



INFLUENCE DE LA POLLUTION DES EAUX SUR LA DÉGRADATION DES ROCHES SCHISTEUSES

THE INFLUENCE OF WATER POLLUTION ON THE DEGRADATION OF SCHIST ROCKS

Réception : 04/02/2019

Acceptation : 19/04/2019

Publication : 30/06/2019

HADDAD Sabrina¹, MELBOUCI Bachir²¹Laboratoire Géomatériaux Environnement et Aménagement- Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, E-mail : sabrinahaddad0617@gmail.com²Laboratoire Géomatériaux Environnement et Aménagement- Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, E-mail : melbouciba@hotmail.fr

Résumé-La problématique posée dans ce travail est de comprendre la dégradation des roches schisteuses, source du glissement de terrain d'Ain El Hammam (Algérie), sachant que les eaux usées de la commune d'Ain El Hammam sont déversées directement sur le versant schisteux. En effet, les attaques des eaux polluées représentent un sujet inquiétant et grandissant par la détérioration de la couche imperméable et rend ce versant instable. Une étude expérimentale a été menée en simulant le climat de la région par des cycles climatiques au laboratoire. Les principaux résultats obtenus ont montré que le matériau *schiste* a subi des dégradations surtout en présence des sulfates et des phosphates. Ces eaux chargées entrent dans la structure du schiste en feuillets parallèles (schistosité) et affectent la composition minéralogique et surtout les liaisons chimiques entre les différents minéraux. Ce qui a affaibli la stabilité du versant et a accéléré les déplacements du massif.

Mots - clés : Eau, Polluants, Versant instable, Schiste, Dégradation.

Abstract-Our target is to study how the degradation of schist rocks is the cause of landslide in Ain El Hammam (Algeria). Knowing that the wastewater of the municipality of Ain El Hammam is flowed directly on the schistose side. In fact, the attacks of polluted waters represents a worrying and growing subject by the deterioration of the impermeable layer and makes this side unstable. An experimental study was conducted simulating the climate of the region through climate cycles in the laboratory. The main results obtained showed that the schist material has been degraded particularly in the presence of sulphates and phosphates. This polluted water enters the schist structure in parallel sheets (schistosity) and affect the mineralogical composition and especially the chemical bonds between the different minerals. This weakened the stability of the side and accelerated the movement of the massif.

Keywords: Water, Pollutants, Unstable side, Schist, Degradation.

1-Introduction

Le présent travail est consacré aux problèmes d'altération des roches schisteuses sous conditions climatiques différentes et à l'influence de ces processus sur la stabilité du massif instable d'Ain El Hammam. Ces roches schisteuses subissent des altérations chimiques par circulation des eaux polluées et non polluées qui changent les paramètres pétrographiques et géotechniques les caractérisant. En effet, l'état d'altération des roches schisteuses est un des facteurs

principaux qui peut avoir une influence sur la stabilité des massifs rocheux.

Cette altération conduit à la dégradation des propriétés physiques et mécaniques de la roche schisteuse au niveau de la matrice rocheuse et, également, au niveau du massif. Les trois groupes de facteurs déterminant la sensibilité du schiste à l'altération sont les suivants :

- Le facteur environnemental, défini par les conditions climatiques, ainsi que par

la topographie du site et son hydrologie ;

- Les propriétés géologiques et géotechniques du massif rocheux ;
- Les propriétés de la matrice rocheuse (minéralogie, texture, propriétés physiques et mécaniques).

De plus, l'eau en s'infiltrant, n'étant pas seulement un agent altérant, mais également un agent de transport des différents produits des ménages, des produits de l'altération sous formes dissoutes ou particulières sont remobilisés vers la couche imperméable de schiste.

2-Altération des roches

L'altérabilité désigne la capacité d'une roche à s'altérer plus ou moins rapidement (altération physique et chimique). L'altérabilité peut être exprimée par la vitesse de dégradation de différentes caractéristiques pétrographiques, physiques ou mécaniques au cours de l'altération des roches [6].

Les trois groupes de facteurs déterminant la sensibilité du massif rocheux à l'altération sont les suivants :

- Le facteur environnemental, défini par les conditions bioclimatiques, ainsi que les facteurs de station (topographie, hydrologie) ;
- Les propriétés géologiques et géotechniques du massif rocheux : conditions tectoniques, macro-texture du massif (homogénéité, conditions de la fracturation, etc.), drainage interne ;
- Les propriétés de la matrice rocheuse : composition minéralogique et texture de la roche, propriétés physiques et mécaniques (perméabilité, porosité, densité, etc..).

La transformation des roches pendant l'altération dépend du type de roches soumises à l'altération et des conditions dans lesquelles le processus se déroule.

Les mécanismes responsables de l'altération se divisent en deux : l'altération chimique et l'altération mécanique.

L'altération chimique favorise le développement des sols au détriment de la roche mère et l'altération mécanique tend à diminuer l'épaisseur des roches en arrachant mécaniquement les grains ou des particules. Elle ne modifie pas la composition mais facilite le morcellement du matériau initial.

Cette altération est essentiellement due à la charge polluante excessive des eaux de ruissellement superficielles ou profondes qui a été identifiée comme une composante des sources de pollution diffuses dans les zones urbaines des pays en développement [5 & 7]. En effet, en raison de l'urbanisation et de la motorisation accélérée, de l'insuffisance ou le dysfonctionnement des réseaux de drainage et des sources de pollutions difficilement maîtrisables, les eaux de ruissellement superficielles ou profondes constitue un défi environnemental majeur. Dans la plupart des villes de ces pays, les eaux pluviales sont généralement mélangées aux eaux usées telles que les eaux domestiques, les lixiviats de décharge, les huiles usagées et les effluents hospitaliers.

3-Caractérisation du versant de l'étude

La région d'Ain El Hammam est rattachée au massif de la Grande Kabylie qui s'étale sur une longueur de 70 km et une largeur de 20 km; il occupe une position centrale dans les Maghrébides. Il domine le bassin de Tizi-Ouzou au nord et assure une transition avec la chaîne de montagnes de Djurdjura vers le sud. Il est limité à l'est par l'affleurement des flyschs du haut Sebaou et à l'ouest par les flyschs supra-kabyles. Les hauteurs maximales qui culminent entre les cotes 1000 m et 1300 m sont situées dans la région orientale de ce massif. Les zones internes de ce segment alpin (massif de la Grande Kabylie) comportent trois ensembles géologiques (GEOMICA 2009):

- Le premier est métamorphique; il est composé de terrains anciens cristallins et surtout cristallophylliens du Paléozoïque ;
- Le second est de nature sédimentaire, peu ou pas métamorphique, d'âge cambrien à carbonifère ;
- Le troisième forme la dorsale ou chaîne calcaire d'âge mésozoïque à cénozoïque.

La zone affectée par le mouvement de terrain est constituée essentiellement de schistes satinés. Cette formation présente un plan de schistosité d'orientation moyenne ENE-WSW d'un pendage de 40° à 60° vers le sud dans le sens de la pente [2]. Le contexte géologique, morphologique et climatique de la région permet de mieux cerner la problématique.

3.1- Morphologie du versant

La morphologie de la région d'Ain El Hammam joue un rôle important dans l'amorce des instabilités de terrain. En effet, la pente affectée par le glissement de terrain d'Ain El Hammam se présentait à l'origine sous forme d'une pente abrupte orientée généralement suivant une direction Nord-Sud. Cependant, l'allure de la crête du versant a été largement modifiée par les travaux d'urbanisation récents et l'allure de la partie non construite du versant (située en aval de cette crête) est remodelée par les mouvements de terrain récents.

L'effet du mouvement de terrain sur cette pente et très visible en surface : les déformations donnent au versant instable une forme en gradins. Le pied de ce glissement est constitué de schistes broyés et écrasés.

Les facteurs morphologiques susceptibles d'être à l'origine du mouvement de terrain sont :

- L'effet de la pente raide du versant ;
- L'alternance de couches résistantes et d'autres peu résistantes avec un pendage orienté dans le sens de la pente du versant ;
- L'effet du sens d'orientation des plans de schistosité du substratum.

3.2- Hydrologie du site

Le versant instable d'Ain El Hammam est caractérisé par la présence de cours d'eau d'écoulement (torrentiel et semi-permanent) qui modifient la topographie du site et de plusieurs sources d'eau dans le versant. Les sources d'eau contribuent à l'altération du substratum, par l'effet du transport des particules fines et à l'apparition de surfaces de faiblesse en profondeur.

D'après les deux sondages piézométriques réalisés à Ain El Hammam, l'effet des fluctuations de la nappe varie en fonction des saisons. Elle peut atteindre la saturation en hiver et elle peut descendre jusqu'à 12 m de profondeur en été. Pendant la fonte progressive de la neige, la nappe affleurerait le niveau du terrain naturel (saturation du terrain par infiltration lente et progressive).

3.3- Climatologie du site

Le climat de la région d'Ain El Hammam est de type méditerranéen continental, relativement froid et humide en hiver, chaud et sec en été. La période des fortes pluies s'étale dans cette région sur 5 à 6 mois (entre novembre et mars). A partir d'une étude des données climatiques, d'Ain El Hammam (qui s'étale sur plusieurs années), nous avons relevé les constats suivants [2]:

- Les températures varient suivant les années, de 25°C à 35°C en juillet et août avec parfois des pics qui dépassent 40°C ;
- Le mois le plus pluvieux de l'année est le mois de décembre avec une pluviométrie mensuelle moyenne qui oscille autour de 175 mm ;
- Le mois le plus sec de l'année est le mois de juillet, avec une pluviométrie moyenne de l'ordre de 5 mm ;
- Les précipitations moyennes annuelles oscillent autour de 1050 mm avec un extremum en 1974 atteignant 1559 mm.

3.4 - Géologie

Le glissement d'Ain El Hammam est localisé dans un versant d'une pente de 40° à 60° d'inclinaison. Le pendage du substratum est de 30° à 60° orienté dans le sens de la pente. Ce versant est caractérisé par l'alternance en profondeur de couches résistantes et d'autres peu consistantes.

En effet, les résultats des huit (08) sondages carottés réalisés dans ce versant par le laboratoire GEOMICA montrent qu'il est composé de quatre couches :

- En surface, un recouvrement superficiel de remblais et d'éboulis d'une épaisseur allant de 1.70 m à environ 10 m ; il est localisé au niveau de la crête du versant [3] ;
- En profondeur, les passages altérés de la formation schisteuse sont peu consistants et on distingue du haut vers le bas : des débris de schistes argileux, des schistes altérés et déstructurés très perméables et le substratum composé de schistes satinés compacts.

Ce mouvement de terrain affecte une formation schisteuse très altérée. Cette roche se débite en plaquettes suivant la direction de schistosité principale. Cependant, la direction de ces plans de schistosité se trouve dans le sens de la pente et favorise ainsi le glissement des feuillets qui est facilité par la présence d'eau qui joue le rôle de lubrifiant.

4-Altération des roches schisteuses d'Ain El Hammam

Les fissures importantes observées dans la partie aval de la ville (constituant des zones de faiblesse pour les infiltrations d'eau) contribuent à l'altération des couches de schiste profondes. En effet, la forte perméabilité de la couche superficielle de remblais qui repose sur un substratum schisteux peu perméable et fissuré, permet une rapide infiltration de l'eau de pluie dans les fissures des schistes du substratum et favorise, en l'accéléralant, le processus d'altération du substratum schisteux.

Ce processus d'infiltration réduit considérablement les caractéristiques mécaniques de la couche superficielle, mais aussi et surtout des couches profondes (l'eau brise l'effet de cohésion existant entre les

particules). Dans ce cas, l'écoulement dans les couches profondes est souvent transversal, et les panneaux de schistes altérés sont le plus souvent piégés entre deux couches de schistes très peu perméables. Par ailleurs, dans ce processus, les écoulements d'eau (issus de plusieurs sources d'eau existantes dans le bas du versant instable ; ce qui suppose que la nappe est profonde) transportent les particules fines du sol en laissant des vides et provoquent en aval un colmatage du terrain augmentant la pression interstitielle (marquée par des sorties d'eau subites et par une augmentation des débits des sources). En outre, dans ces niveaux drainants, le sol passe d'un état plastique à un état liquide en créant des zones de faiblesse propices à l'apparition de surfaces de ruptures profondes.

L'activation de ce glissement de terrain est fortement liée aux différentes actions climatiques.

4.1- L'effet des fortes précipitations

Les fortes précipitations qui caractérisent le climat de la région d'Ain El Hammam ont un rôle très important dans le déclenchement, l'activité et l'évolution de ce glissement de terrain.

4.2- L'effet des réseaux d'assainissement non raccordés et des eaux issues de l'abattoir

Les eaux usées issues de l'abattoir et du réseau d'assainissement principal de la ville d'Ain El Hammam (un réseau non raccordé) se déversent directement dans les lignes de rupture apparentes dans le versant instable. Une partie de ces eaux usées ruisselle sur le versant et suit les ravins des cours d'eau, l'autre partie s'infiltre dans les lignes de glissement et contribue à la réactivation et à l'évolution du glissement. Ces eaux contenant des agents chimiques contribuent considérablement à l'érosion du versant et à l'activité du mouvement.

Cette eau s'infiltre progressivement dans les diaclases du schiste et sépare les feuillets de cette formation provoquant ainsi une altération progressive du substratum et une réduction des

caractéristiques mécaniques des sols superficiels et profonds.

Des essais de cisaillement à la boîte de Casagrande réalisés par Kechidi [4] sur les deux échantillons de schiste après broyage (prélevés respectivement dans les limites Est et Ouest du glissement) démontrent la dégradation des caractéristiques mécaniques de cette formation en milieu saturé. Ces essais renseignent sur le rôle de l'eau (essai en milieu saturé) dans la modification des caractéristiques mécaniques de la pente du versant composée principalement de schistes broyés et déstructurés. Ces zones de schistes broyés sont reconnues par forage au niveau de ce site Fig. 1.



Figure 1 : Carottes obtenues dans la couche schisteuse altérée.

Figure 1 : Cores obtained in the altered schistose layer.

5- Caractéristiques expérimentales de la matrice schisteuse

Le schiste est extrait sous formes de blocs de différentes tailles. Après concassage manuel de ces blocs, les propriétés de ce matériau ont été déterminées par des essais d'identifications simples et rapides. Les caractéristiques déduites sont regroupées dans le tableau 1.

Tableau 1 : Essais d'identification des couches constituant le versant.

Table 1: Identification tests of the composition of the layers in the side.

couches de sol	γ_d (KN/m ³)	γ_h (KN/m ³)	W _l (%)	I _p (%)
Remblais	17.9	19	24	3.4
Débris de schistes argileux	20.2	21.5	19	7.3
Schistes altéré et déstructuré	23.1	24.5	/	/
Schistes satinés	23.2	24	/	/

5.1- Minéralogie des schistes d'Ain El Hammam

Deux échantillons de schiste ont été prélevés à deux dates différentes et dans deux endroits distincts, aux limites Est et Ouest du glissement. Une étude minéralogique et pétrographique a été effectuée au laboratoire CETIM de BOUMERDES sur ces échantillons de schistes en utilisant la méthode du broyage et de diffraction aux rayons X. Les résultats de cette étude sont récapitulés dans le tableau 2.

Tableau 2 : Composition minéralogique des deux échantillons de schiste.

Table 1: Mineralogical composition of the two schist samples.

Code de l'échantillon	Échantillon 1	Échantillon 2
Quartz	22.5	34
Albite	9	8
Chlorite	8.5	8
Kaolinite	14.5	9.5
Muscovite	37.5	33
Anatase	1	1
Autres	7	6.5

La roche schisteuse comporte un taux élevé de minéraux (kaolinite, muscovite) qui dépasse les 50%, ce qui indique un niveau d'altération météorique avancé. Ces observations minéralogiques confirment la forte altération des schistes d'Ain El Hammam,

altération qui est à mettre en relation avec la structure de la roche et ne peut que participer à une accentuation du mouvement de terrain.

5.2-Essais mécaniques réalisés

Les essais mécaniques réalisés sont de deux types : les essais de cisaillement à la boîte de Casagrande et les essais œdométriques sur des échantillons de schiste soumis à différents cycles d'altération aux agents chimiques tels que les phosphates, les sulfates et les détergents issus des différents lavages domestiques.

Les eaux souterraines d'Ain El Hammam peuvent avoir différentes origines en terme de pollution : naturelle, domestique, industrielle et agricole. L'origine naturelle implique un phénomène tel que la pluie, lorsque par exemple l'eau de ruissellement passe à travers des terrains riches en métaux lourds ou encore lorsque les précipitations entraînent les polluants de l'atmosphère vers le sol. L'origine domestique concerne les eaux usées ménagères (salle de bains, cuisine, ...etc.), les eaux vannes (WC...etc.), ainsi que les eaux rejetées par les hôpitaux, commerces,...etc. Quant à l'origine agricole et industrielle, elle concerne par exemple les eaux surchargées par des produits issus de l'épandage (engrais, pesticides) ou encore les eaux contaminées par des résidus de traitement métallurgique, et de manière plus générale, par des produits chimiques tels que les métaux lourds, les hydrocarbures...etc. [1].

En tenant compte des études chimiques réalisées sur les eaux polluées en bas du versant, nous avons reconstitué cette eau et nous l'avons dosée à 20 mg/l pour le phosphate, à 800mg/l pour les sulfates et à 60g/l pour les détergents de lessive.

Préparation des échantillons

Pour simuler l'effet d'altération accéléré au laboratoire des passages altérés et remaniés profonds du versant d'Ain El Hammam, nous avons suivi la démarche suivante : extraction de blocs schisteux non altérés que nous avons broyés pour la confection d'échantillons. Ces derniers sont immergés dans trois solutions

d'eau contenant des produits chimiques différents : détergents, sulfates, phosphates. Ils sont ensuite soumis, dans une enceinte climatique, à cinq séries de cycle de dix jours. Chaque cycle comporte une température à 45°C pendant 18h et une température à -5°C pendant 6h durant cinq premiers jours et on inverse ensuite les températures : 45°C pendant 6h et -5°C pendant 18h durant cinq derniers jours ; ceci constitue une série de cycle de dix jours.

Après les cinq cycles d'altération, les échantillons seront soumis aux essais de cisaillement de type non consolidé non drainé à une vitesse de 1,5 mm/min tout en faisant varier la contrainte normale de 100 à 400 kPa. Les résultats obtenus sont présentés sous forme de courbes contrainte-déformations Fig. 2.

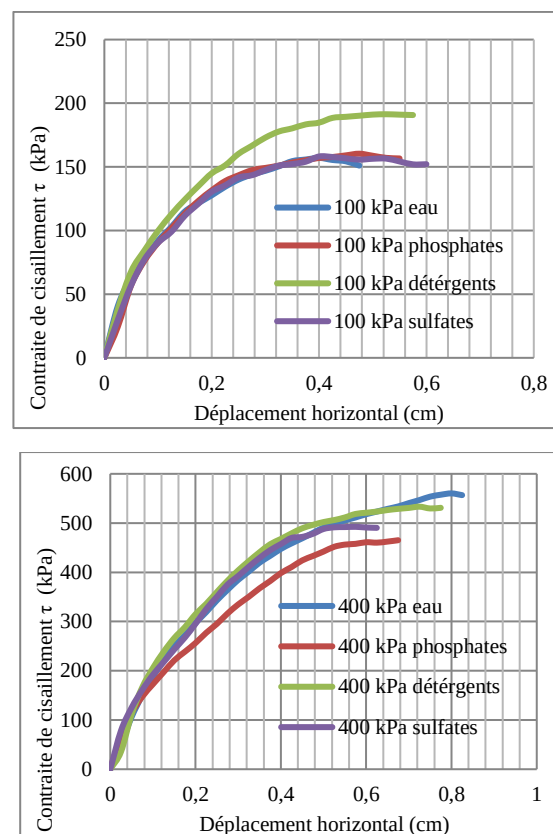


Figure 2: Influence des quatre polluants sur la résistance au cisaillement sous des contraintes normales de 100 et 400 kPa.

Figure 2: The influence of the four pollutants on shear strength under normal stresses of 100 and 400 kPa.

Tableau 3: Caractéristiques mécaniques obtenues aux essais de cisaillement.**Table 3:** Mechanical characteristics obtained in shear tests.

Echantillons	Caractéristiques C et φ	
	C [kPa]	φ°
Schiste+eau	94	39
Schiste+phosphates	24	44
Schiste+détergents	47	41
Schiste+sulfates	4	46

Sous le chargement de $\sigma = (100, 200, 300 \text{ et } 400 \text{ kPa})$, on obtient des courbes monotones qui évoluent lentement jusqu'à atteindre une valeur maximale de cisaillement où la rupture franche de l'échantillon apparaît.

La figure 2 montre que plus la contrainte normale augmente, plus la contrainte de cisaillement augmente. La valeur maximale de la contrainte de cisaillement a atteint 430 KPa sous la contrainte normale de 400 KPa ; cette valeur est inférieure à celle obtenue sur l'échantillon de schiste seul. Ce qui montre que l'eau diminue l'effet de la résistance au cisaillement par l'altération du schiste.

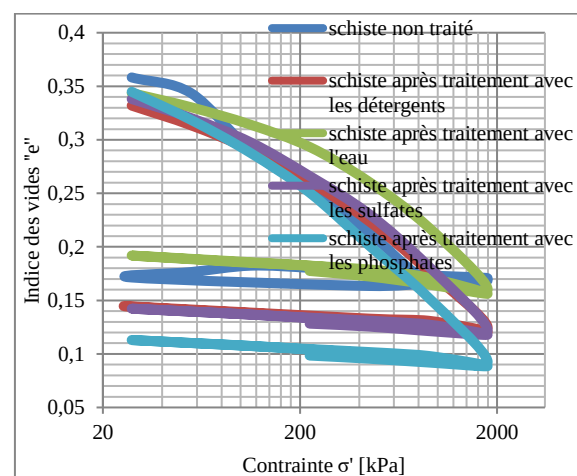
La variation importante des caractéristiques physiques et mécaniques des sols est due à la présence de couches discordantes dans ce versant (tableau 3) ; les caractéristiques mécaniques élevées sont observées pour les échantillons prélevés dans les passages résistants et les plus faibles sont observées pour les couches les plus altérées.

Il ressort de ces essais que la majeure partie de ces passages altérés et remaniés profonds montre une faible résistance mécanique et présente des caractéristiques favorables aux glissements de terrain.

Essai œdométrique : les échantillons traités aux trois produits chimiques sont ensuite soumis aux essais de compressibilité à l'essai œdométrique. Les principaux résultats sont regroupés dans le tableau 4 et représentés sur la figure 3.

Tableau 4: Récapitulatif des résultats de l'essai œdométrique avant et après traitement.**Table 4 :** Recapitulatory of the œdometer test results before and after treatment.

	Schiste non traité	Schiste après traitement avec l'eau	Schiste après traitement avec les Détergents	Schiste après traitement avec les Sulfates	Schiste après traitement avec les Phosphates
σ'_p	1,22	3,1	2,1	2,9	2,5
Cc	0,0332	0,049	0,0611	0,0669	0,0946
Cs ou Cg	0,00786	0,0235	0,0107	0,0114	0,0111

**Figure 3 :** Courbes œdométriques du matériau schisteux avant et après traitement.**Figure 3 :** œdometer curves of schist material before and after treatment.

Suite à l'altération du schiste, les différents polluants (détergents, phosphates et sulfates) ont augmenté la contrainte de préconsolidation de 80 à 140% de celle obtenue sur le schiste seul. Cette variation est due certainement aux propriétés intrinsèques des polluants (solubilité, absorption et dégradabilité). En effet, les sulfates sont agressifs et en se cristallisant, ils exercent des pressions dans les pores qui peuvent augmenter la contrainte de préconsolidation. Les détergents sont tensioactifs et leur biodégradabilité est très variable. En présence de phosphates, des ions sont libérés par dissolution pour former des solutions peu solubles. Ces différentes transformations des polluants lors de l'altération peuvent être la source des augmentations de la contrainte de

préconsolidation. Par contre l'eau a fait augmenter cette contrainte de plus de 150%. Ceci montre qu'une bonne partie de la charge normale est reprise soit par l'eau soit par les polluants. Après traitement, la contrainte de préconsolidation la plus petite est obtenue sur l'échantillon de (schiste + détergents) et la plus grande est obtenue sur l'échantillon (schiste + eau).

Les indices de gonflement pour les trois échantillons traités aux détergents, sulfates et phosphates ont des valeurs petites et assez proches, ceci montre que ces trois produits ont cassé les liaisons de cohésion qui ont permis au schiste de gonfler.

L'indice de compression le plus élevé est obtenu sur l'échantillon (schiste+phosphates). Les échantillons de (schiste + détergents) et (schiste + sulfates) ont présenté des C_c assez semblable mais qui est le double de celui de l'échantillon de schiste seul. Ceci montre que la présence des phosphates, des sulfates et des détergents accélère la compressibilité du schiste de 2 à 3 fois plus que celle obtenue sur le schiste seul.

En profondeur, les passages altérés de la formation schisteuse sont peu consistants et peuvent être le siège de glissements de terrains profonds.

6- Conclusion

Au laboratoire, nous avons reproduit le processus d'altération par des cycles climatiques et par le processus d'altération chimique par l'effet des produits (sulfates, phosphates et détergents).

Il est primordial de prendre en compte ce phénomène d'altération. En effet, il peut causer de graves dommages au versant qui apparaissent sous formes de fissures ou de déformations excessives.

D'une part, les résultats des essais aux différents cycles d'altération ont mis en évidence la dégradation du matériau schisteux et montrant par là la zone de faiblesse propice à l'apparition de surface de rupture profonde et

d'autre part, les paramètres mesurés aux essais mécaniques de cisaillement et œdométrique confirment une nette diminution de la résistance au cisaillement et une forte compressibilité du matériau schisteux altéré particulièrement par les détergents.

Références bibliographiques

- [1] Afir, D. et Mezaoua., *Application et dimensionnement d'un procédé de coagulation-floculation pour le traitement des eaux résiduaires de la papeterie de Baba Ali.*, mémoire d'ingénieur, Ecole Nationale Polytechnique, 1984.
- [2] Djerbal, L., et Melbouci, B., *Le glissement de terrain d'Ain El Hammam (Algérie) : causes et évolution.*, Bulletin of Engineering Geology and the Environment, Vol. 71, pp 587-597, 2012.
- [3] Geomica., *Étude géotechnique de la zone de tassement d'Ain El Hammam (phase II)-Rapport interne.*, 2009.
- [4] Kechidi, Z., *Application des études minéralogiques et géotechniques du schiste au glissement de terrain d'Ain El Hammam.*, Mémoire Master, Université de Tizi-Ouzou, 152 p, 2010.
- [5] Murakami, M., Nakajima, F. and Furumai, H., *Modelling of Runoff Behavior of Particle-Bound Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) From Roads and Roofs.*, Water Research 38, pp 4475-4483, 2004.
- [6] Porokhovoi, E., *Stabilité à long terme des talus de mines à ciel ouvert dans les massifs de roches basiques et ultrabasiques.*, Thèse de Doctorat de l'Ecole des Ponts et Chaussées en Géologie de l'Ingénieur, 1995.
- [7] Zhang, W., Keller, A. A., Yue, D. and Wang, X., *Management of urban road runoff containing PAHs: Probabilistic modeling and its application in Beijing, China.*, Journal of the American Water Resources Association 45(4), 1009-1018, 2009.