# الملخص

أجريت دراسة تجريبية على مستوى المخبر، بهدف تقييم الآثار الناجمة عن وجود كل من كبريتات الكالسيوم ($CaSO_4{\cdot}2H_2O$) والصوديوم ($Na_2SO_4$) على حدود أتربارغ وكذا مقاومتي الضغط البسيط والقص لكل من التربتين الطينيتين اللتين تمت معالجتهما باستعمال الجير المعالج (L; 0—20%)، البوزولان الطبيعي (PN; 0—20%) أو بدمجهما معا (L—PN). كما أجري اختبار الضغط البسيط والقص على عينات التربتين بعد 7، 30، 60 و 120 يوما من العلاج.

ففي غياب الكبريتات أظهرت النتائج أنه يمكن معالجة كلتا التربتين الطينيتين بنجاح، وذلك بإضافة الجير المعالج وحده أو بدمجه مع البوزولان الطبيعي. ومن جهة أخرى قد لوحظ انخفاض جد محسوس في مؤشر اللدونة وزيادات كبيرة في مقاومتي الضغط البسيط والقص. في حين أن إضافة البوزولان الطبيعي وحده لكلتا التربتين الطينيتين قد أظهر تأثير طفيف على كافة الخصائص التي شملتها هذه الدراسة.

أما في حالة وجود الكبريتات بنوعيها وبكميات مختلفة خلال فترات علاج قصيرة المدى، فقد لوحظت زيادات جد معتبرة في مقاومتي الضغط البسيط والقص لكلتا التربتين الطينيتين اللتين تمت معالجتهما باستعمال الجير المعالج وحده أو بدمجه مع البوزولان الطبيعي. من جهة أخرى، خلال فترات علاج طويلة المدى، ومهما يكن نوع العنصر المعدني المستخدم كمعالج ومهما تكن كمية $CaSO_4{\cdot}2H_2O$ المضافة لعينات التربتين الطينيتين، فإن قيم كافة الخصائص التي شملتها هذه الدراسة قد تحسنت شيئا فشيئا إذا ما قارناها بنفس العينات التي لا تحتوي على المركب الكيميائي $CaSO_4{\cdot}2H_2O$. من جهة أخرى، في حالة وجود مستويات عالية من المركب الكيميائي $Na_2SO_4$، فقد لوحظ أن جميع عينات التربة الحمراء التي تمت معالجتها باستعمال الجير المعالج أو البوزولان الطبيعي على حدى فقدت تماسكها كلية باستثناء تلك التي تمت معالجتها بدمج الجير و البوزولان الطبيعي معا. ويرجع هذا أساسا إلى تشكل معدن الإترنجيت الذي تم ملاحظته على مستوى المنحنيات البيانية الإشعاعية (XRD) لكلتا التربتين. وعلاوة على ذلك، أظهرت الصور (SEM) تشكل المركبات الاسمنتية (C—A—H و C—S—H) المسؤولة عن الزيادة في قيمة المقاومة الميكانيكية لكلتا التربتين الطينيتين. وبشكل عام فإنه من خلال النتائج المتحصل عليها على مستوى المخبر فإنه يظهر جليا أن نجاح التثبيت الكيميائي للأتربة الطينية يتعلق بعدة عوامل نذكر منها كمية ونوعية الكبريتات المستعملة، نوع وكمية العنصر المعالج المضاف، مدة التخمر وأخيرا التركيبة المعدنية للتربة.



**الكلمات المفتاحية**: التربة الطينية، الجير المعالج، البوزولان الطبيعي، الكبريتات، المعالجة، المقاومة، اللدونة.

# RESUME

Une investigation expérimentale a été effectuée afin d'évaluer les effets apportés par la présence des sulfates de calcium et de sodium ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$, $Na_2SO_4$) sur les limites d'Atterberg, la résistance à la compression non confinée (RCS) et la résistance au cisaillement des deux sols argileux stabilisés avec l'addition de la chaux (L, 0–8%), de la pouzzolane naturelle (PN, 0–20%) et de leur combinaison (L–PN). Les essais de la compression simple et du cisaillement direct ont été effectués sur des éprouvettes des deux sols argileux stabilisés après 7, 30, 60 et 120 jours de cure.

En absence des sulfates, les résultats obtenus ont montré que les deux sols argileux peuvent être stabilisés avec succès par l'addition de la chaux toute seule ou en combinaison avec la PN. En effet, des réductions significatives dans l'indice de plasticité et des augmentations considérables dans la RCS et au cisaillement ont été observées. Cependant, l'addition de la PN toute seule aux deux sols traités n'apporte qu'un effet marginal sur toutes les propriétés étudiées.

En présence des sulfates, à très court terme, quelque soit la teneur et le type du sulfate utilisé, des augmentations significatives ont été observées pour les valeurs de la RCS et de la résistance au cisaillement des deux sols argileux stabilisés avec l'addition de la chaux seule ou en combinaison avec la PN. A long terme, quelques soit le type du traitement et la teneur en $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ utilisée, toutes les propriétés des deux sols argileux étudiés ont été améliorées de plus en plus. En revanche, pour des fortes teneures en $Na_2SO_4$, toutes les éprouvettes du sol rouge argileux stabilisé à la chaux ou avec la PN toute seule ont été entièrement altérées sauf celles qui ont été stabilisées avec leur combinaison. Cette altération est attribuée à la formation de l'ettringite minérale expansive qui a été observée dans les courbes diffractométriques issues des essais de la diffraction des rayons X (DRX). D'autre part, les images issues des essais de la microscopie électronique à balayage (MEB) ont montré la formation des composés cimentaires (C–S–H et C–A–H) responsables de l'augmentation des résistances mécaniques. Le succès ou l'échec d'un traitement dépend de plusieurs facteurs à savoir : le type et la teneur en additif utilisé, la composition minéralogique du sol traité, la période de cure et la teneur et le type des cations associés au sulfate utilisé.

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

# ABSTRACT

An experimental investigation was conducted in laboratory in order to assess the effects produced by the presence of sodium and calcium sulphates ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$, $Na_2SO_4$) on Atterberg limits, unconfined compressive strength (UCS) and shear strength of two clayey soils stabilized with the addition of lime (L, 0–8%), natural pozzolana (NP, 0–20%) and their combination (L–NP). Shear and unconfined compression strength tests were carried out on soil samples after 7, 30, 60 and 120 days of curing period.

In the absence of sulphates, the obtained results showed that both clayey soils can be successfully stabilized with the addition of lime alone or in combination with NP. In fact, significant reductions in the plasticity index and substantial increases in UCS and shear strength values were recorded. However, the addition of NP alone to both clayey soils caused a marginal effect on all studied properties.

In the presence of sulphates, at early stage, for any content and any type of sulfate used, there are significant increases in UCS and shear strength values of both clayey soils stabilized with the addition of lime alone or in combination with NP. At later stage, for any type of treatment and for any content of $CaSO_4 \cdot 2H_2O$, the values of all the properties of both clayey soils studied were improved more and more to compare with samples without $CaSO_4 \cdot 2H_2O$. However, for high levels of $Na_2SO_4$, all the red soil samples stabilized with lime or with NP alone were completely altered except those that have been stabilized with their combination. This alteration is attributed to the formation of ettringite which was observed in XRD diffractometric curves. Furthermore, SEM images showed the formation of cementitious compounds (C–S–H and C–H–A) responsible on the increase of mechanical strength values. The success or failure of treatment depends on several factors such as both the type and content of additive, mineralogical composition of stabilised soils, curing period and both the content and type of cation associated to the sulfate used.



**Keywords:** Clayey soil, Lime, Natural pozzolana, Sulphate, Stabilization, Strength, Plasticity.