

Rétrospective expérimentale sur les sols traités : enseignements issus de 52 essais triaxiaux

Experimental retrospective on treated soils: insights from 52 triaxial tests

Emma RICART¹, Lucile PIGEOT², Hélène CALISSANO¹, Laurent BATILLIOT¹, Nathalie DUFOUR^{1*}

1 GéoCoD - Cerema, Aix-en-Provence, France

2 EGIS SE - Géotechnique, Seyssins, France

**nathalie.dufour@cerema.fr*

RESUME : Dans un contexte de réduction des impacts environnementaux liés aux travaux de terrassement, le traitement des sols en place par la chaux, les liants hydrauliques ou des formulations mixtes constitue une solution favorisant le réemploi des matériaux *in situ*. Cet article présente une synthèse de 52 essais triaxiaux réalisés depuis le début des années 2000 sur 13 sols traités selon différentes formulations, dosages et temps de cure, définis en fonction des contextes étudiés. L'objectif n'est pas de démontrer l'efficacité du traitement, largement documentée dans la littérature, mais d'identifier les facteurs influençant significativement l'estimation des paramètres mécaniques (module initial, cohésion effective et angle de frottement) en laboratoire. L'analyse met en évidence que l'estimation du module d'Young initial peut varier d'un facteur quatre selon l'instrumentation utilisée, que la détermination de l'enveloppe de rupture dépend fortement du choix des niveaux de pression effective et que la qualité du contact initial ainsi que la réalisation d'un cycle de déchargement – chargement influencent l'identification du domaine élastique.

ABSTRACT: In a context of reducing the environmental impacts associated with earthworks, soil treatment with lime, hydraulic binders or mixed formulations promotes the reuse of *in-situ* materials. This paper presents a synthesis of 52 triaxial tests carried out since the early 2000s on 13 treated soils with different formulations, dosages and curing times defined according to project contexts. The objective is not to demonstrate the effectiveness of soil treatment, which is already widely documented, but to identify the experimental factors significantly influencing the estimation of mechanical parameters (initial Young's modulus, effective cohesion and friction angle). The analysis shows that the estimation of the initial modulus may vary by up to a factor of four depending on the instrumentation used, that the determination of the failure envelope is strongly conditioned by the selected effective stress levels, and that the quality of initial contact as well as unloading–reloading cycles significantly influence the identification of the elastic domain.

Mots-clés: Traitement des sols ; essai triaxial ; instrumentation locale ; cohésion effective ; module initial

1 INTRODUCTION

Le traitement des sols en place a profondément transformé le secteur des travaux publics aussi bien sur les plans temporel, qu'économique et écologique. Plutôt que d'excaver et de remplacer le sol en place ne présentant pas de performances mécaniques suffisantes par un matériau issu de carrière, le traitement vise à améliorer les performances du sol *in situ* afin de le réutiliser directement pour la construction d'un ouvrage.

L'amélioration des sols *in situ* est une technique apparue dans les années 1920 aux États-Unis pour la stabilisation des routes en terre (Bürger, 1972). Elle s'est développée en France à partir des années 1960

(Van den Kerkhof et al., 2001). Sa diffusion rapide a été favorisée par la publication du premier guide technique national (LCPC & SETRA, 1972), qui a permis de standardiser les pratiques et d'accroître la fiabilité des chantiers.

Depuis le début des années 2000, la demande de caractérisation du comportement mécanique des sols traités n'a cessé de croître. Aujourd'hui, dans le contexte de l'objectif « Zéro Apport Extérieur » défini par le MEEDDAT (2009), les sols traités s'imposent comme une solution centrale pour des terrassements plus durables.

Les effets mécaniques du traitement, notamment l'augmentation de la rigidité, du module initial et de la cohésion effective sont désormais largement

documentés dans la littérature. En revanche, l'influence des conditions expérimentales sur l'estimation de ces paramètres demeure moins analysée de manière transversale. Les modalités de préparation des éprouvettes, le choix des niveaux de pression effective, la nature de l'instrumentation ou encore la réalisation de cycles de chargement peuvent pourtant conditionner de façon significative les mesures effectuées lors des essais triaxiaux. En raison de leur rigidité accrue et de l'évolution rapide de leurs propriétés avec le temps de cure, les sols traités apparaissent particulièrement sensibles à ces choix expérimentaux. La fiabilité des paramètres mécaniques mesurés, ainsi que leur comparabilité entre études, peuvent ainsi être fortement dépendantes du protocole expérimental adopté. À Aix-en-Provence, au sein de l'équipe de recherche GéoCoD du Cerema, les sols traités, qui représentaient à peine 5 à 10 % des projets au début des années 2000, sont désormais présents dans la quasi-totalité des projets réalisés. Cette évolution a conduit à la réalisation d'une synthèse de 52 essais triaxiaux portant sur 13 sols et différentes formulations de traitement.

Cet article vise ainsi, à partir de ce retour d'expérience multi-matériaux, à analyser l'influence des choix expérimentaux sur la caractérisation des paramètres mécaniques des sols traités et à identifier les conditions permettant d'en améliorer la fiabilité.

2 MATÉRIAUX ET MÉTHODES

2.1 Matériaux

2.1.1 Les types de sol

Tableau 1. Les sols étudiés

Désignation	Type de sol	Classe	Indice de plasticité
		GTR	
AL1	Altérites	A1/A2 voir B6	-
AL2	Altérites argileuses	-	-
AR3	Arenes gneissiques	B3/B4	-
AR4	Argile 1	-	-
AR5	Argile 2	A3	25
AR6	Argile 3	A3	22
AR7	Argile limoneuse	A2	18
L1	Limon 1	-	-
L2	Limon 2	A1	7
LC1	50% Limon + 50% Craie	-	-
MA1	Marne 1	B3/B4	-
MA2	Marne 2	B3/B4	-
MA3	Marne argileuse	F1	31

Le tableau 1 ci-dessus décrit les 13 types de sols présents dans cette synthèse expérimentale. Ces matériaux présentent à l'état naturel de faibles performances mécaniques. Il est donc essentiel d'étudier l'effet des traitements visant à améliorer leurs paramètres mécaniques pour favoriser leur ré-emploi sur site.

2.1.2 Les traitements

Les traitements appliqués aux différents sols étudiés se distinguent à la fois par leur nature et par leur dosage. Au total, 13 formulations distinctes sont présentées dans le Tableau 2 ci-dessous.

Toutefois, il est utile de préciser que tous les sols n'ont pas été soumis à l'ensemble de ces traitements. En effet, chaque type de sol a fait l'objet d'un ou de plusieurs traitements spécifiques, définis en fonction de sa composition et de ses caractéristiques géotechniques. Cette approche vise à illustrer la diversité des traitements possibles et à évaluer leurs effets dans des contextes représentatifs, plutôt qu'à comparer directement toutes les formulations entre elles.

Tableau 2. Les traitements étudiés

Désignation	Traitement	Quantité de chaux	Quantité de liant
		[%]	[%]
NT	Non traité	-	-
C1	Chaux	1	-
C1,5	Chaux	1,5	-
C2	Chaux	2	-
C3	Chaux	3	-
M1-5	Mixte	1	5
M1-1,5	Mixte	1	1,5
L103-1	Ligex 103	-	1
L103-2	Ligex 103	-	2
LM4-1	Ligex M4	-	1
LM4-2	Ligex M4	-	2
LRS3	LHR	-	3
R1-2	RocTR	-	2
R2-2	Rocsol	-	2

Des essais de référence ont été réalisés sur les sols non traités afin de comparer leurs propriétés mécaniques à celles des sols stabilisés. La synthèse regroupe différents types de traitements avec des dosages plus ou moins élevés. Il y a 18 séries d'éprouvettes qui ont reçu des traitements qui sont à base de chaux, 12 ont reçu un traitement à base de liant hydraulique et 3 des traitements à base d'un mélange chaux+liant. Ces chiffres permettent de constater que les traitements à la chaux sont prédominants, mais aussi que l'application des formulations mixtes (chaux+liant) est beaucoup moins étudiée et utilisée.

2.2 Méthodes

2.2.1 Fabrication des éprouvettes

Les éprouvettes ont été confectionnées par compactage quasi-statique selon la méthode de Serratrice (2007). Le sol est préparé à la teneur en eau visée la veille du compactage et, pour les matériaux traités, mélangé le jour même avec la chaux, le liant hydraulique ou une combinaison des deux afin d'assurer une répartition homogène. Le matériau est ensuite introduit dans un moule cylindrique en acier (diamètre 50 mm), muni d'une membrane en latex graissée, et compacté jusqu'à une hauteur finale de 100 mm.

La masse introduite est déterminée à partir de la densité sèche cible, comprise entre 70 % et 98 % de la densité sèche maximale selon les séries étudiées. Cette variabilité de compactage reflète les contextes expérimentaux des essais, mais constitue une limite de la synthèse dans la mesure où la densité initiale influence directement la rigidité, la résistance et le mode de rupture ; les tendances présentées doivent donc être interprétées comme des évolutions globales. Après démoulage, les éprouvettes traitées sont protégées contre les pertes d'eau et la carbonatation puis conservées à 20 ± 2 °C jusqu'à l'essai.

2.2.2 Traitements appliqués

Dans les Tableaux 1 et 2, les 13 types de sol ainsi que les 13 traitements sont appelés par des désignations simplifiées qui vont être reprises pour décrire le traitement appliqué au sol.

Tableau 3. Les traitements appliqués

Sol	Traitements	Sol	Traitements
AL1	L103-1 ; L103-2 ; LM4-1 ; LM4-2	L1	C2 ; NT
AL2	C1 ; M1-1,5	L2	M1-5 ; NT
AR3	C3 ; LRS3	LC1	C2
AR4	C2 ; NT	MA1	C1 ; NT
AR5	R1-2 ; NT	MA2	R1-2 ; NT
AR6	C1 ; R1-2 ; NT	MA3	C2 ; R2-2 ; NT
AR7	C2		

Environ 70 % des sols ont été traités à la chaux, 45 % au liant hydraulique et 15 % par une combinaison chaux-liant. Certains matériaux ont reçu plusieurs types de traitement. Les argiles ont majoritairement fait l'objet de traitements à la chaux, destinés à améliorer leur maniabilité et à réduire leur sensibilité à l'eau. À l'inverse, les sols présentant une structure plus granulaire ou une composante carbonatée marquée (tels que les limons ou les marnes) ont été

associés à des formulations combinées. Dans ces cas, l'action du liant hydraulique complète celle de la chaux en favorisant la formation de phases cimentaires de type C-S-H et C-A-H, responsables du renforcement progressif de la matrice du sol (Bell, 1996). L'ensemble des sols a été soumis à des essais triaxiaux afin de déterminer leurs paramètres mécaniques.

2.2.3 L'essai triaxial

Le dispositif expérimental de l'essai triaxial, décrit dans les normes NF P 94-420 (2000) et NF EN ISO 17892-7 (2018), permet de reproduire les conditions de contrainte *in situ* d'un sol et de déterminer ses paramètres mécaniques caractéristiques, tels que la résistance au cisaillement (cohésion et angle de frottement) et la déformabilité (module d'Young).

L'essai est réalisé sur une éprouvette cylindrique présentant un élargissement de 2, dans cette synthèse les éprouvettes possèdent un diamètre initial $d_0 = 50$ mm et une hauteur initiale $h_0 = 100$ mm. La synthèse présentée repose exclusivement sur les résultats obtenus à partir d'essais triaxiaux consolidés drainés (CID) et consolidés non drainés avec mesure de la pression interstitielle (CIU). Les essais CID permettent de connaître le comportement à long terme tandis que les essais CIU+u permettent de connaître le comportement à court et long terme. L'ensemble des résultats est exprimé en contraintes effectives afin de comparer les tendances mécaniques observées.

3 CONDITIONS D'ESSAI

3.1 Les paramètres d'états

Les paramètres d'état initiaux, avant essai, sont la teneur en eau w [%], le poids volumique humide γ [kN/m³], le poids volumique sec γ_d [kN/m³], l'indice des vides e [] ainsi que le degré de saturation S_r [%]. Ces paramètres ont été contrôlés lors de la fabrication des éprouvettes afin de garantir la cohérence des conditions initiales

Compte tenu du volume important de données et de la diversité des sols et traitements étudiés, ces paramètres ne sont pas détaillés individuellement, mais pris en compte dans l'analyse globale.

3.2 Le temps de cure

L'histogramme ci-dessous permet de visualiser la variabilité des temps de cure présents dans la synthèse.

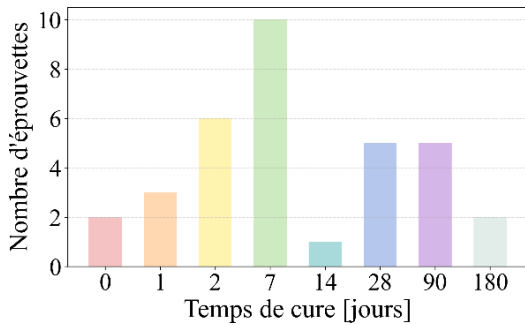


Figure 1. Répartition des temps de cure dans la synthèse expérimentale

La répartition observée des temps de cure au sein de cette synthèse reflète les pratiques courantes du traitement des sols en laboratoire et sur chantier. En particulier, la durée de 28 jours qui constitue la référence normative dans les essais de stabilisation, qu'il s'agisse de traitements uniquement à la chaux, uniquement au liant hydraulique, ou d'un mélange chaux-liant (NF P 94-100, 2015).

Ce délai de 28 jours est habituellement considéré comme suffisant pour permettre la majorité des réactions pouzzolaniques et cimentaires, garantissant la stabilisation du squelette granulaire avant toute mise en charge ou phase constructive. Les temps de cure de 2, 7, 28 et 90 jours, majoritairement représentés dans la synthèse, correspondent aux paliers classiques d'évolution des propriétés mécaniques des sols traités.

3.3 Les pressions effectives

La pression effective appliquée lors des essais constitue un paramètre déterminant pour caractériser le comportement mécanique des sols. La synthèse expérimentale montre que 54 % des sols étudiés ont été testés sous des niveaux de pression de 50, 150 et 400 kPa. Ces valeurs, qui correspondent à des profondeurs typiques comprises entre environ 3 et 20 m selon l'état de saturation et le poids volumique des sols, sont couramment utilisées pour analyser le comportement mécanique des matériaux géotechniques. Le sol L2 a quant à lui été soumis à des pressions plus élevées (150, 300 et 600 kPa) afin d'explorer un domaine de contraintes plus large et de mieux caractériser sa réponse mécanique à forte sollicitation.

4 RESULTATS ET DISCUSSION

Le codage des séries d'éprouvettes est décomposé de la manière suivante : la nature du sol (exemples : AR4, L1, MA2), suivie de la nature du traitement appliqué (exemples : C3, L103-1, R2-2), et se termine

par le temps de cure (exemples : 2, 7, 28) : AR4_C3_2j.

Afin de garantir la lisibilité, les figures présentées dans cet article illustrent les tendances typiques observées parmi les 52 essais triaxiaux réalisés sur 13 sols et 13 traitements différents, sans toutefois présenter l'intégralité des résultats de la synthèse expérimentale.

4.1 La rigidité et la déformabilité des sols traités

La rigidité traduit la capacité du matériau à résister à des contraintes croissantes jusqu'à sa rupture, et est caractérisée à partir de la contrainte déviatorique maximale q_{max} [kPa] mesurée lors des essais triaxiaux. La déformabilité permet de caractériser la réaction du matériau lorsqu'il est soumis à une sollicitation mécanique. Dans cet article, celle-ci est définie par le module d'Young initial E_0 [MPa] déterminé à partir de la réponse du matériau en début de chargement, ainsi que par le coefficient de Poisson ν [] du matériau obtenu à partir de la déformation volumique.

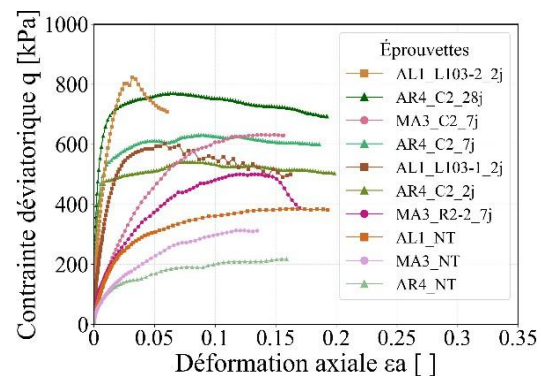


Figure 2. Évolution de la contrainte déviatorique en fonction de la déformation axiale

La figure 2 présente l'évolution de la contrainte déviatorique q en fonction de la déformation axiale ϵ_a pour des éprouvettes traitées et non traitées testées sous des pressions effectives de 300 à 400 kPa selon les matériaux. Les sols non traités développent systématiquement les plus faibles niveaux de contrainte, tandis que les matériaux traités atteignent des pics nettement supérieurs, compris entre 500 et 800 kPa, quel que soit le type de traitement ou le dosage appliqué. L'influence du temps de cure apparaît également clairement, avec une augmentation progressive de la contrainte déviatorique maximale entre 2 et 28 jours pour une même formulation.

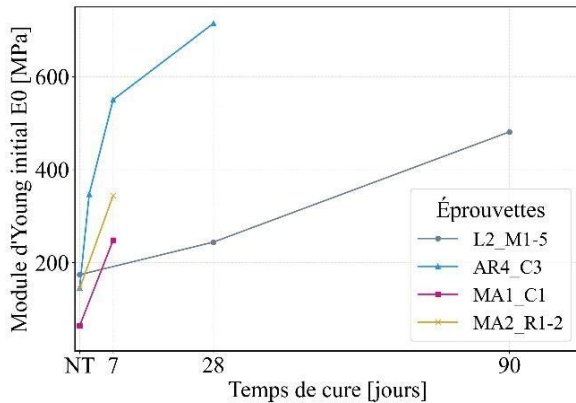


Figure 3. Évolution du module d'Young initial en fonction du temps de cure

La figure ci-dessus présente l'évolution du module d'Young initial E_0 en fonction du temps de cure pour plusieurs matériaux traités et non traités, testés sous des pressions effectives de 300 à 400 kPa selon les cas. Les sols non traités présentent systématiquement les plus faibles valeurs, comprises entre 50 et 150 MPa selon le matériau.

Après traitement, le module E_0 augmente nettement dès 7 jours de cure, avec des valeurs pouvant atteindre 250 à 350 MPa à court terme et jusqu'à 500 à 700 MPa à plus long terme selon les formulations. L'ensemble des résultats met ainsi en évidence une augmentation significative de la rigidité initiale des sols traités avec le temps de maturation.

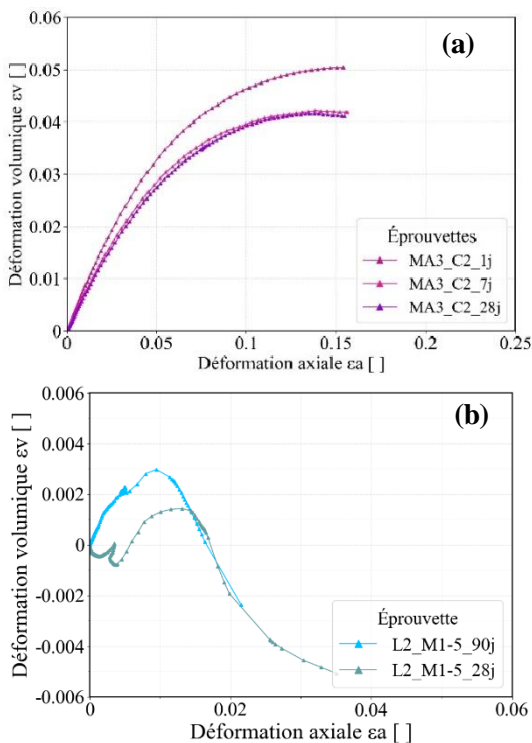


Figure 4. Évolution de la déformation volumique en fonction de la déformation axiale pour (a) : MA3_C2 et (b) : L2_M1-5

Les figures 4a et 4b présentent l'évolution de la déformation volumique ϵ_v en fonction de la déformation axiale ϵ_a pour deux sols traités soumis à différents temps de cure, issus d'essais triaxiaux consolidés drainés réalisés sous une contrainte effective de 400 kPa.

Deux comportements distincts sont observés. Pour la série MA3_C2, l'allure des courbes reste globalement similaire quel que soit le temps de cure, avec des variations de déformation volumique proches et un coefficient de Poisson sensiblement constant ($\nu \approx 0,15$ entre 1 et 28 jours). À l'inverse, la série L2_M1-5 montre une évolution avec la maturation : la réponse volumique devient plus marquée à 90 jours, avec une pente initiale plus raide et une diminution du coefficient de Poisson ($\nu \approx 0,28$ à 28 jours et $\nu \approx 0,18$ à 90 jours).

4.2 La résistance au cisaillement des sols traités

Le comportement mécanique à long terme d'un sol se définit par deux paramètres, l'angle de frottement effectif ϕ' [°] et la cohésion effective c' [kPa].

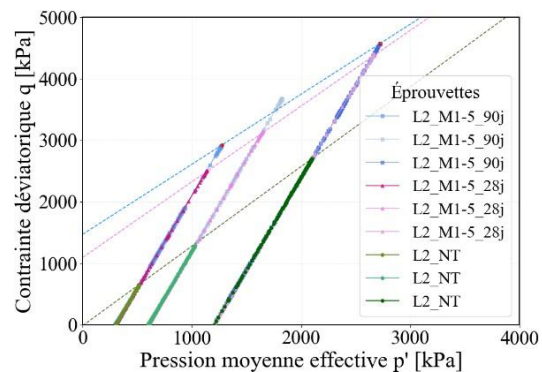


Figure 5. Évolution de la contrainte déviatorique en fonction de la pression effective moyenne

La figure 5 présente l'évolution de la contrainte déviatorique q en fonction de la contrainte moyenne effective p' pour le sol L2 non traité et traité (28 et 90 jours de cure). Les éprouvettes non traitées rompent aux plus faibles niveaux de contrainte, avec une cohésion effective de 3 kPa et un angle de frottement de 31°.

Après traitement, la cohésion effective augmente fortement, atteignant 1096 kPa à 28 jours et 1533 kPa à 90 jours. En revanche, l'angle de frottement effectif reste globalement stable, avec des valeurs de 30° à 28 jours et 28° à 90 jours.

4.3 Discussion et préconisations

4.3.1 Discussion générale

La synthèse expérimentale met en évidence des évolutions cohérentes du comportement mécanique des sols traités malgré la diversité des matériaux, des formulations et des temps de cure étudiés. L'ajout d'un traitement à base de chaux, de liant hydraulique ou de formulations mixtes se traduit de manière cohérente par une augmentation de la rigidité, renforcée par l'allongement du temps de cure. Les valeurs de contrainte déviatorique maximale q_{max} et du module d'Young initial E_0 augmentent dès les premiers jours de cure, avec des hausses marquées entre 2 et 7 jours, puis plus progressives entre 28 et 90 jours selon les matériaux.

Au-delà de ces tendances, la synthèse souligne l'influence déterminante des conditions expérimentales sur l'estimation des paramètres mécaniques. En raison de la rigidité accrue et de l'évolution rapide des propriétés avec le temps de cure, la qualité du contact initial, la précision de la mesure des déplacements et le choix des niveaux de pression effective jouent un rôle essentiel dans l'interprétation des résultats.

L'analyse met également en évidence une évolution du mode de rupture. Les matériaux non traités présentent un comportement ductile, sans pic marqué, tandis que les sols traités développent fréquemment un pic de contrainte suivi d'une décroissance plus ou moins prononcée, traduisant une rupture plus fragile. Cette transition correspond, dans plusieurs cas, au passage d'une rupture plastique de type tonneau à la formation d'un plan de cisaillement (Figure 6), phénomène particulièrement marqué pour les traitements aux liants hydrauliques et les temps de cure longs.

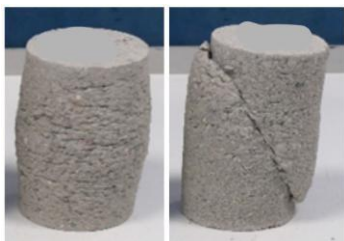


Figure 6. Photographies des modes de rupture observés, à gauche AR6_NT et à droite AR6_C1_7j

Les résultats relatifs à la déformation volumique mettent en évidence deux comportements selon les couples sol – traitement. Certains matériaux présentent une réponse volumique peu évolutive entre 1 et 28 jours de cure, traduisant un coefficient de Poisson relativement stable, tandis que d'autres montrent une diminution progressive de la déformation volumique

avec le temps, indiquant une réduction du coefficient de Poisson entre 28 et 90 jours. La réponse volumique apparaît ainsi fortement dépendante de la nature du sol et du traitement appliqué.

L'analyse des paramètres de cisaillement confirme que l'amélioration de la résistance après traitement est principalement liée à l'augmentation de la cohésion effective c' , alors que l'angle de frottement effectif évolue peu dans la majorité des cas. Cette stabilité relative doit être interprétée comme une tendance générale, susceptible de varier selon la nature du sol, le dosage, le temps de cure et les conditions d'essai.

Le gain de résistance provient donc essentiellement du renforcement cohésif induit par le traitement, la contribution frictionnelle restant du même ordre de grandeur. Cette observation est cohérente avec les mécanismes de formation de phases cimentaires décrits par Bell (1996). Globalement, les performances mécaniques dépendent du type de traitement, du dosage et du temps de cure, malgré la variabilité liée à la minéralogie et à la structure initiale des sols.

4.3.2 Préconisations

Les 52 essais triaxiaux qui composent la synthèse expérimentale étudiée dans cet article ont permis d'identifier des approches efficaces pour déterminer le comportement mécanique d'un sol traité.

- Mesurer les paramètres de déformabilité du matériau

Les essais menés ont permis de déterminer trois enseignements.

Il est nécessaire d'avoir un bon contact pour commencer la phase de cisaillement. En effet, un mauvais contact visible sur la Figure 7 peut amener à une interprétation erronée de E_0 et donc une mauvaise connaissance du matériau.

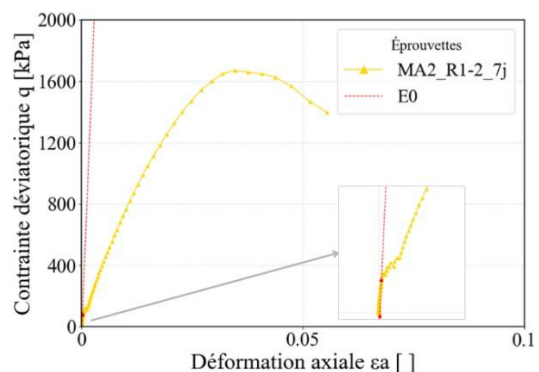


Figure 7. Évolution de la contrainte déviatorique en fonction de la déformation axiale



Figure 8. Photographie d'une éprouvette de sol traité équipée de 2 capteurs LVDT

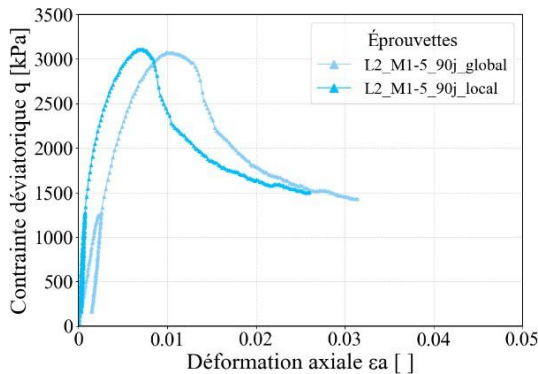


Figure 9. Évolution de la contrainte déviatorique en fonction de la déformation axiale

L'utilisation d'une instrumentation locale permet également d'améliorer la précision de la mesure. La Figure 8 présente un dispositif composé de deux capteurs LVDT installés directement sur l'éprouvette, ce qui permet d'isoler la déformation propre au matériau et d'éviter l'influence des déformations parasites liées à l'appareillage. La comparaison entre les mesures globales et locales (Figure 9) des déformations met en évidence un écart significatif sur l'estimation du module d'Young initial E_0 . La mesure globale conduit à une valeur d'environ 600 MPa, tandis que la mesure locale atteint près de 2400 MPa. Cet écart, d'un facteur quatre, confirme l'importance d'un suivi local du déplacement axial pour obtenir une estimation fiable de E_0 . L'écart observé est du même ordre de grandeur que l'augmentation du module initial entre un sol non traité et un sol traité à court terme. Ce résultat souligne que l'incertitude expérimentale peut masquer les effets du traitement si le module n'est pas correctement mesuré.

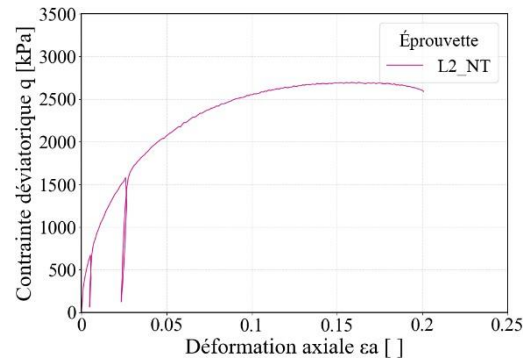


Figure 10. Cycles de déchargement - chargement

La réalisation de cycle de déchargement - chargement (cf. Figure 10) en début d'essai constitue un moyen efficace d'identifier la réponse élastique du matériau et d'affiner la détermination du module d'Young initial. Cette boucle permet de distinguer les déformations irréversibles des déformations élastiques. La mise en place d'une boucle supplémentaire à mi-parcours de l'essai peut également être pertinente afin de suivre l'évolution de la raideur au cours du chargement et de mieux caractériser les changements de comportement lorsque la contrainte augmente.

- Mesurer les paramètres de résistance

Dans la majorité des études, les essais triaxiaux sont réalisés avec des pressions effectives de 50, 150, 300 ou 400 kPa. Bien que ces niveaux reflètent des conditions courantes en géotechnique, l'écart entre ces pressions reste souvent trop réduit pour contraindre correctement l'enveloppe de rupture. Lorsque les pressions effectives sont trop proches, la détermination de c' et φ' devient moins précise. Des écarts plus importants entre les pressions de consolidation permettraient d'améliorer l'identification des paramètres de résistance au cisaillement. L'utilisation de pressions effectives plus élevées (300, 600 ou 1200 kPa) élargit le domaine de contraintes exploré et renforce la qualité des interprétations.

4.3.3 Limites de la synthèse

L'étude repose sur des essais réalisés dans des contextes variés, impliquant des sols de natures différentes, des formulations spécifiques et des niveaux de pression effective parfois distincts. Les éprouvettes ont été préparées avec des degrés de

compactage compris entre 70 % et 98 % de la densité sèche maximale, ce qui influence directement la rigidité, la résistance et le mode de rupture. Les paramètres d'état initiaux, tels que la teneur en eau, la densité, l'indice des vides et le degré de saturation, contribuent également à la variabilité des résultats mesurés.

Par ailleurs, tous les sols n'ont pas été soumis à l'ensemble des traitements, ce qui ne permet pas une comparaison strictement systématique entre formulations.

Dans ce contexte, l'objectif de cette synthèse n'est pas d'établir des lois constitutives généralisables, mais d'identifier les conditions expérimentales nécessaires à une caractérisation fiable des paramètres mécaniques. Les enseignements proposés concernent ainsi principalement les pratiques permettant d'assurer la qualité et la pertinence de l'interprétation des essais triaxiaux appliqués aux sols traités.

5 CONCLUSIONS

Cette synthèse expérimentale met en évidence que l'amélioration mécanique induite par le traitement se traduit principalement par une augmentation significative de la cohésion effective et du module initial, avec des gains rapides aux jeunes âges puis plus progressifs avec le temps de cure.

Toutefois, l'analyse montre que l'estimation de ces paramètres peut être fortement influencée par les conditions expérimentales. L'écart observé sur le module d'Young initial entre mesure globale et locale peut atteindre un facteur quatre, soit un ordre de grandeur comparable à l'effet du traitement lui-même. De même, le choix des niveaux de pression effective conditionne directement la qualité de l'enveloppe de rupture et l'identification des contributions cohésive et frictionnelle.

Ces résultats soulignent que, pour les sols traités à rigidité élevée et à évolution rapide des propriétés, la maîtrise du protocole d'essai constitue un enjeu central. L'amélioration des performances mécaniques ne peut être interprétée de manière fiable qu'à condition de contrôler rigoureusement l'instrumentation, le contact initial, les cycles de chargement et l'amplitude des pressions effectives explorées.

Au-delà des tendances mécaniques observées, cette étude met ainsi en évidence que la robustesse de la caractérisation expérimentale constitue un levier déterminant pour l'interprétation et la comparabilité des essais triaxiaux appliqués aux sols traités.

6 REFERENCES

- AFNOR (2000). NF P 94-420 – Soils: Investigation and testing – Triaxial test, AFNOR, Paris.
- AFNOR (2015). NF P 94-100 – Soils: Investigation and testing – Lime and/or hydraulic binder treated materials – Tests for assessing soil suitability for treatment, AFNOR, Paris.
- AFNOR (2018). NF EN ISO 17892-7 – Geotechnical investigation and testing – Laboratory testing of soil – Part 7: Consolidated drained and undrained triaxial tests, AFNOR, Paris.
- AFNOR (2019). NF EN ISO 17892-11 – Geotechnical investigation and testing – Laboratory testing of soil – Part 11: Determination of permeability of a saturated soil, AFNOR, Paris.
- Bell, F.G. (1996). Lime stabilization of clay minerals and soils, *Engineering Geology*, 42(4), pp. 223–237. [http://doi.org/10.1016/0013-7952\(96\)00028-2](http://doi.org/10.1016/0013-7952(96)00028-2)
- Bürger, R. (1972). Soil stabilization: History, practice, and trends in the United States, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, 98(SM10), pp. 1017–1034.
- Cerema (2021). *Guide des Terrassements Routiers – GTR 2021*, Cerema, Paris.
- MEEDDAT (2009). *Objectif « Zéro Apport Extérieur » – Vers un terrassement durable*, Ministère de l'Écologie, Paris, 64 p.
- Serratrice, J. (2007). Méthode de compactage semi-statique pour la préparation des éprouvettes de sols traités, Cerema, Aix-en-Provence.
- Van den Kerkhof, A., Dubois, D. and Michel, H. (2001). Traitement des sols : principes et recommandations pratiques, *Bulletin de liaison des laboratoires des Ponts et Chaussées*, 233, pp. 57–70.