



EFFETS DES EAUX POLLUÉES AUX SULFATES ET AUX NITRATES SUR LE GONFLEMENT DES MARNES

EFFECTS OF POLLUTED WATER WITH SULPHATES AND NITRATES ON THE SWELLING MARLS

Réception : 11/03/2021

Acceptation : 31/05/2021

Publication : 18/06/2021

LARBI Thiziri¹ et MELBOUCI Bachir¹Larbithiziri229@gmail.com et melbouciba@hotmail.fr

¹Laboratoire Géo-Matériaux Environnement et Aménagement, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou

Résumé - Le sol du Nord algérien, en particulier la formation marneuse de la Grande Kabylie, présente une sensibilité remarquable au gonflement par leur hétérogénéité et leur nature minéralogique. Bien que cet aléa ne présente pas de danger particulier à l'homme, il engendre des désordres considérables aux bâtiments, constructions légères, ouvrages de soutènement, routes, etc. Afin d'apprécier l'aptitude des sols à ce phénomène, une étude expérimentale a été réalisée. Elle est menée sur des matériaux marneux naturels ou acidifiés avec les sulfates et les nitrates et qui a essentiellement pour but de mieux comprendre les mécanismes régissant le développement des déformations dues au gonflement de ce matériau ainsi que le rôle des acides sur ce phénomène. Les résultats obtenus montrent que le comportement du matériau marneux avec les acides est notamment caractérisé par une réduction des paramètres de gonflement. Cette réduction de la pression de gonflement est plus importante en présence des quantités importantes d'eau et de sulfate.

Mots - clés : marne ; eau polluée ; sulfate ; nitrate ; gonflement ; désordres.

Abstract - The soil of northern Algeria, in particular the marly formation of Great Kabylia, presents a remarkable sensitivity to swelling by their heterogeneity and their mineralogical nature. Although this hazard does not present any particular danger to humans, it causes considerable damage to buildings, light constructions, retaining structures, roads, etc. In order to assess the suitability of soils for this phenomenon, an experimental study was carried out. It is carried out on natural marly materials or acidified with sulfates and nitrates and the main aim of which is to better understand the mechanisms governing the development of deformations due to the swelling of this material as well as the role of acids on this phenomenon. The results obtained show that the behavior of the marly material with acids is notably characterized by a reduction in the swelling parameters. This reduction in swelling pressure is greater in the presence of large amounts of water and sulphate.

Keywords: Marl; polluted water; sulfate; nitrate; swelling; degradation

1- Introduction

Les préoccupations environnementales (pollution et changements climatiques) actuelles ainsi que les autres facteurs anthropiques causés par l'homme posent de nouvelles questions quant à l'évolution des risques liés au glissement, effondrement, affaissement, retrait-gonflement,

Le retrait-gonflement est un phénomène qui fait partie de la catégorie des mouvements de terrains naturels lents. Le gonflement est en effet un phénomène qui se traduit par une augmentation du volume du sol ou un accroissement des pressions régnant dans le milieu selon que le massif peut se déformer ou non. Ces sols augmentent de volume au contact de l'eau et se rétractent en formant des fentes de rétrécissement. Alors que les mécanismes de gonflement se manifestent à l'échelle microscopique, c'est à l'échelle macroscopique que les problèmes géotechniques sont couramment examinés. Les facteurs à l'origine de ce phénomène sont divers et multiples. Le déclenchement du processus de gonflement du sol argileux peut résulter de la diminution des contraintes en place après une excavation, un déchargement ou d'une imbibition du sol sous un état de contraintes constant. Par ailleurs, la composition minéralogique et la texture des sols concernés sont aussi des facteurs préliminaires de cet aléa. Cependant, les problèmes posés aux ouvrages de génie civil par le gonflement de ces sols et/ou roches sont néfastes, ils génèrent des tassements différentiels et des dommages à ces constructions par les déformations ou les pressions qu'ils développent.

De nos jours, de nombreuses recherches et études sont faites et/ou en cours pour limiter les conséquences occasionnées par ce phénomène représentant une onéreuse et croissante sinistralité naturelle. Mais le processus de gonflement met en jeu simultanément différents facteurs et divers phénomènes physiques, ce qui complique singulièrement les démarches entreprises tant sur le plan expérimental que théorique.

Dans le but de prévention pour avoir des ouvrages durables, une étude du comportement

gonflant de ce matériau marneux a été réalisée. L'objectif général de ce travail est d'apporter une contribution à la compréhension et à la caractérisation du phénomène de gonflement de la marne de la région de Tizi-Ouzou en Grande Kabylie et ses conséquences sur le glissement des versants marneux.

2- Gonflement des sols argileux et marneux

L'amélioration de la connaissance des mécanismes physico-chimiques lors du gonflement des matériaux argileux et marneux est une étape incontournable pour la caractérisation de la sensibilité de ces sols et de leur prédisposition vis-à-vis du phénomène de gonflement.

Le sol subit un ensemble de modifications, dans le temps, engendrées par des sollicitations cycliques sous forme de chargement-déchargement et de variations saisonnières. Lors de précipitations, les sols se réhumidifient, ils gonflent et des soulèvements différentiels peuvent être à l'origine de nouveaux désordres. Contrairement aux phénomènes de tassement par consolidation, les effets ne s'atténuent pas avec le temps mais augmentent quand la structure perd de sa rigidité. La problématique du gonflement des sols argileux retient fréquemment l'attention des ingénieurs et des chercheurs en géotechnique par le fait que les nombreux dégâts résultant de ce phénomène coûtent cher [1].

La littérature contient un nombre considérable d'approches empiriques qui permettent d'apprécier le potentiel de gonflement des sols. L'interaction eau-solide est régie par des phénomènes complexes à l'échelle microscopique, en liaison avec la composition minéralogique de la roche, sa cimentation, sa structure (assemblage des particules, agglomérats, anisotropie de structure, vieillissement), sa porosité, la forme des pores, son hétérogénéité, la fissuration, la composition chimique de l'eau et sa viscosité, l'état de saturation du milieu et son état de succion, sa perméabilité à l'air et à l'eau, son comportement mécanique, l'état des contraintes et la variation du champ des contraintes et la sur-consolidation. De nombreux facteurs sont susceptibles de modifier les conditions d'équilibre hydrique des

sols. Le principal facteur de prédisposition est lié à la nature du sol et à la géométrie des couches.

De nombreux travaux ont été réalisés afin d'étudier le problème de retrait-gonflement des sols argileux [2, 3, 4, 5]. Pour Jennings [6], le gonflement peut être attribué au climat et à la surcharge, et d'après Nowamooz. [7], les mouvements du sol, qui sont à l'origine des désordres des constructions, sont dus essentiellement aux diminutions de teneur en eau. D'après Edil et Alanazy [8], la teneur en eau initiale influe sur le gonflement du sol, plus cette teneur est faible, plus le gonflement sera important. Pour Mouroux et al. [9], la perte en eau des sols se traduit par une augmentation de la succion, suivie d'une diminution de volume et enfin par la création de fissures de retrait à la surface. Kassif et al. [10] ont montré que la pression de gonflement développée par un sol est fonction de la succion. Sridharan et al. [11] ; Serratrice et Soyez [12] ; Bigot et Zerhouni [13], ont étudié le gonflement des marnes à partir des essais œdométriques et ont montré que la réponse de la marne étudiée dépend aussi du nombre de paliers de déchargement et de la progression des contraintes entre les paliers.

En outre, de nombreuses recherches ont été menées pour tester l'efficacité de diverses solutions salines susceptibles de réduire le gonflement des argiles. Morgenstern et Balasubramonran [14] ont montré que l'eau distillée ou pure évince les substances chimiques augmentant par conséquent le gonflement et la pression de gonflement. Hachichi et Fleureau [15], Aboubeker et al. [16], Azouz [17], Hachichi et al. [18], Benaissa [19] et Belabbaci [20], ont étudié la réduction du gonflement de plusieurs échantillons intacts d'argile par des sels. Dans cette étude, des réductions substantielles ont été obtenues avec de fortes concentrations de sels. Quant à Bengueneb [21], son étude porte sur le gonflement des sols actifs sous différentes conditions de salinité. Daupley [22] a effectué, sur des échantillons d'argilite de Tournemire immergés dans différentes solutions salines, des essais de gonflement libre suivant une direction normale à la stratification. Les résultats obtenus montrent une diminution du gonflement avec l'augmentation de la concentration en sel.

2.1- Dégradations dues aux massifs marneux

Plusieurs accidents géotechniques (glissement de terrains, tassement, retrait/gonflement, fluage, etc.) liés à la nature des sols fins sont recensés ces dernières années. Ils résultent du caractère différentiel que prennent les mouvements de sol de fondation suite à un apport d'eau et sollicitant la structure en flexion ou en cisaillement. Ces différents mouvements sont sujet à plusieurs études menées afin d'assurer la sécurité et la stabilité de l'ouvrage en service.

Ces phénomènes de gonflement et de retrait causent de nombreux désordres pour les structures de génie civil fondées sur des sols gonflants. Divers désordres (fissures au niveau des poteaux, des murs de remplissage et des plafonds) ont été répertoriés dans ce domaine [23, 24, 9, 25, 15, 26, 27, 28 et 29]. Dans le domaine routier, les désordres constatés sont essentiellement des fissures longitudinales et transversales apparaissant dans la chaussée, avec ou sans dénivelée, et souvent de quelques centimètres d'écartement. Ces fissures ont été essentiellement observées [30] au niveau des culées d'ouvrages d'art, dans les bandes de roulement des chaussées et sur les accotements.

Concernant la région de Tizi-Ouzou, elle a connu une intense activité des mouvements de terrain depuis 2009 qui ont affectés plusieurs villes telles que : Azazga, Talla Allam, Tigzirt, etc. La géologie de ces versants est caractérisée essentiellement par un couvert végétal reposant sur un substratum marneux. Les multiples observations faites sur les différents glissements de terrain de ces versants, ont montré que ces derniers se produisent souvent peu de temps après des épisodes pluvieux. Ces observations ont également permis de mettre en évidence le rôle primordial de l'eau et de la valeur des pentes dans le déclenchement des ruptures engendrées suite aux surpressions interstitielles. En effet, l'eau agit sur ces versants de différentes manières, en l'occurrence par l'augmentation du poids du versant, la modification de sa géométrie, l'altération des caractéristiques mécaniques du substratum marneux en profondeur, etc. En outre, plusieurs nouvelles instabilités ont été observées dans ces versants

réalimentés par les eaux usées (qui se déversent directement ou par infiltration suite au réseau d'assainissement défectueux). L'infiltration profonde de ces eaux polluées jusqu'au substratum marneux engendre un stockage qui brise progressivement les liaisons existantes entre les différents composants du matériau marneux en créant des zones de faiblesse profondes au niveau du versant instable. Ce qui explique l'observation en profondeur (d'après les sondages carottés) d'une alternance de marnes saines et de passages complètement altérés. En outre, l'eau en s'infiltrant à travers les fissures de traction de la couche du couvert végétal a réalimenté directement la zone de stockage et a augmenté considérablement les pressions interstitielles qui ont engendré des soulèvements des couches superficielles et donc des gonflements (figures 1 à 4).



Figure 1 : Soulèvement de la dalle d'une maison à Azazga en 2012

Figure 1 : An uprising of the house slab in Azazga in 2012



Figure 2: Dégradation d'un poteau et d'un mur de cloison suite à un soulèvement de cette structure à Azazga 2012.

Figure 2 : Degradation of a post and a partition wall following an uprising of this structure at Azazga 2012.



Figure 3 : Route lézardée à Tizirt en 2014.

Figure 3 : Cracked road in Tizirt in 2014.



Figure 4 : Fissuration d'un mur de clôture à Tizirt en 2014.

Figure 4 : Cracking of a fence wall in Tizirt in 2014.

3- Pollution des eaux souterraines

La pollution des eaux est devenue ces dernières années le facteur majeur de la modification des propriétés physique, chimique, biologique, minéralogique, mécanique et géologique des sols et des roches. L'eau est un excellent véhicule, notamment pour les agents agressifs comme les acides ou le gaz carbonique. La composition minérale des eaux souterraines varie suivant le terrain sur lequel elles évoluent, la pluviométrie et les rejets de polluants provenant des activités humaines.

La pollution des eaux souterraines peut être due soit aux contaminations naturelles (infiltration d'eau de surface, lixiviation naturelle, ...), soit à l'activité humaine liée à l'évacuation des déchets d'une manière directe (eaux d'égout, déchets solides, eaux usées, ...) ou de manière indirecte (activités agricoles, pluies acides, sels de déverglage, ...).

D'après Beauchamp [31], dans le milieu souterrain, l'évolution des polluants est très lente, des mois, des années, ou même des dizaines d'années, comparativement à ce qui se passe en surface. Ce temps de transfert dépend principalement de l'épaisseur de la zone non saturée, c'est à dire la profondeur de la surface piézométrique, de la perméabilité du réservoir (fissuration) ou le pouvoir de filtration et les caractères du polluant. Pendant la période hivernale ou pluvieuse, l'augmentation du niveau piézométrique accélère la propagation des polluants qui se trouvent sur le sol ou piégés dans la zone insaturée [32]. Il est à signaler que la nature géologique du terrain a une influence déterminante sur la composition chimique de l'eau retenue. À tout instant, l'eau est en contact avec le sol dans lequel elle stagne ou circule : il s'établit un équilibre entre la composition du terrain et celle de l'eau. Les polluants ayant contaminé la nappe sont en effet non seulement présents dans l'eau, mais également adsorbés sur les roches et minéraux du sous-sol.

D'après les auteurs [33, 34 et 35], l'eau chargée en sels pénètre dans le réseau poreux des massifs rocheux, les cristaux s'y développent. L'action combinée de la cristallisation des sels, de leur hydratation et de leur dilatation thermique peut produire des fissures au sein de la matrice rocheuse [36].

Dans notre cas, le manque de réseaux hydriques naturels et l'absence de tous systèmes de drainage favorisent la stagnation et l'infiltration des différentes eaux (polluées ou non polluées) au niveau des versants. Ce processus est aussi accéléré par la présence, au niveau des versants de Tigzirt et d'Azazga, de plusieurs zones de fissuration non traitées. En outre, une importante perméabilité du couvert superficiel a été observée lors de la réalisation des sondages carottés sur les deux sites d'Azazga et de Tigzirt. Cette caractéristique facilite l'infiltration de l'eau des précipitations, et des eaux usées déversées dans ces versants et augmente ainsi le poids des formations géologiques de ces derniers. Ce qui augmente l'effort moteur d'une part et fait, d'autre part, chuter l'effort résistant au niveau de l'interface entre le couvert superficiel et le substratum marneux (sous l'effet de l'écoulement de ces

eaux polluées au niveau du substratum marneux imperméable).

4- Caractérisation et identification du matériau marneux

La marne est une roche sédimentaire constituée d'un mélange de calcite (CaCO_3) et d'argile dans des proportions à peu près équivalentes variant de 35 % à 65 %. Sa sensibilité à l'eau favorise les instabilités de pente. Le fluage des marnes ou des formations marno-calcaires, est à l'origine de glissement de terrain ou de catastrophes régulières. Sa composition argilo-marneuse la rend très sensible à l'érosion et elle se dégrade rapidement en formant un sol composé de grains en plaquettes plus ou moins argileuses et évolutives.

Le caractère évolutif des marnes peut remettre en cause la géométrie d'équilibre des ouvrages. Les pentes de talus de remblais établies en tenant compte des caractéristiques des matériaux rocheux au moment de l'extraction ne sont plus valables lorsque le matériau a évolué en matériau fin. Cependant, des désordres sont constatés même sur des remblais de faible hauteur.

Dans cette étude, les marnes évolutives de la région de Tizi-Ouzou (sites de Tizi-Ouzou, d'Azazga et de Tigzirt) sont étudiées en fonction de leur degré d'altération. Nous tentons d'évaluer le rôle de la présence de certains acides dans l'eau dans le phénomène du gonflement de la marne et ses conséquences sur les glissements de terrain de la région. Ces marnes sont caractérisées par un CaCO_3 oscillant entre 32 et 43 %.

Un programme d'essais permettant d'identifier au mieux le matériau marneux comprenant : les poids volumiques humide, sec et des particules solides, la teneur en eau pondérale, la porosité, les limites d'Atterberg, les caractéristiques Proctor et le VBS, a été réalisé.

Les principaux résultats d'essais d'identification sont regroupés dans les tableaux 1 et 2.

Tableau 1 : Caractéristiques physiques de la marne.

Table 1 : Physical's characteristics of the marly material.

Caractéristiques	Marne en bloc	Marne remaniée
γ_h [kN/m ³]	25	20,4
γ_d [kN/m ³]	23,2	19,7
γ_s [kN/m ³]	26,3	26,3
W [%]	3,21	3,78
n [%]	11,79	25,10
Sr [%]	7,59	3,03

Les poids volumiques sont déterminés à l'état remanié du matériau marneux et à l'état de bloc. Ceci nous a permis de montrer la grande différence de ces caractéristiques physiques à ces deux états. La teneur en eau et la porosité obtenues sont faibles. Cela est plutôt dû à la faible profondeur d'extraction du matériau marneux et au climat sec dominant en période d'extraction (mois de septembre). La faible porosité du matériau montre sa forte compacité à l'état de bloc.

Tableau 2 : Caractéristiques d'identification du matériau marneux.

Table 2 : Identification characteristics of the marly material.

Caractéristiques	Valeurs
W_L [%]	35,17
W_p [%]	21,54
I_p [%]	13,63
I_c [%]	2,30
W_{opt} [%]	10
γ_{opt} [kN/m ³]	19,24
VBS	3,16

D'après l'abaque de Casagrande, les résultats des limites d'Atterberg montrent que ces matériaux sont des argiles peu plastiques (Ap) et l'essai au bleu de méthylène, d'après le GTR 92 [37] confirme qu'on est en présence d'un sol argileux peu plastique.

5- Echantillonnage et essais réalisés

L'influence des ajouts des produits chimiques à la marne sur la courbe de compressibilité œdométrique du sol a été plus particulièrement étudiée. On distinguera deux types de gonflement : le gonflement libre et le gonflement sous chargement.

Les sels utilisés à différentes concentrations sont des sulfates et des nitrates. Les solutions salines ont été préparées par dissolution de sels dans l'eau déminéralisée. Ces sels ont été choisis du fait qu'ils sont fréquents dans la composition de l'eau interstitielle des formations argilo-marneuses de la région.

5.1- Confection des éprouvettes et mode opératoire des essais œdométriques

Les sols marneux étudiés sont à une profondeur variant de 4 à 30m, et sont soumis à un chargement de la couche superficielle et à une surcharge due aux constructions (cas de Tigzirt et d'Azazga). La couche marneuse est ainsi compactée au maximum. En absence de sondages carottés pour notre étude, nous avons utilisé des échantillons remaniés compactés à l'optimum Proctor pour simuler et approcher la réalité du terrain.

Les échantillons soumis à l'essai œdométrique sont ainsi taillés sur des éprouvettes de sol confectionnées à l'essai Proctor Normal. Sept types d'échantillons ont été confectionnés pour cette étude :

- Echantillons de marne initiale à l'optimum Proctor ;
- Echantillons de (Marne + Nitrate) à l'optimum Proctor ;
- Echantillons de (Marne + Nitrate) à ($w > w_{opt}$) ;
- Echantillons de (Marne + Sulfate) à l'optimum Proctor ;
- Echantillons de (Marne + Sulfate) à ($w > w_{opt}$) ;
- Echantillons de Marne + mélange (Sulfate + Nitrate) à Sulfate dominant ;
- Echantillons de Marne + mélange (Nitrate + Sulfate) à Nitrate dominant .

Afin d'évaluer le comportement gonflant du sol et l'influence des acides sur ce dernier, deux modes d'essai de gonflement sont utilisés pour les différents sols (avec ou sans acides).

- La méthode de gonflement avec chargement qui, une fois l'échantillon taillé au diamètre de la bague, il est placé dans la cellule œdométrique entre deux pierres poreuses et rempli d'eau. L'échantillon saturé est soumis à un cycle de chargement-déchargement par paliers sous des pressions allant de 25 kPa à 3200 kPa et de 3200 kPa à 25 kPa respectivement.
- Pour la méthode de gonflement libre, l'échantillon taillé est placé dans la cellule œdométrique sous une pression verticale faible correspondante au poids de la pierre poreuse et du piston et laissé en contact avec l'eau. Une fois le phénomène de gonflement stabilisé, l'éprouvette est ensuite soumise à un chargement par paliers avec stabilisation des déformations sous chaque palier [38].

5.2- Caractérisation des paramètres de gonflement

Les méthodes de caractérisation de l'amplitude de gonflement consistent à mesurer directement les paramètres de ce phénomène. Il est caractérisé par différentes grandeurs à savoir : l'indice de gonflement (C_g), l'indice de gonflement libre (I_g), le potentiel de gonflement ($\Delta h/h_o$ %) et la pression de gonflement (P_g).

L'approche macroscopique paraît plus adaptée en géotechnique. Elle distingue les trois notions : la pression de gonflement, le potentiel de gonflement et l'indice de gonflement qui sont mesurées sur des éprouvettes en compression œdométrique. La pression de gonflement et le potentiel de gonflement sont obtenus à la saturation du sol, par contre l'indice de gonflement est issu du déchargement mécanique.

6- Présentation et interprétation des résultats

Les différents essais sur sols naturels ou contenant les acides ont permis de constater plusieurs faits en aboutissant à plusieurs résultats pour les différents modes de gonflement réalisés.

Les résultats sont présentés sous forme de courbes œdométriques et de tableaux regroupant les différentes caractéristiques du gonflement. L'objectif recherché était d'analyser les effets de l'historique du chemin chimique avec des concentrations croissantes des sels utilisés et de mettre en évidence, sur le gonflement axial, le rôle de chaque type de sel et de la contrainte appliquée.

6.1- Cas des essais par paliers

Les principaux résultats obtenus lors de la campagne d'essais œdométriques sur le gonflement sont représentés sur les figures 5, 6 et 7 et les caractéristiques sont regroupées dans le tableau 3. Les classifications de l'état de consolidation en fonction de C_c et du risque de gonflement en fonction de C_g sont celles de Philipponnat [39].

Ces caractéristiques (pression de pré-consolidation, C_c , C_g , P_g et A_g) varient en fonction de la nature du sel d'ajout ou du mélange des sels d'ajout et de la teneur en eau.

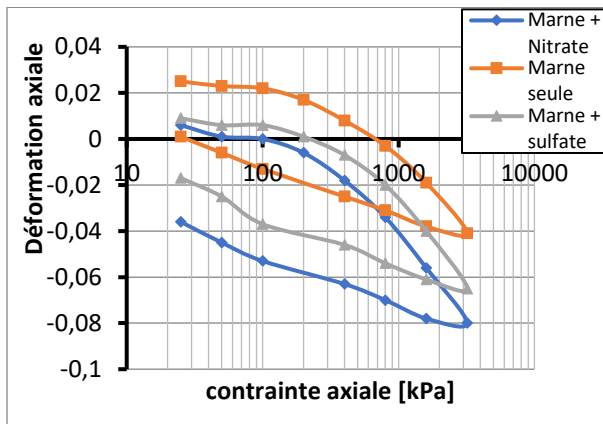


Figure 5 : Courbes œdométriques obtenues pour la marne seule, avec nitrate et avec sulfate.

Figure 5 : Oedometer curves obtained for marl alone, with nitrate and with sulfate.

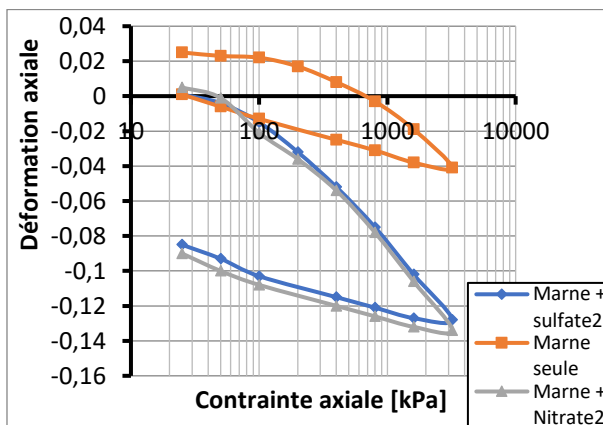


Figure 6 : Courbes œdométriques obtenues pour la marne seule, avec nitrate $w > w_{opt}$ et avec sulfate $w > w_{opt}$.

Figure 6 : Oedometer curves obtained for marl alone, with nitrate ($w > w_{opt}$) and with sulfate ($w > w_{opt}$).

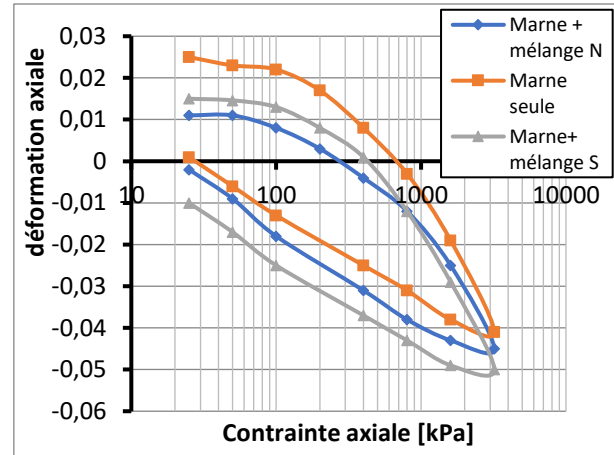


Figure 7 : Courbes œdométriques pour le matériau marneux seul et le matériau marneux acidifié par les sulfates dominants et nitrates dominants.

Figure 7 : Oedometer curves for the marly material alone and the marly material acidified by the dominant sulphates and the dominant nitrates.

Tableau 3 : Résultats de l'étude de gonflement avec chargement à l'œdomètre pour le matériau marneux et le matériau marneux acidifié par les sulfates et nitrates.

Table 3 : Results of the swelling study with oedometer loading for marly material and marly material acidified by sulphates and nitrates.

Sol	Marne seule	Marne + Sulfates			Marne + Nitrates		Marne + Mélange « Nitrates+ Sulfates dominant »	Marne + Mélange « Sulfates+ Nitrates dominants »
Teneur en eau	w_{opt}	w_{opt}	$w > w_{opt}$	w_{opt}	$w > w_{opt}$	w_{opt}	w_{opt}	w_{opt}
Pression de pré-consolidation σ'_p (KPa)	480	475	165	410	145	390	560	
Indice de compression C_c	C_c	0.06	0.07	0.09	0.15	0.09	0.07	0.07
	Classement	0.05 à 0.1	0.05 à 0.1	0.1 à 0.2	0.05 à 0.1		0.05 à 0.1	
	Etat de compressibilité du sol	Peu	Peu	Moyen	Peu		Peu	
Indice de gonflement C_g	C_g	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
	Classement	0.02 à 0.03	0.02 à 0.03		0.02 à 0.03		0.02 à 0.03	
	Risque de gonflement	Possible	Possible		Possible		Possible	
Pression de gonflement P_g (KPa)	690	210	30	100	48	410	270	
Amplitude de gonflement A_g (%)	2.4	2.6	8.6	4.2	9.5	2.7	1.2	

La pression de pré-consolidation présente une diminution importante pour les sols mélangés aux acides (sulfates ou nitrates), à des teneurs en eau élevées ($w > w_{opt}$), comparés à la marne seule (tableau 3). De ce fait, ces acides contribuant à cette chute diminuent la résistance du sol en cassant les liaisons entre les différents minéraux.

La pression de gonflement de la marne seule est plus grande que celle des mélanges de la marne avec les différents acides, ce qui explique alors l'effet des acides sur la réduction de la pression de gonflement (tableau 3).

Ces analyses montrent que les sulfates et les nitrates utilisés séparément dans la marne ont tendance à annuler la pression de gonflement particulièrement lorsque la teneur en eau du sol est au-delà de l'optimum Proctor ($w > w_{opt}$) et engendrent des amplitudes de gonflement qui peuvent atteindre 9%. Quand ces acides (sulfates et nitrates) sont utilisés en tant que mélange dans la marne, la pression de gonflement résultant demeure faible mais cette valeur reste intermédiaire entre celles de la

marne seule et avec les acides utilisés séparément dans la marne. En conséquence, ces acides jouent certainement un rôle important dans la minéralogie du sol marneux.

Le gonflement de la marne mélangée aux acides (sulfates ou nitrates) utilisés séparément est d'autant plus faible par rapport à celui de la marne seule que si la quantité d'eau du sol est plus importante ($w > w_{opt}$) (tableau 3). Par ailleurs, si ces acides sont utilisés en tant que mélange, le gonflement du matériau marneux acidifié reste faible par rapport à la marne seule mais plus important comparé à la marne mélangée aux acides (sulfate ou nitrate) séparément (tableau 3). Ceci est peut-être dû aux différentes réactions chimiques agissant par ces acides sur les différents composants de la marne. Les minéraux argileux sont des composants réactifs avec l'eau et très sensibles aux variations du pH du sol, ce qui diminue la plasticité des marnes ainsi que leur pression de gonflement. En outre, le calcaire a une réaction importante avec l'eau et les acides. En milieu acide, le CaCO_3 se convertit en bicarbonate de

calcium $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ sous l'effet de l'acide carbonique (H_2CO_3). Ces réactions chimiques se produisant entre les minéraux argileux et les acides, et entre l'eau et le calcaire, détruisant les liaisons entre les composants de la marne, ce qui induit une diminution du comportement gonflant de celle-ci. Ces différentes interactions chimiques à l'échelle microscopique sont à

l'origine des différentes manifestations macroscopiques des sols possédant les acides au phénomène de gonflement.

6.2- Gonflement libre

Les principaux résultats obtenus lors de la campagne d'essais sur le gonflement libre sont regroupés dans le tableau 4.

Tableau. 4 : Résultats de l'étude de gonflement libre à l'œdomètre pour le matériau marneux et le matériau marneux acidifié.

Table 4 : Results of the oedometer free swelling study for marly material and acidified marl material.

Sol	Marne seule	Marne + Sulfates		Marne + Nitrates		Marne + Mélange « Nitrates + Sulfates dominants »	Marne + Mélange « Sulfates + Nitrates dominants »
Teneur en eau	W_{opt}	W_{opt}	$W > W_{opt}$	W_{opt}	$W > W_{opt}$	W_{opt}	W_{opt}
Pression de gonflement P_g (KPa)	380	155	8.7	150	39	400	590
Gonflement libre : $\varepsilon_g (\%) = \frac{\Delta H}{H} \times 100$	3.78	2.59	0.22	2.00	0.20	3.14	5.13

Avec : ΔH : augmentation de la hauteur maximale de l'essai et H : hauteur de l'échantillon ou de l'anneau.

Le tableau 4 montre que P_g diffère en fonction de la nature du sel d'ajout ou du mélange de sel d'ajout et de la concentration du sel dans la teneur en eau.

La pression de gonflement de la marne seule obtenue à partir d'un essai de gonflement libre est de 380 kPa et est inférieure à celle obtenue à partir d'un essai de chargement qui est de 690 kPa. Ce résultat est en contradiction avec les résultats de la littérature. En effet, d'après Jennings et al. [40], la procédure de gonflement libre dans ce type de sol évolutif peut entraîner une modification de leur structure pendant le gonflement avant le retour à une déformation nulle ce qui peut engendrer une baisse de cette pression de gonflement.

La pression de gonflement enregistrée ainsi que le taux de gonflement calculé pour la marne mélangée avec les acides (sulfate et nitrate) utilisés séparément sont plus faibles que ceux de la marne seule ou avec les mélanges de ces acides (tableau 4). A noter que ces deux

paramètres sont d'autant plus faibles lorsqu'on est en présence de quantité d'eau très importante ($w > w_{opt}$), en particulier dans le cas de la marne acidifiée de sulfates. Ceci est une conséquence des effets négatifs de chaque acide pris séparément sur les minéraux composant la marne et sur les liaisons liant les composants de la marne.

Par contre dans le cas de la marne soumise aux mélanges de sulfates et de nitrates, les valeurs de cette pression et du gonflement calculé sont proches ou supérieures de celles de la marne seule (tableau 4). Ce résultat est en contradiction avec l'affirmation que l'ajout de sels à un sol gonflant réduit le gonflement. Cette contradiction peut s'expliquer par des réactions chimiques qui permettent une recristallisation des minéraux du matériau marneux en présence de ces sels et qui donne une nouvelle pression de gonflement plus importante.

A titre de comparaison avec l'essai avec chargement où P_g de la marne acidifiée a été toujours inférieure à P_g de la marne seule, ceci montre que P_g ne dépend pas uniquement de l'ajout des sels, mais aussi de la compacité due au chargement.

Ces résultats confirment que l'infiltration des eaux de pluies et des eaux usées dans les fissures du substratum marneux détruisent les liaisons qui existaient entre les différents minéraux et l'effet des surpressions interstitielles brisent progressivement le matériau marneux jusqu'à la rupture. Ce processus hydrogéologique explique l'évolution importante, en profondeur et latérale, des mouvements de terrain observés.

7- Conclusion

Ce travail consacré aux comportements des matériaux marneux sains et acidifiés, a mis en évidence l'effet du gonflement de ces matériaux et le rôle des acides sur ce phénomène. En effet, la forte perméabilité de la couche superficielle, l'absence ou le dysfonctionnement d'ouvrages d'assainissement superficiel favorisent l'alimentation en eau polluée en continu de la zone de stockage. Des précipitations efficaces cumulées élevées sur de longues périodes permettent l'infiltration jusqu'à la couche marneuse et leur saturation. Le comportement de celle-ci en présence d'eau acidulée a été mis en évidence au laboratoire.

L'étude de gonflement réalisée à l'œdomètre sur des échantillons de marne seule ou contenant des acides montrent que les acides utilisés séparément diminuent le comportement gonflant des marnes et donnent des pressions de gonflement faibles comparées à celle de la marne seule particulièrement dans le cas des gonflements obtenus avec des essais par paliers. Par ailleurs, la marne seule ou mélangée à des mélanges de sulfate et nitrate présentent un comportement assez proche. Ceci est dû aux effets des acides sur la marne qui agissent par des réactions chimiques en contribuant à la formation de nouvelles liaisons de cohésion entre les minéraux marneux ou à une recristallisation qui conduit à un comportement gonflant des marnes acidifiées proches de celui de la marne seule.

En gonflement libre et avec chargement par paliers à l'œdomètre, le comportement des sols avec acides est notamment caractérisé par une réduction des paramètres de gonflement. Cette diminution de la pression de gonflement principalement est plus importante en présence de quantités importantes d'eau et de sulfates notamment.

Par ailleurs, ces essais ont montré que la marne seule ou avec les différents mélanges des acides ont une aptitude similaire ou importante au gonflement. La pression de gonflement dépend non seulement de la nature du sel d'ajout ou du mélange de sels d'ajout mais aussi de la compacité due au chargement.

8- Références bibliographiques

- [1] Vincent M., Le Nindre Y.M., Meisna C., Chassignol A.L. (1998), Cartographie de l'aléa retrait-gonflement des argiles dans le département des Deux-Sèvres, *Rapport BRGM R 39967*, 89 pp.
- [2] Skempton A.W. (1962), Horizontal stresses in an over-consolidated Eocene clay, *Proceedings of the 5th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, vol. 1, pp. 351-357
- [3] Chen X. Q. et Ma G. S. (1987), Swelling and shrinkage behaviour of expansive clays, *Proc. 6th Int. Conf. on Expansive Soils*, New Delhi, vol. 1, pp. 127-129.
- [4] Basma A.A., Al-Homoud A.S., Malkawi A.I.H., Al-Bashabsheh M.A. (1996). Swelling - Shrinkage behavior of natural expansive clays. *Applied Clay Science*, 11, pp. 211-227.
- [5] Thomas P.J., Baker J.C., Zelazny L.W. (2000), An expansive soil index for predicting shrinks well potential, *Soil Science Society American Journal*, vol. 64, pp. 268-274.
- [6] Jennings J.E.B & Burland J.B., (1962), Limitations to the use of effective stresses concept in partly saturated soils. *Géotechnique*, vol. 12, pp. 125-144.
- [7] Nowamooz H (2007), Retrait/Gonflement des sols argileux naturels et compactés, Thèse

de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy, France, 197 p.

[8] Edil T.B. et Alanazy A.S. (1992), Lateral swelling pressures. Proceedings of the 7th International Conference on Expansive Soils, Dallas, USA, vol. 1, pp. 272-323.

[9] Mouroux P., Margon P., Pinte J.-C. (1988), La construction économique sur les sols gonflants. Manuels et Méthodes, 14, BRGM, France.

[10] Kassif G., Baker J. C. (1971), Experimental relation between swell pressure and suction. Geotechnique, Vol. N0.3 pp. 245 à 255.

[11] Sridharan A., Rao A. S., Sivapullaiah P. V. (1986), Swelling pressure of clays, *Geotech. Testing J.*, vol. 9, 1, pp. 24-33.

[12] Serratrice J.-F., Soyez B. (1996), Les essais de gonflement. Bull. liaison Labo. P. et Ch., 204, p. 65-85.

[13] Bigot G., Zerhouni M.I. (2000), Retrait, gonflement et tassement des sols fins. Bull. des laboratoires, des Ponts et Chaussées, 229, p. 105-114.

[14] Morgenstern N. R. et Balasubramonran B. (1980), Effects of pore fluid on the swelling of clay-shale. 4th International Conference on Expansive soils, pages 190–205, Denver.

[15] Hachichi A., Fleureau J.-M. (1999), Caractérisation et stabilisation de quelques sols gonflants d'Algérie. Revue française de géotechnique, no 86, p. 37 -51.

[16] Aboubeker N. et Mamoune S. M. (2004), Stabilisation des sols gonflants par des sels. Colloque International de Géotechnique, pages 415–422, Beyrouth, 2004.

[17] Azzouz F.Z. (2006) « Contribution à l'étude de la stabilisation chimique de quelques argiles gonflantes de la région de Tlemcen ». Mémoire de magister Université de Tlemcen 179p.

[18] Hachichi. A, Bourokba. S.A, Benaissa A., Fleureau J.M, Hattab M., Taibi S. (2009), Etude des phénomènes retrait- gonflement et stabilisation des sols gonflants de la région

d'Oran. 19ème Congrès Français de Mécanique Marseille, 24-28 août 2009, France.

[19] Benaissa M. (2011), Etude expérimentale sur la stabilisation des sols gonflants de la région de Mostaganem et de Relizane. Mémoire de magister Université de Mostaganem.

[20] Belabbaci Z. (2014), Stabilisation des sols gonflants. Thèse de Doctorat de l'Université de Tlemcen.

[21] Bengueneb A. (2009), Etude du gonflement des sols actifs sous différentes conditions de salinité. Mémoire de magister en génie civil de l'Université de Mostaganem Algérie.

[22] Daupley X. (1997), Etude du potentiel de l'eau interstitielle d'une roche argileuse et de relations entre ses propriétés hydriques et mécaniques. Application aux argilites de Torzien de la région de Tournemire. Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, Géologie de l'Ingénieur. 172 pages.

[23] Bekkouche A., Djedid A., Bousmaha N. (1997), Construire sur les sols expansifs, Séminaire national de génie civil, M'Sila, Algérie.

[24] Chen, F. H., (1965). The use of piers to preventing the uplifting of lightly structured founded on expansive soils. Proceedings, Engineering effects of moisture changes in soils, International research and engineering conference on expansive clay soils, Texas A & M press, college station, TX.

[25] Philipponnat G. (1991), Retrait-gonflement des argiles, proposition de méthodologie, Revue française de géotechnique, 57, pp. 1-18.

[26] Derriche Z., Iguechtal L., Tas M. (1999) Comportement des ouvrages dans les argiles expansives d'In-Aménas. Revue française de géotechnique, N° 89, 1999, p. 55-65.

[27] Bahar R. & Kenai S. (2002). Désordres dus à l'infiltration des eaux : cas de la ville d'El-Affroun. Revue Française de Géotechnique, 101 : 91-103.

- [28] Yenes M., Nespereira J., Blanco JA., Suárez M., Monterrubio S. & Iglesias C. (2012), Shallow foundations on expansive soils: a case study of the El Viso Geotechnical Unit, Salamanca, Spain. *Bull. Eng. Geol. Environ.*, 71, 51-59.
- [29] Medjnoun A. (2014), Analyse, caractérisation, prévision et modélisation du comportement des argiles gonflantes. Thèse de Doctorat de l'Université de Tizi-Ouzou.
- [30] Delayahe D. et Le Roux A. (1975), Désordres sur les remblais en marne. *Bull. Liaison Labo. P., et CH., -N° 75*, Janvier-Février 1975.
- [31] Beauchamp. J. (2002). Pollution et dépollution des nappes d'eau souterraine, cours de D.E.S.S de l'Université de Picardie Jules Verne.
- [32] Bricha S., Ounine K., Oulkheir S., EL Haloui N., Attarassi B. (2007), Etude de la qualité physico-chimique et bactériologique de la nappe phréatique M'nasra (Maroc). *Revue Afrique Science*, 03(3) : 391-404.
- [33] Javey C. (1972), *Bull. BRGM*, vol. 2, III, 1, pp. 40-66.
- [34] Prick A. (1999), Etude de la cryoclastie et de l'haloclastie par méthode dilatométrique, Ed. Classe des Sciences. Académie Royale de Belgique : 1999, 311 p.
- [35] Yavuz A.B., Topal T. (2007), Thermal and salt crystallization effects on marble deterioration : Examples from Western Anatolia, Turkey. *Engineering Geology*: vol. 90, pp. 30-40.
- [36] Clark M., Small J. (1982), *Slopes and weathering*. Cambridge Topics in Geography, 2nd series, Cambridge University Press: 1982, 12 p.
- [37] Guide Technique « Réalisation des remblais et des couches de forme » Setra-LCPC, 1992.
- [38] Chretien. M. (2010), Compréhension des mécanismes de retrait-gonflement des sols argileux : approche sur site expérimental et analyse de sinistres sur constructions individuelles, Thèse de Doctorat de l'université Bordeaux 1.
- [39] Philipponnat G., Hubert B. (2002), *Fondation et ouvrage en terre*, Eyrolles, Paris, 499 pp.
- [40] Jennings J. E., Firth R. A., Ralph T. K. and Nagar N., (1973), An improved method for predicting heave using the oedometer test, *Proc. 3rd Int. Conf. on Expansive Soils*, Haifa, vol. 2, pp. 149-154.