



Effets du Sulfate de Sodium sur des Sols Argileux Améliorés par des Ajouts Cimentaires

Gadouri Hamid*, Harichane Khelifa** and Ghrici Mohamed**

*Laboratoire de Géomatériaux (Chlef), Département de Génie de la Matière, Faculté des Sciences et de la Technologie, Université Dr. Yahia Farès, Médéa, Algérie

h_gadouri@yahoo.fr

**Laboratoire de Géomatériaux(Chlef), Département de Génie Civil, Faculté de génie civil et d'Architecture, Université Hassiba Ben Bouali, Chlef, Algérie

kharichane@yahoo.fr

m_ghrici@yahoo.fr

Résumé : Une investigation expérimentale a été entreprise pour étudier l'effet de la présence du sulfate de sodium (Na_2SO_4) (0-6% par rapport à la masse du sol sec) sur le traitement de deux sols argileux à savoir un sol gris (SG) et un sol rouge (SR) par l'utilisation de la chaux (L) (0-8%), de la pouzzolane naturelle (PN) (0-20%) et de leur combinaison. Les propriétés ciblées dans cette étude sont, d'une part, les limites d'Atterberg où les échantillons stabilisés ont subi à des temps de cure de 1 à 30 jours pour obtenir une diffusion maximale du Na_2SO_4 (TDN) dans la masse du sol. Et d'autre part, la détermination de la résistance à la compression simple (RCS) après une durée de cure de 7 à 120 jours. Les résultats obtenus ont montré qu'en absence du Na_2SO_4 , les sols argileux étudiés peuvent être stabilisés avec succès par l'action combinée de la chaux et de la PN. Cependant, la présence du Na_2SO_4 fait perturber considérablement la plasticité et la RCS des sols argileux stabilisés. Cette perturbation est due à la formation d'ettringite (la formation d'ettringite dans les éprouvettes altérées a été confirmée par les essais de DRX) qui dépend aussi de plusieurs facteurs: la teneur en Na_2SO_4 , le type et la teneur en ajout utilisé, le temps de cure et enfin la composition minéralogique des sols.

Mots-clés: Sols argileux, Chaux, Pouzzolane naturelle, Stabilisation, Sulfate, Plasticité.

1. INTRODUCTION

La construction sur des terrains présentant des caractéristiques insuffisantes, ou voire médiocres, constituent un problème major pour la construction en génie civil. La méthode de la stabilisation chimique par l'addition de la chaux, du ciment ou d'autres ajouts cimentaires aux sols à traiter n'est pas nouvelle et elle reste la plus utilisée et la moins onéreuse. Le mécanisme de la stabilisation chimique des sols améliorés par ces ajouts peut être modifié par la présence des sulfates. La présence des sulfates est connue par le fait de modifier le processus de l'échange cationique et les réactions pouzzolaniques, ou voire exclure, certains types de sols d'être traités. Ils font aussi favoriser la formation des phases expansives comme l'ettringite et de la thaumasite, lesquelles sont responsables des dommages observées sur les ouvrages construits. L'effet des ces sulphates dépend de leur concentration et la de teneur en liant utilisé, de la nature minéralogique du sol, et du type de cations associés aux ions sulfates (SO_4^{2-}).

D'ailleurs, le traitement des sols par la combinaison des matériaux d'origine volcanique et de la chaux importe des effets bénéfiques sur l'amélioration des sols (Hossain et al., 2006) [1]. La PN a été utilisée pour améliorer les propriétés géotechniques de deux sols argileux (sol gris et sol rouge) telles que : la plasticité, le compactage et la RCS (Harichane et al., 2012) [2]. Mais, l'influence de la présence des sulfates sur le traitement de ces deux sols avec les mêmes ajouts n'a pas été étudiée. Donc, ce travail sera consacré essentiellement pour l'étude de l'effet d'un Na_2SO_4 sur les limites d'Atterberg et la RCS des mêmes sols stabilisés par l'utilisation de la chaux, de la PN et par leurs combinaisons.

2. INVESTIGATION EXPERIMENTALE

2.1 Matériaux Utilisés

2.1.1 Sols

Deux sols ont été étudiés, le premier est un sol argileux gris (SG), il a été prélevé à partir du projet de remblai situé à 18km au Nord-est de la ville de Chlef. Le deuxième est un sol argileux rouge (SR), il a été obtenu à partir du projet de l'Autoroute Est-Ouest situé à 25km à l'Est de la ville de Chlef. Les propriétés physico-mécaniques, et chimiques de ces sols ainsi que leur classification sont illustrées dans le Tableau 1.

2.1.2 Ajouts

La PN utilisée a été procurée de la carrière de Béni-Saf située dans l'Ouest du territoire national. Elle a été broyée jusqu'à une finesse de 420 m²/kg. La chaux utilisée est produite par la société BMSD-SARL située dans la ville de Saïda. Les propriétés physico-chimiques de ces ajouts sont présentées dans le Tableau 2.

2.1.3 Sulfate

L'élément chimique utilisé est un sulfate de sodium anhydre (Na₂SO₄).

Tableau 1 : Caractéristiques physico-mécaniques des sols

Caractéristiques physico-mécaniques et	SG	SR	Caractéristiques physico-mécaniques et	SG	SR
Couleur	Gris	Rou	Teneur en eau optimum (%)	28.3	15.3
Teneur en eau naturelle (%)	32.9	13.8	Densité sèche maximale (kN/m ³)	13.8	16.9
Densité spécifique	2.71	2.84	RCS (KPa)	100	510
Eléments passant au tamis 80µm (%)	85	97.5	Perte au feu (%)	17.03	7.13
Limite de liquidité (%)	82.8	46.5	Calcite (%)	26	4
Limite de plasticité (%)	32.2	22.7	Illite (%)	16	24
Indice de plasticité (%)	50.6	23.8	Kaolinite (%)	12	16
Classification (USCS)	CH	CL	Montmorillonite (%)	20	-

Tableau 2 : Propriétés physico-chimiques des ajouts utilisés

Nom chimique	Chaux (%)	PN (%)	Nom chimique	Chaux (%)	PN (%)
CaO	> 83.3	9.90	TiO ₂	-	2.10
MgO	< 0.5	2.42	P2O ₃	-	0.80
Fe ₂ O ₃	< 2	9.69	CaCO ₃	< 10	-
Al ₂ O ₃	< 1.5	17.5	Densité spécifique	2	-
SiO ₂	< 2.5	46.4	Plus de 90 µm (%)	< 10	-
SO ₃	< 0.5	0.83	Plus de 630 µm (%)	0	-
Na ₂ O	0.4 - 0.5	3.30	Matériau insoluble (%)	< 1	-
K ₂ O	-	1.51	Densité apparente (g/l)	600 - 900	-
CO ₂	< 5	-	Perte au feu	-	5.34

2.2 Déroulement des Essais

Trente six (36) combinaisons ont été étudiées pour chaque sol, soit un total de 72 combinaisons pour les deux sols. Les références de différentes combinaisons étudiées sont illustrées dans le Tableau 3.

Tableau 3 : Combinaisons des échantillons des sols stabilisés et perturbés, (L: chaux; S: sulfate; PN: pouzzolane naturelle)

Designation	Proportions (%)				Designation	Proportions (%)				Designation	Proportions (%)			
	Sol	PN	L	S		Sol	PN	L	S		Sol	PN	L	S
POL0N0	100	0	0	0	P10L0N0	90	10	0	0	P20L4N0	76	20	4	0
POL0N2	98	0	0	2	P10L0N2	88	10	0	2	P20L4N2	74	20	4	2
POL0N4	96	0	0	4	P10L0N4	86	10	0	4	P20L4N4	72	20	4	4
POL0N6	94	0	0	6	P10L0N6	84	10	0	6	P20L4N6	70	20	4	6
POL4N0	96	0	4	0	P20L0N0	80	20	0	0	P10L8N0	82	10	8	0
POL4N2	94	0	4	2	P20L0N2	78	20	0	2	P10L8N2	80	10	8	2
POL4N4	92	0	4	4	P20L0N4	76	20	0	4	P10L8N4	78	10	8	4
POL4N6	90	0	4	6	P20L0N6	74	20	0	6	P10L8N6	76	10	8	6
POL8N0	92	0	8	0	P10L4N0	86	10	4	0	P20L8N0	72	20	8	0
POL8N2	90	0	8	2	P10L4N2	84	10	4	2	P20L8N2	70	20	8	2
POL8N4	88	0	8	4	P10L4N4	82	10	4	4	P20L8N4	68	20	8	4
POL8N6	86	0	8	6	P10L4N6	80	10	4	6	P20L8N6	66	20	8	6

2.2.1 Limites d'Atterberg

La limite de plasticité (WP), la limite de liquidité (WL) et l'indice de plasticité (IP) ont été obtenus et réalisés conformément à la norme (ASTM D4318). Les pâtes de sol contenant du Na₂SO₄ ont été obéies à trois essais qui

correspondent aux périodes de cures de 1 à 30 jours en vue d'étudier l'effet du temps de la diffusion du Na_2SO_4 (TDN) sur la plasticité des deux sols étudiés. Les deux tests de la WL et de la WP ont été réalisés à la température ambiante.

2.2.3 Resistance à la Compression non Confinée

Des essais en compression non confinée ont été effectués sur les échantillons des sols conformément à la norme (ASTM D2166). Chaque échantillon est compacté à la teneur en eau optimale et la densité sèche maximale. A la fin de la période de cure (7, 30, 60, 90 et 120 jours), des essais de RCS sont effectués.

3. RESULTATS ET DISCUSSION

3.1 Limites d'Atterberg

Les résultats de l'effet du Na_2SO_4 , de l'addition de la chaux, de la PN et de leurs combinaisons sur la plasticité des sols argileux stabilisés sont présentés sur les Figures 1 et 2. La réduction de l'indice de plasticité (IP) indique une amélioration de l'ouvrabilité du sol. En effet, en absence du Na_2SO_4 , l'addition de 8% de chaux au sol gris importe une amélioration de la consistance qui se traduit par une réduction significative de l'IP qui est de l'ordre de 72.1% après 1 jour (Figure 1a). Un comportement similaire a été observé par d'autres chercheurs (Nalbantoglu, 2006) [3]. Dans le cas du sol rouge, l'addition de 8% de chaux fait réduire l'IP de 23.8 à 16.9% après 1 jour (Figure 2a). L'effet apporté par la PN sur les sols traités est presque négligeable par rapport à celui apporté par le traitement à la chaux seule. Cela est attribué à la faible réactivité de la PN qui ne peut se manifester qu'en présence d'un élément catalyseur comme la chaux. Dans le cas du sol gris, pour un traitement combiné de 20% de PN et de 8% de chaux, l'IP diminue de 50.5 à 10.9% après 1 jour, soit une réduction de 78.3% (Figure 1a). Cependant, pour la même combinaison, l'IP du sol rouge diminue de 23.8 à 11.1% après 1 jour. Cela traduit une réduction de 53.4% (Figure 2a). Le traitement combiné par ces deux ajouts s'avère très efficace par rapport à l'addition de la chaux seule. Cela est attribué aux rôles complémentaires joués par ces deux ajouts où les effets bénéfiques de l'un permettent de compenser les inconvénients que pourraient présenter l'autre.

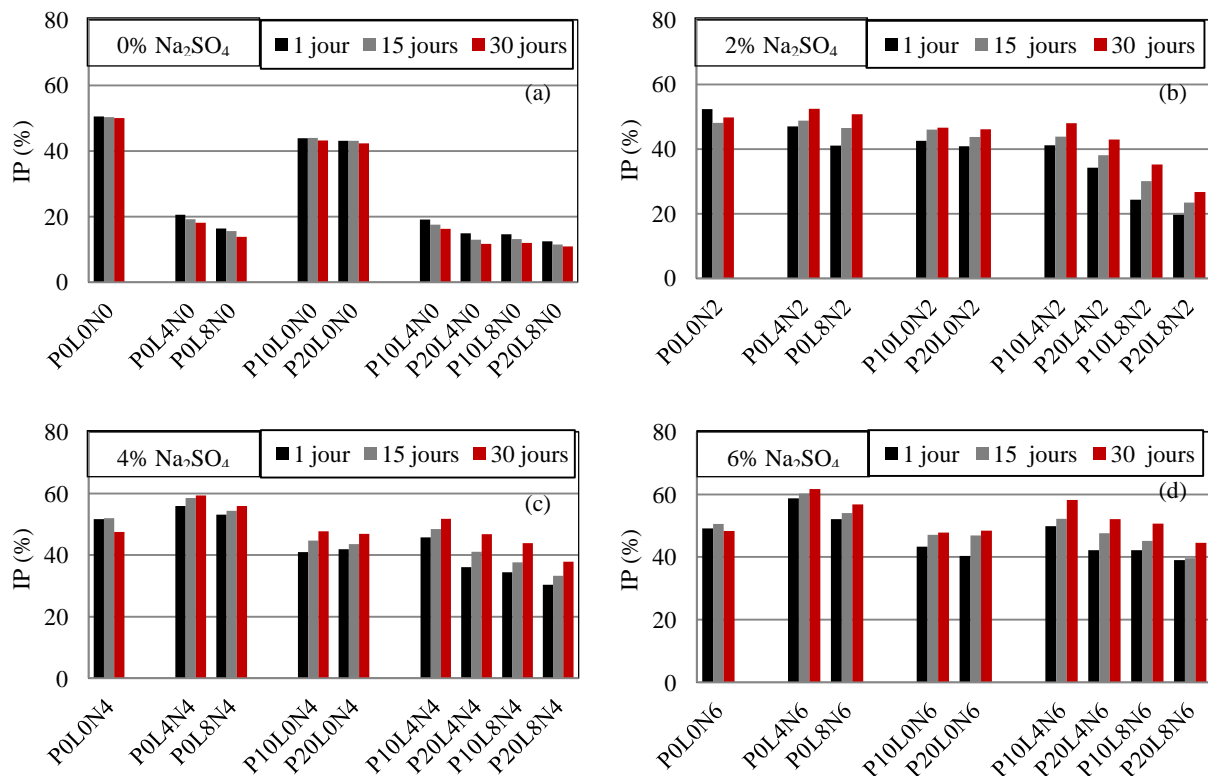


Fig. 1 : Effet de différentes teneurs en sulfate de sodium sur l'indice de plasticité du sol gris argileux

En présence du Na_2SO_4 , la stabilisation à la chaux seule avec une faible teneur en Na_2SO_4 (2%), l'IP du sol gris devient presque comparable à celui du sol non traité, puis il augmente avec l'augmentation de la teneur en Na_2SO_4 et du TDN. En revanche, pour le cas du sol rouge et quelque soit la teneur en Na_2SO_4 , l'IP augmente avec l'augmentation du TDN et diminue avec l'augmentation de la teneur en Na_2SO_4 . Contrairement à l'utilisation de la chaux, l'addition de la PN en présence des sulfates, pratiquement, importe un effet négligeable sur les deux sols stabilisés. D'ailleurs, la présence du Na_2SO_4 dans un traitement combiné de la PN-C fait perturber fortement toutes les limites d'Atterberg des deux sols argileux stabilisés. En effet, l'IP du sol gris diminue avec l'augmentation de la teneur en PN-C, puis il augmente si la teneur en Na_2SO_4 et du TDN augmentent (Figure 1b-d). En revanche, dans le cas du sol rouge, l'IP diminue avec l'augmentation du dosage en PN-C et de la teneur en Na_2SO_4 , puis il augmente avec le TDN (Figure 2b-d).

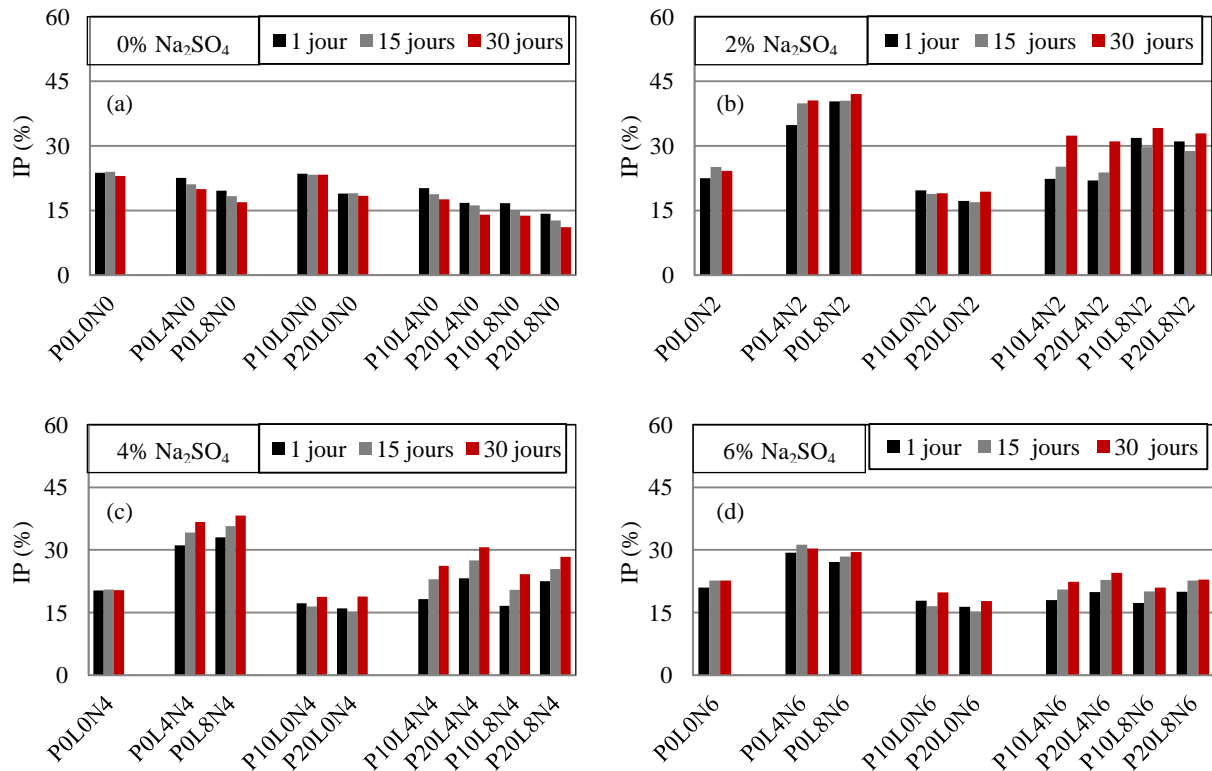


Fig. 2 : Effet de différentes teneurs en sulfate de sodium sur l'indice de plasticité du sol rouge argileux

3.2 Résistance à la compression non confinée

Les résultats des effets apportés par le Na_2SO_4 , la PN, la chaux et leurs combinaisons sur la RCS des sols argileux stabilisés sont présentés sur les Figures 3-5. En absence du Na_2SO_4 , l'addition de la chaux fait augmenter la RCS des échantillons de sols stabilisés. Ceci est en parfaite concordance avec les résultats obtenus par (Ouhadi et al., 2014) [4]. Cette augmentation de la RCS est attribuée à la réaction de la chaux avec les particules d'argile ce qui se traduit par la formation d'agents cimentaires liant ainsi ces dernières entre elles (Harichane et al., 2012) [2].

En général, la RCS augmente avec la durée de cure où le sol rouge présente une augmentation considérable par rapport au sol gris. Pour un traitement seul à la chaux ou à la PN, la présence du Na_2SO_4 avec des fortes teneurs (4 et 6%) fait perturber la RCS des échantillons de sols stabilisés. Pour des faibles teneurs en Na_2SO_4 (2%), les deux sols argileux stabilisés à la chaux seule ont présenté une augmentation considérable de la RCS qui augmente avec la durée de cure (Figures 3b et 4b). Cela est attribué à l'effet immédiat de l'hydroxyde de sodium (dû à la présence du Na_2SO_4) qui fait accélérer les réactions pouzzolaniques à court terme (Shi and Day., 2000a) [5]. Cependant, la RCS des sols stabilisés diminue significativement avec l'augmentation de la teneur en Na_2SO_4 . A long terme, les éprouvettes du sol rouge traité à différentes teneurs en chaux avec 6% de Na_2SO_4 sont entièrement altérées. En revanche, en absence du Na_2SO_4 , l'addition de la PN n'a pas d'influence notable sur la RCS des deux sols argileux étudiés. Ces résultats sont en parfaite concordance avec ceux obtenus par (Harichane et al., 2012) [2]. En effet, l'influence de la PN reste presque négligeable même en présence du Na_2SO_4 .

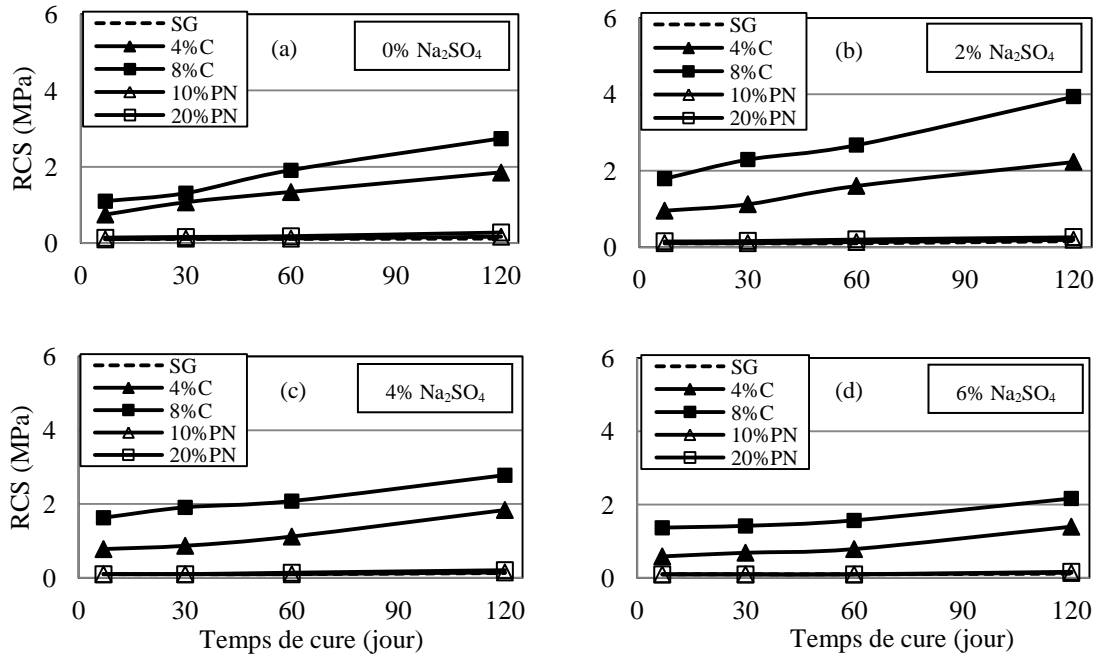


Fig. 3 : Effet de différents teneurs en sulfate de sodium sur la résistance à la compression non confinée du sol gris traité à la chaux et à la pouzzolane naturelle

Cependant, le cas des éprouvettes du sol rouge traité à différentes teneurs en PN durant 30 à 120 jours de cure avec 4 et 6% de Na_2SO_4 sont entièrement altérées. La diminution remarquable de la RCS des sols stabilisés et également l'altération des éprouvettes du sol rouge stabilisé à la chaux est attribuée à la présence du Na_2SO_4 dans le sol conduisant à la formation d'ettringite qui se traduit par la diminution du pH due à l'épuisement de la chaux ajouté au sol (Mitchell, 1986) [6]. De plus, Hunter (1988) [7] a indiqué que l'hydroxyle OH^- provenant de l'hydratation de la chaux se combine avec la montmorillonite, $\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2^-$, pour former $2\text{Al}(\text{OH})_4$. Ce dernier réagit ensuite avec les sulfates pour former l'ettringite. D'ailleurs, Mehta (1983) [8] a indiqué que l'adsorption du sulfate sur des surfaces de CSH provoque la réduction de la résistance due à la diminution de la capacité de cimentation.

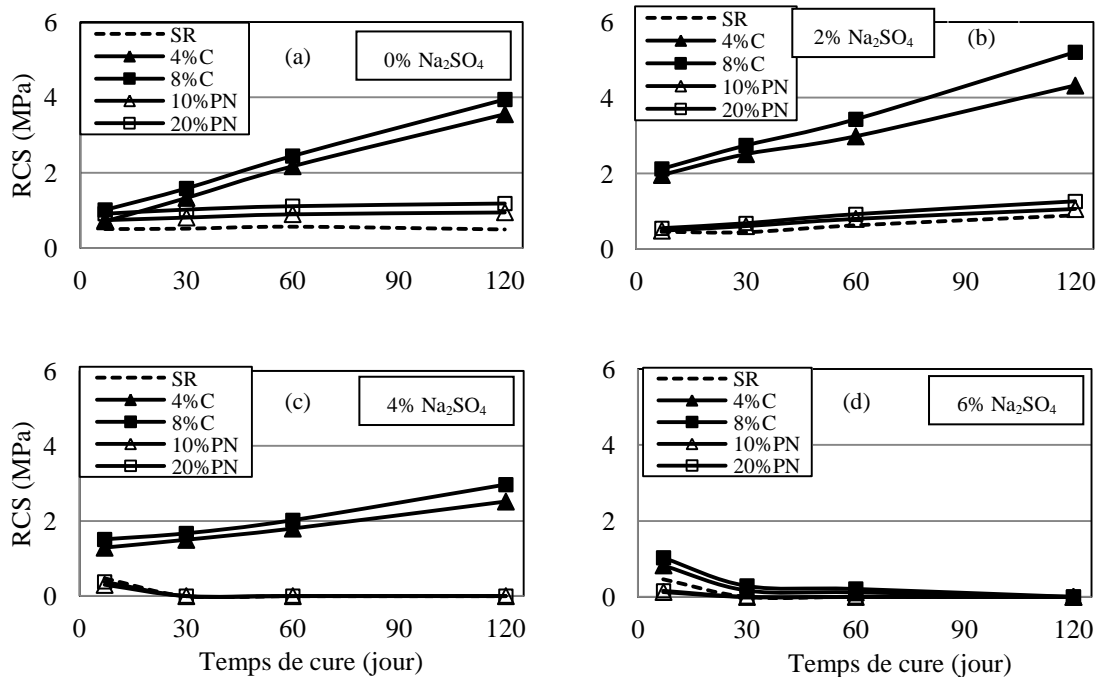


Fig. 4 : Effet de différents teneurs en sulfate de sodium sur la résistance à la compression non confinée du sol rouge traité à la chaux et à la pouzzolane naturelle

En absence du Na_2SO_4 , La combinaison de la PN et de la chaux pour des teneurs élevées produisent des RCS élevées (Figure 5a). Pour les deux sols argileux traités, la RCS augmente avec l'augmentation de la période de cure et la teneur en ajouts additionnés. Le traitement des sols par la combinaison PN-C produit des RCS plus élevées que le traitement par la PN ou la chaux seule. Le même comportement a été observé par (McCarthy et al., 2014) [9]. La meilleure performance de la combinaison PN-C dans les sols stabilisés peut être attribuée aux propriétés pouzzolaniques du mélange et à l'utilisation de la silice et de l'alumine de PN par le calcium de la chaux pour former des composés cimentaires en liant les particules du sol ensemble (Harichane et al., 2011b) [10].

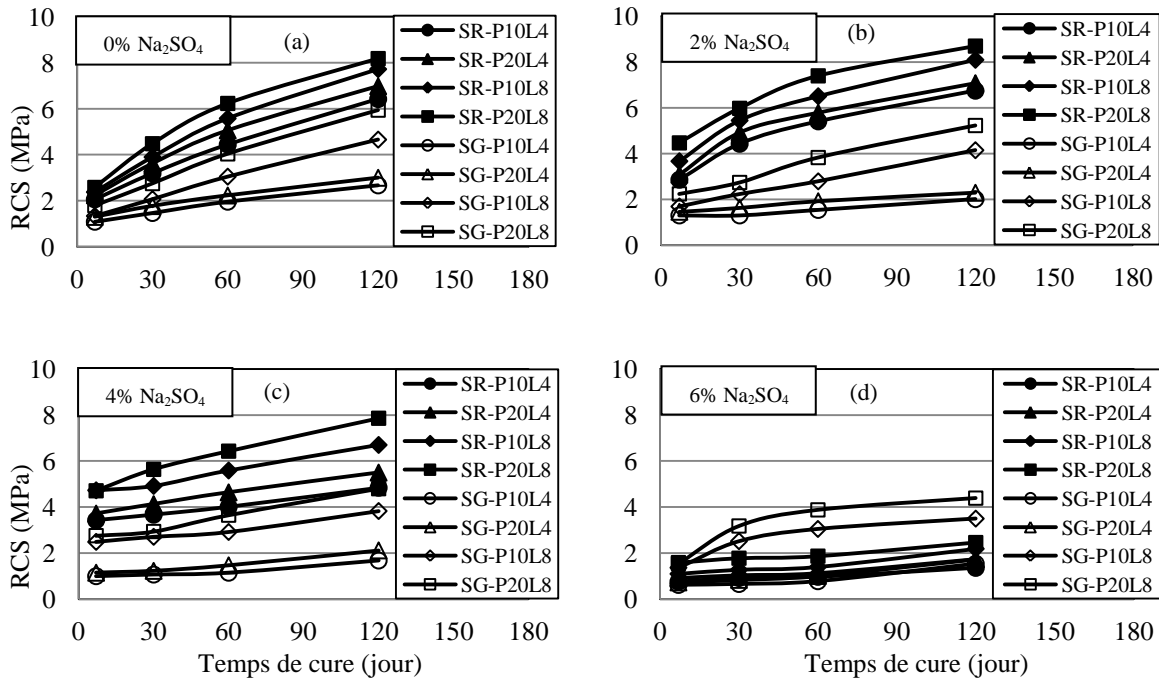


Fig. 5 : Effet de différentes teneurs en sulfate de sodium sur la résistance à la compression non confinée des deux sols argileux stabilisés par la combinaison de la chaux et de la pouzzolane naturelle

En générale, la présence du Na_2SO_4 , pour un traitement combiné par la PN et de la chaux fait perturber la RCS des échantillons de sols argileux stabilisés (Figure 5b-d). Dans le cas du sol gris, on assiste à une diminution progressive de la RCS lorsque la teneur en Na_2SO_4 augmente. La présence du Na_2SO_4 dans les sols stabilisés fait transformer la chaux additionnée en forme de gypse insoluble et en hydroxyde de sodium tout en réduisant ainsi la quantité de chaux disponible pour les réactions avec le sol. Cependant, la présence d'hydroxyde de sodium augmente le pH en provoquant la dissolution d'une grande quantité de l'alumine et de la silice qui rentrent en réaction avec la chaux restante pour former des produits cimentaires. Cela explique l'augmentation significative de la R_{ci} des ces derniers à court terme (Sridharan et al., 1995) [11]. A long terme, pour des teneurs supérieures à 2% de Na_2SO_4 , la R_{ci} diminue, ou voire s'altère, avec le temps de cure. Par contre, ceux qui ont été stabilisés avec la combinaison chaux-PN ont pu résister à la dégradation causée par la formation d'ettringite.

4. CONCLUSIONS

L'utilisation de chaux en absence du Na_2SO_4 importe une réduction significative de l'IP des deux sols argileux stabilisés. Par contre, la PN avec ou sans Na_2SO_4 réduit légèrement leur IP.

La combinaison de la chaux et de la PN en absence du Na_2SO_4 réduit de façon significative l'IP des deux sols argileux mieux que l'addition de la chaux toute seule.

La stabilisation à la chaux seule en absence du Na_2SO_4 fait augmenter considérablement la RCS des sols argileux traités. Cette augmentation est fonction de la quantité de chaux ajoutée et le temps de cure. Cependant, en absence du Na_2SO_4 , l'utilisation de la PN seule présente une influence négligeable sur la RCS des deux sols argileux traités. Mais, lorsque la chaux et la PN sont combinées avec l'absence du Na_2SO_4 , la RCS des deux sols argileux devient très élevée, et elle augmente avec l'augmentation de la teneur en additifs ajoutés et du temps cure.

La forte RCS initiale développée par les deux sols argileux à court terme peut être attribuée à l'accélération de la réaction pouzzolanique causée par l'hydroxyde de sodium provenant de la présence du Na_2SO_4 .

La dégradation totale des éprouvettes des sols argileux stabilisés pendant la cure et la diminution progressive

de leurs RCS peut s'expliquer par la formation d'ettringite favorisée par la présence de Na_2SO_4 dans le système PN-C-Sol. Cette modification est particulièrement importante lorsque la concentration en Na_2SO_4 augmente.

La PN est un bon additif en combinaison avec de la chaux pour résister à la dégradation lorsque le Na_2SO_4 se présente avec des fortes teneurs.

La présence du Na_2SO_4 modifie l'IP des deux sols argileux où le degré de cette modification dépend en grande partie de la composition minéralogique des sols, du type et de la quantité de l'ajout utilisé, la teneur en Na_2SO_4 et du TDN.

Il s'avère que le Na_2SO_4 avec des faibles teneurs ($\text{Na}_2\text{SO}_4 < 2\%$) peut être utilisé à court terme comme un accélérateur de la dissolution de la PN et des réactions pouzzolaniques sans pouvoir altérer les propriétés mécaniques à long terme.

La nature minéralogique du sol joue un rôle très important dans la réussite ou l'échec d'un traitement en dominant les effets eux-mêmes apportés par le Na_2SO_4 sur les sols stabilisés.

5. REFERENCES

- [1] Hossain, K.M.A., Lachemi, M. Easa, S., 2006. Characteristics of volcanic ash and natural lime based stabilized clayey soils. *Civil Engineering* 33 (11), 1455-1458.
- [2] Harichane, K., Ghrici, M., Kenai, S., 2012. Effect of the combination of lime and natural pozzolana on the compaction and strength of soft clayey soils: a preliminary study, *Environmental and Earth Sciences* 66 (8), 2197-2205.
- [3] Nalbantoglu, Z., 2006. Lime stabilization of expansive clay. *Expansive soils-recent advances in characterization and treatment*. London, Taylor & Francis group, pp. 341-348.
- [4] Ouhadi, V.R., Yong, R.N., Amiri, M., Ouhadi, M.H., 2014. Pozzolanic consolidation of stabilized soft clays. *Applied Clay Science* 95, 111-118.
- [5] Shi, C., Day, R.L., 2000a. Pozzolanic reaction in the presence of chemical activators Part I. Reaction kinetics. *Cement and Concrete Research* 30 (1), 51-58.
- [6] Mitchell, J.K., 1986. Practical problems from surprising soil behaviour. 20th Karl Terzaghi lecture. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE 112 (3), 274-279.
- [7] Hunter, D. (1988). Lime-induced heave in sulphate-bearing clay soils. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE 114 (2), 150-167.
- [8] Mehta, P.K., 1983. Mechanism of sulphate attack on Portland cement concrete-another look. *Cement and Concrete Research* 13 (3), 401-406.
- [9] McCarthy, M.J., Csetenyi, L.J., Sachdeva, A., Dhir, R.K., 2014. Engineering and durability properties of fly ash treated lime-stabilised sulphate-bearing soils. *Engineering Geology* 174, 139-148.
- [10] Harichane, K., Ghrici, M., Kenai, S., Grine, K., 2011b. Use of natural pozzolana and lime for stabilization of cohesive soil, *Geotechnical and Geological Engineering* 29 (5), 759-769.
- [11] Sridhran, A., Sivapullaiah, P.V., Ramesh, H.N., 1995. Consolidation behaviour of lime treated sulphate soils. *Proc. Int. Symp. Compression Consolidation Clayey Soils*, Hiroshima, Japan 1, 183-188.