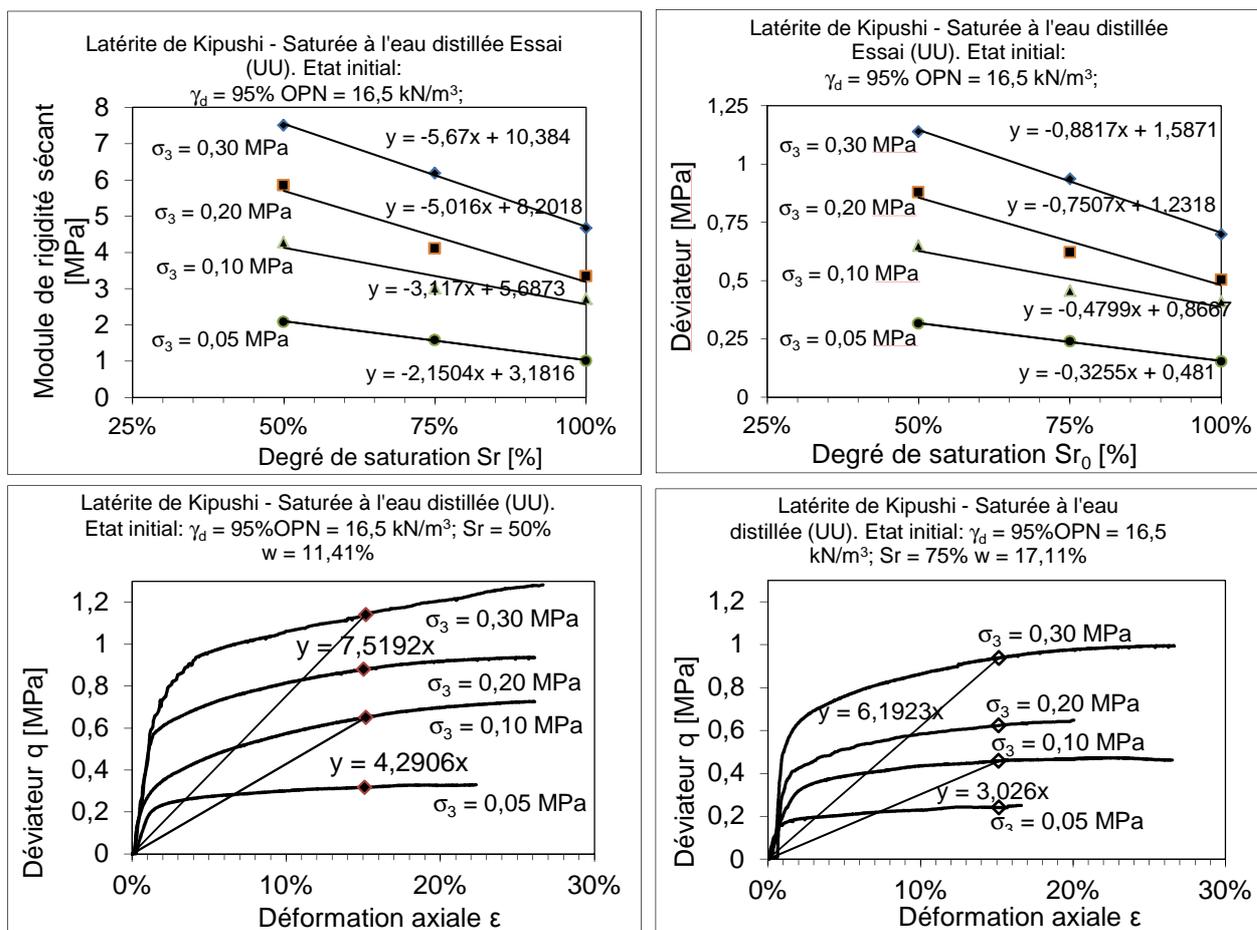


Figure 12 : Influence de la saturation initiale des éprouvettes sur le déviateur et le module de rigidité sécant

Le déviateur à la rupture décroît sensiblement du sol partiellement saturé (forte succion) au sol saturé (faible succion) sous même compacité. Quand au module de rigidité sécant à 15 % de déformation, présenté sur la figure 12 ci-dessus, il augmente avec la pression de confinement et décroît avec la saturation.

4 CONCLUSION

L'objectif de cette étude consistait, à l'analyse des paramètres de résistance au cisaillement des sols latéritiques compactés sous influence de la pollution par les effluents liquides qui émanent des concentrateurs.

Il apparaît que la pollution acide diminue les paramètres de résistance des latérites en augmentant sa déformabilité, alors qu'en pollution basique, c'est-à-dire en saturant les éprouvettes en effluent liquide basique, une tendance à s'opposer à la déformation du sol est observée. Ceci devrait inciter l'exploitant à vérifier chaque fois le pH des effluents liquides qu'il envoie dans le bassin, en veillant à ce que celui-ci soit toujours basique, en y ajoutant la chaux par exemple si le pH est acide.

La littérature renseigne que le module de déformation est une fonction de la forme:

$$\text{Module} = A (\text{matériau}) \times B (\text{compacité}) \times C (\text{pression})$$

où: A (matériau) est un paramètre qui traduit l'influence de la nature du matériau telle que sa granularité, B (compacité) est une fonction qui prend en compte la compacité du sol telle que sa porosité et C (pression) est une fonction qui rend compte de l'influence de la pression moyenne ou de confinement, bref, le module dépend de paramètres de nature (ex. granularité), d'état (ex. compacité) et l'état de chargement (pression).

Dans le cas des sols utilisés dans les corps des digues de retenue des rejets miniers, ce module de déformation diminue indépendamment des paramètres A, B et C sous l'influence des effluents liquides acides et croît pour les effluents basiques, du moins pour les sols latéritiques. Dans ce cas, ce module de déformation doit intégrer aussi un paramètre qui traduit l'influence du pH du liquide percolant la matrice de sol chimisorbé, de sorte qu'il puisse s'exprimer par: **Module = A (matériau) x B (compacité) x C (pression) x D (chimisme du fluide percolant)**, ceci nous paraît innovant et donc une contribution.

REFERENCES

- [1] Cardoso R., Barbedo D., Ribeiro D., (2012). *Hydro-Mechanical Behavior of Compacted Kaolin Considering Percolating Fluids with Different Chemical Nature*. Dans *Unsaturated soil: Research and application*, volume 2 Springer, ISBN 978-3-642-31342-4 e-ISBN 978-3-642-31343-1, DOI 10.1007/978-3-642-31343-1, p439-446.
- [2] Baize D., Girard M-C., (2008). *Référentiel Pédologique*, Collection savoir-faire, Afes, Edition Quae, ISBN : 978-2-7592-0186-0.
- [3] Cabinet du Président de la RDC, (2003). *Décret n°038/2003 du 26 mars 2003 portant règlement minier*. Journal officiel de la RDC. Numéro Spécial, 44ème Année.
- [4] Bouazza A., Delage P., Wojnarowicz M., (2005). *Nature et reconnaissance de la pollution des sols*. Dans *Géomécanique environnementale sols pollués et déchets*. Chap. 1, p 17- 45. Sous la direction de Delage P., Schrefler B., Ed. Hermès-Science Publication, Lavoisier, Paris.
- [5] Pialy P., (2009). *Étude de quelques matériaux argileux du site de Lembo (Cameroun): minéralogie, comportement au frittage et analyse des propriétés d'élasticité*. Thèse, Université de Limoges
- [6] Mukoko G. (2014). *Comportement des sols latéritiques compactés dans les remblais et digues de retenue des rejets miniers du Katanga (R.D.C)*, Thèse de doctorat, Presse universitaire de Louvain, Dépôt légal D/2014/9964/30, ISBN 978-287558-314-7, Diffusion universitaire Ciaco, www.i6doc.com, Belgique.
- [7] Mukoko G., Thimus J.F.; Ngoie D., (2015). *Interaction lateritic soil –concentrators' discharges: what impact(s)?* In *Proceedings of the 16 African Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Innovative geotechnics for africa tunisia 27-30 april, 2015* © ISBN: 978-9938-12-936-6, p 587 – 594.
- [8] Spagnoli, G., Fernandez-Steeger, T.M., Arnhardt, C., Stanjek, H., Azzam, R, Feinendegen, M., (2010). *Relevance of pore fluid composition for the drained strength of clays*, In *General Assembly of the European Geosciences Union 2010, Vienna (Austria)*. *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 12 (EGU2010-8535-1).
- [9] Spagnoli, G., Rubinos, D., Stanjek, H., Fernandez-Steeger, T.M., Feinendegen, M., Azzam, R. (2011). *Undrained shear strength of clays as modified by pH variations*, In *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, DOI: 10.1007/s10064-011-0372-9.
- [10] Nguyen Pham Ph Th., (2008). *Etude en place et au laboratoire du comportement en petites déformations des sols argileux naturels*, Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.