

Comportement de fatigue des sols traités à la chaux et/ou aux liants hydrauliques : Analyse d'une base de données

Vincent Krzewinski^{1,2}, Nathalie Dufour¹, Christophe Chevalier², Julien Borderon¹, Muriel Gasc-Barbier¹

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

² Univ Gustave Eiffel, GERS-SRO, Marne-la-Vallée, France

RESUME

Les ouvrages en sols traités sont traditionnellement utilisés pour renforcer les couches de forme des infrastructures linéaires de transport comme les routes, les autoroutes et les lignes ferroviaires à grande vitesse. Récemment, l'usage du traitement s'est diversifié, pour les ouvrages hydrauliques comme les digues. Ces nouvelles utilisations soulèvent de nouveaux défis pour la durabilité de ce type de matériaux et d'ouvrages pouvant être exposés à des charges cycliques mécaniques. La compréhension du phénomène de fatigue devient ainsi un enjeu crucial pour garantir la stabilité de ces constructions pendant toute leur durée de vie.

Afin de mieux appréhender le phénomène, une base de données a été créée en compilant des résultats expérimentaux de laboratoire disponibles dans la littérature. Elle comprend environ 430 essais étudiant le comportement en fatigue d'éprouvettes de sol traité à la chaux et/ou aux liants hydrauliques routiers. Le type de sol, les paramètres d'état, le temps, les conditions de cure, les conditions d'essais ainsi que les résultats sont synthétisés afin de pouvoir mener une analyse croisée sur un nombre important d'essais. En particulier, l'impact du temps de cure est étudié afin de déterminer son effet sur le comportement en fatigue des matériaux.

Mots-clefs

Fatigue, Sols Traités, Base de Données, Chaux, Liants Hydrauliques

I. INTRODUCTION

Les sols traités à la chaux et/ou aux liants hydrauliques sont des matériaux classiquement utilisés dans des ouvrages géotechniques tels que les couches de forme des routes, les plateformes ferroviaires et depuis quelque temps, entre autres, les digues. Ce traitement améliore les propriétés mécaniques des sols naturels, ce qui permet de valoriser les matériaux locaux. Ces ouvrages géotechniques sont soumis à des chargements cycliques répétés dus au trafic pour les ouvrages linéaires ou aux variations du niveau d'eau pour des digues. Ces chargements répétés correspondent à de la fatigue. Ce phénomène est caractérisé par une dégradation progressive des performances du matériau. Ainsi, sa prise en compte constitue un des défis majeurs à relever pour améliorer la durabilité des infrastructures et réduire les défaillances des ouvrages.

Plusieurs études ont mis en évidence l'influence déterminante sur le phénomène de fatigue de paramètres tels que le niveau de chargement appliqué, la granulométrie des sols, les liants hydrauliques utilisés, la durée de cure etc... Une compréhension approfondie des mécanismes en jeu est essentielle pour prédire de façon fiable la dégradation et orienter les pratiques de conception et d'entretien des ouvrages. Ainsi une base de données issues de travaux expérimentaux variés a été élaborée, intégrant divers paramètres. Elle constitue un outil puissant dans le cadre de l'analyse des interactions complexes entre les différents facteurs influençant la fatigue des sols traités. Prenant appui sur cette base de données, l'étude vise à approfondir la compréhension de la fatigue des sols traités, en utilisant des analyses statistiques. De manière originale, en prenant en compte des durées de temps de cure particulières de ces sols traités, une nouvelle modélisation empirique est proposée.

II. BASE DE DONNEES

1. CONSTRUCTION DE LA BASE DE DONNEES

La base de données contient les résultats de 411 essais de laboratoire présentés dans onze articles publiés entre 1984 et 2021. Ces essais ont été réalisés sur des éprouvettes de sols argileux, limoneux, sableux et graveleux traités avec a minima des liants hydrauliques routiers. La plupart des essais sont des essais de fatigue en flexion, deux points (Preteseille et Lenoir, 2015), trois points (Bhattacharya et Pandey, 1986), quatre points (Biswal et al., 2020) ou des essais de traction par flexion (Xie et al., 2018). D'autres essais de fatigue, dérivés d'essais de traction indirecte, et d'essais de compression uniaxiale (Xie et al., 2018) ont également été recensés.

Plusieurs paramètres ont été suivis et étudiés par les auteurs, chacun s'intéressant à des aspects spécifiques de la fatigue des sols traités. Preteseille et Lenoir (2015) ont fait varier le type de sol, l'utilisation de la chaux et le temps de cure. Lenoir et al. (2016) ont travaillé sur deux sols enrichis en chanvre. Jiang et al. (2020) ont analysé deux graves avec des teneurs en ciment et des méthodes de compactage différentes. Biswal et al. (2020) se sont intéressés à la fatigue de trois sols latéritiques avec des dosages des traitements en ciment différents. La variation de plusieurs paramètres tels que le temps de cure et la teneur en ciment de l'éprouvette a été étudiée par Xie et al. (2018). Lv et al. (2018) ont testé l'impact du temps de cure pour des graves traitées, tandis que Festugato et al. (2021) ont étudié la variation de la teneur en ciment sur des sables limoneux. Sobhan et Das (2007) ont étudié deux graves différentes ; Preteseille (2014) a travaillé sur trois sables différents ayant chacun des temps de cure distincts. Nguyen et Mulders (1984) ont analysé différents limons et argiles avec des traitements variés et des temps de cure allant de 90 à 360 jours. Enfin Bhattacharya et Pandey (1986) ont testé quatre sols traités uniquement à la chaux reconstitués selon diverses méthodes de compactage.

Lors de la réalisation des essais en laboratoire, différents paramètres expérimentaux doivent être choisis : (1) le ratio de contrainte SR (eq.1) qui correspond au rapport entre σ_{app} , la contrainte appliquée durant l'essai de fatigue et σ_{max} la résistance maximale obtenue lors d'un essai monotone ; (2) la fréquence des cycles, qui varie selon le type d'essais. L'essai se termine par la rupture de l'éprouvette qui permet d'obtenir N_f le nombre de cycles à la rupture.

$$SR = \frac{\sigma_{app}}{\sigma_{max}} \quad (\text{eq.1})$$

Vingt-huit paramètres ont été extraits pour chaque essai. Ils ont été classés en différentes catégories : l'identification de la source bibliographique (titre de l'article, le journal, la date de parution), la caractérisation du sol (Classification USCS, Classification simplifiée, le pourcentage de gravier (%), de sable (%) et de particules fines (%), l'Indice de plasticité (%), la limite de liquidité (%), la limite de plasticité (%), la provenance du sol (Zone géographique)), le traitement du sol (la teneur massique en ciment (%), le type de ciment utilisé, la teneur en chaux (%), d'autres types de traitement additionnel, la durée de la cure (jours), les conditions de température de la cure (°C)), les caractéristiques de l'éprouvette (le volume (cm^3), la méthode de compactage, la teneur massique en eau (%), la densité (g/cm^3) et les conditions de cure particulières), les conditions d'essais (le type d'essais, la fréquence (Hz), le ratio de contrainte appliqué) et enfin le nombre de cycles à la rupture (N_f). Tous ces paramètres offrent une base solide pour aller encore plus loin dans l'analyse et la compréhension des comportements liés à la fatigue des sols traités.

Il est important de noter que l'ensemble des paramètres n'était pas directement accessible dans les articles, ou n'était pas présenté de façon homogène. Ainsi, une uniformisation a été effectuée pour certains paramètres, comme le type de sol que nous avons choisi de définir selon la norme ASTM, (2020). Il a également pu être nécessaire de faire des lectures graphiques de certaines valeurs. Une estimation des erreurs produites par ces lectures graphiques a été quantifiée. Ces erreurs sont exclusivement faites sur la lecture du nombre de cycles à la rupture et sur la lecture du ratio de contrainte. L'erreur acceptable pour les ratios de contrainte est fixée à 0,025, soit un quart de la plus petite unité de graduation qui est de 0,1. Concernant la variable du nombre de cycles à la rupture N_f , représentée sur un axe logarithmique, l'incertitude a été estimée à 26 % à l'aide de l'équation (eq.2). L'équation découle d'une approche empirique où la plus petite unité sur l'axe logarithmique définit la précision de lecture. En échelle logarithmique, une unité correspond à une multiplication par 10^x , ce qui donne une incertitude relative de $10^x - 1$. Cette incertitude, bien qu'importante, n'altère pas les tendances calculées et observées lors des analyses, d'autant plus que les points ont été relevés à l'aide d'un logiciel de pointage. En outre, l'erreur proposée correspond à sa valeur maximale admissible.

$$\frac{\Delta N_f}{N_f} = 10^{(\text{Unité de l'axe le plus petit})} - 1 = 10^{0,1} - 1 = 0,26 \quad (\text{eq.2})$$

2. DESCRIPTION DE LA BASE DE DONNEES

Cette étude se concentre principalement sur cinq paramètres qui influencent le plus les résultats : la granulométrie des sols, le temps de cure, la teneur en ciment des éprouvettes, le nombre de cycles à la rupture (N_f) et enfin le ratio de contrainte (SR).

La granulométrie des éprouvettes testées est très diverse, allant des argiles aux graves. Plus précisément, les sols utilisés sont répartis comme suit : 44 % de graves, 40 % de sables, 3 % de limons, 13 % d'argiles. Ces statistiques montrent un bel échantillonnage de graves et sables, avec respectivement 183 et 165 essais chacun. Il est à souligner que le phénomène de fatigue des limons traités reste encore un champ à approfondir. La plupart des sables recensés dans la base de données sont des sables limoneux ou des sables argileux renforçant la diversité des sols étudiés. Cette

diversité de sol se reflète également dans leurs provenances, incluant des sols de France, des Etats-Unis, du Brésil, de Chine et d'Inde.

De plus, les objectifs des articles ne sont pas toujours les mêmes. Par exemple, Jiang et al. (2020), Lv et al. (2018), Xie et al. (2018) réalisent des essais systématiques pour des ratios de contraintes SR entre 0,9 et 0,5. Lenoir et al. (2016), Preteseille et Lenoir (2014), Nguyen et Mulders (1984), Preteseille (2014), quant à eux, cherchent à atteindre un million de cycles et adaptent SR pour atteindre cet objectif. Cette méthodologie entraîne des essais pour des ratios de contrainte entre 0,5 et 0,7. Ces particularités induisent une répartition des données selon les auteurs, mais le regroupement des résultats permet d'obtenir une vision plus globale du phénomène de fatigue des sols.

La répartition des principaux paramètres est présentée sous forme d'histogramme. La Fig. 1.A présente le nombre de cycles à la rupture. Une concentration du nombre de cycles entre 10^4 et 10^6 avec peu de résultats pour un nombre de cycles faible et une soixantaine de résultats qui dépassent 10^6 cycles est observée. Cette variable présente une répartition plutôt uniforme des valeurs sur l'espace exploré (10^4 à 10^6). La Fig. 1.B présente la répartition des ratios de contrainte testés. Une concentration des valeurs autour de $SR=0,6$ mais aussi des valeurs de $SR \approx 1$ (valeur théorique maximale) pour quelques essais peut être observées. La Fig. 1.C permet d'analyser le taux de ciment dans l'éprouvette. La grande majorité des traitements correspondent à un dosage entre 3 et 5 % avec quelques exceptions jusqu'à 9 % de ciment. Enfin la Fig. 1.D présente la durée de la cure. Trois pics de temps de cure sont observables : le court terme avec moins de 28 jours de cure, puis le début du long terme entre 80 et 120 jours (SETRA, 2007) et enfin le très long terme (temps de cure compris entre 120 jours et 360 jours).

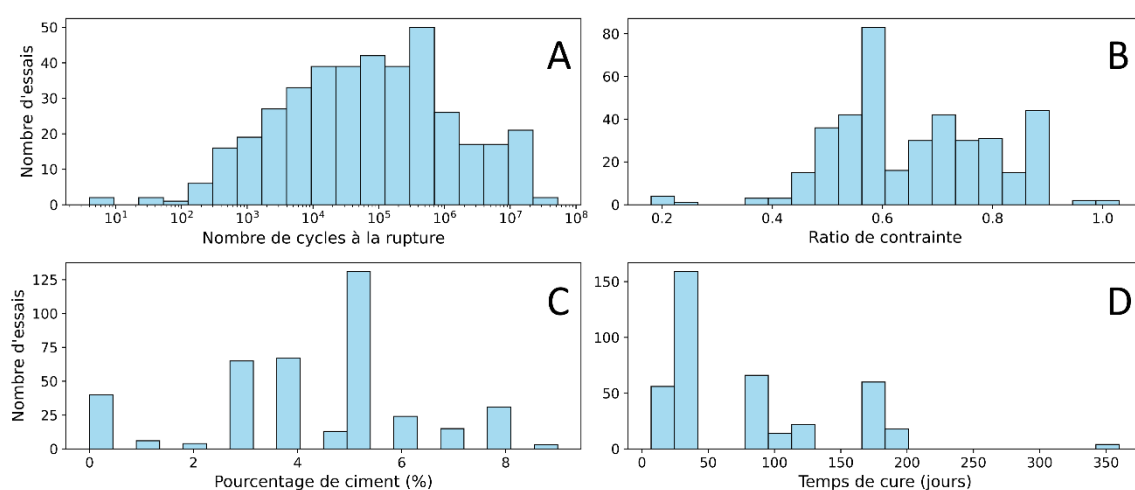


FIGURE 1. Répartition des principaux paramètres de la base de données. (A) Nombre de cycle à la rupture, (B) Ratio de contrainte, (C) teneur en ciment (%), (D) Temps de cure (Jours)

Le tableau 1 met en évidence les moyennes, les minima, les maxima, les écart-types, le premier quartile (Q1), le troisième quartile (Q3) et les médianes de chacun des quatre paramètres. Les quartiles et la médiane des temps de cure permettent d'identifier trois groupes distincts. Le premier groupe correspond à des temps de cure de 0 à 28 jours (en lien avec le premier quartile Q1 et la

médiane à 28 jours). Le deuxième groupe est défini par des temps de cure supérieurs à 120 jours, pointé par le troisième quartile Q3 (égal à 120 jours). Le troisième groupe se situe entre les deux quartiles et correspond à un temps de cure entre 28 et 120 jours. Comme il n'y a pas de temps de cure compris entre 28 et 80 jours dans la base de données, la troisième catégorie correspond donc à un temps de cure de 80 à 120 jours.

TABLEAU 1. Statistiques générales des principaux paramètres

	Nombre de cycles à la rupture	Ratio de contrainte	Teneur en ciment (%)	Durée de la cure
Moyenne	$1,54 \times 10^6$	0,68	-	75
Minimum	$4,00 \times 10^0$	0,18	0,00	3
Maximum	$5,25 \times 10^7$	1,00	9,00	360
Ecart-type	$5,05 \times 10^6$	0,20	-	70
Q1	$6,34 \times 10^3$	0,56	3,00	28
Q3	$4,94 \times 10^5$	0,80	5,00	120
Médiane	$7,00 \times 10^4$	0,65	4,00	28

III. RESULTATS

1. ANALYSE GLOBALE DES RESULTATS

Le diagramme de Wöhler, également appelé courbe S-N (Stress-Number), est souvent utilisé afin d'évaluer la durabilité de matériaux sous sollicitation cyclique. Il permet de représenter la relation entre le niveau de contrainte et la durée de vie de matériaux à partir du nombre de cycles à la rupture. Ainsi, la Fig. 2 représente sur un diagramme de Wöhler tous les résultats des essais contenus dans la base de données, avec l'axe des abscisses en échelle logarithmique afin d'avoir une meilleure observation des résultats. Plusieurs zones sont observables : la zone de fatigue basse (1) avec un nombre de cycles faible et un ratio de contrainte élevé qui est dominée par des déformations plastiques. Une seconde zone (2) est observée suivant une pente dans le domaine semi-logarithmique où les ratios de contrainte sont compris entre 0,75 et 0,6 et le nombre de cycles augmente. Enfin la troisième zone (3) est un plateau, défini à partir de $N_f = 10^6$ cycles peu importe le ratio SR choisi.

Une plus grande teneur en ciment permet d'obtenir une meilleure résistance à la fatigue pour les sols traités pour un même ratio de contrainte appliqué. Néanmoins, il est important de tenir compte de la variabilité des résultats des essais, observable sur la Fig. 2 par des lignes de points : un nombre de cycles N_f différent pour des ratios de contrainte égaux (pointés par la flèche noire). Un second paramètre à prendre en compte est le type de sol : de meilleures performances sont observées pour les graves traités (G) par rapport aux argiles traitées (C). Les trois zones sont observables sur la figure mais sont difficiles à lire à cause du nombre de paramètres et de leurs différents effets sur la dispersion du nombre de cycles qui est grande sur l'axe des abscisses.

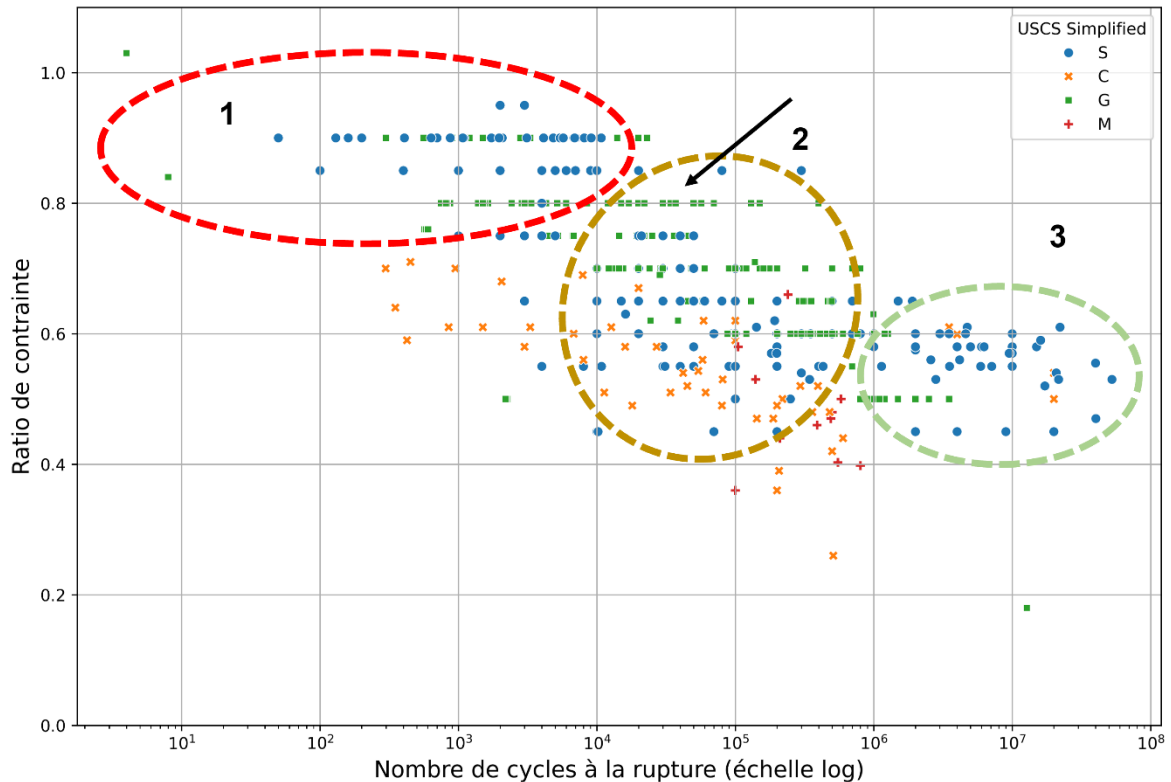


FIGURE 2. Diagramme de Wöhler (semi-log), comprenant tous les essais de la base de données, classé par type de sol.

2. INFLUENCE DU TEMPS DE CURE

Afin de comprendre l'impact de ces quatre paramètres sur le phénomène de fatigue, une première analyse par corrélation est effectuée, en se basant ici exclusivement sur le paramètre « Temps de cure ».

Le test de Shapiro-Wilk (Shapiro et Wilk, 1965) montre qu'aucun de ces quatre paramètres n'a une répartition gaussienne. Pour prendre en compte cette répartition des données répertoriées dans la base de données non gaussienne, la corrélation entre le temps de cure et le nombre de cycles N_f a été analysée à l'aide du test de Spearman (Spearman, 1904). Le résultat de cette corrélation est de 0,22 avec une valeur de probabilité très faible ($p=2,52 \times 10^{-6}$), indiquant que cette relation n'est pas due au hasard. Bien que faible, ce résultat est significatif par rapport aux autres corrélation testées pour les autres paramètres tels que la température de cure ou le type d'essais. Cette corrélation renforce l'idée d'analyser les résultats par temps de cure distincts. Ces catégories de temps de cure ont été définies en se basant à la fois sur les pratiques observées dans la littérature pour définir le court terme et le long terme mais aussi en s'appuyant sur les statistiques du tableau.1 et de la Fig. 1D. Ainsi, trois catégories de temps de cures sont définies : 0-28 jours, 80-120 jours et plus de 120 jours de cure, désignées respectivement par du court, du long et du très long terme.

Des tests de Spearman ont été réalisés pour les trois catégories de temps de cure :

- 0-28 jours : une corrélation de 0,077 avec une valeur de probabilité p de $1,8 \times 10^{-3}$,

- 80-120 jours : une corrélation de 0,506 avec une valeur de probabilité p de $1,76 \times 10^{-9}$,
- Plus de 120 jours : une corrélation de 0,543 avec une valeur de probabilité p de $1,38 \times 10^{-7}$

Ces résultats montrent que pour une cure à court terme, l'impact du temps de cure sur la résistance à la fatigue est relativement faible. En revanche, cet impact devient significatif pour des temps de cure plus longs. Cette corrélation est encore plus forte pour les cures supérieures à 120 jours. Cela suggère que les réactions chimiques contribuant à l'amélioration des caractéristiques mécaniques continuent et impactent encore plus la résistance à la fatigue des sols, il est à noter que la valeur de p est plus petite pour les cures supérieures à 120 jours par rapport à la cure 80-120 jours même si cette valeur est importante.

La Fig. 3 présente le diagramme de Wöhler pour ces catégories à travers trois sous-figures, chacune illustrant un comportement spécifique en fonction de la durée de cure. La Fig. 3.A illustre un temps de cure de 0-28 jours avec 215 essais, la Fig. 3.B illustre 114 essais pour un temps de cure de 80-120 jours et la Fig. 3.C contient 82 essais sur des éprouvettes après plus de 120 jours de cure. Ces figures mettent en exergue trois comportements : le court terme avec une répartition très vaste des résultats d'environ trois ordres de grandeur pour un même ratio de contrainte, le long terme avec une répartition un peu moins forte de 2-3 ordre de grandeur. Ces deux figures ont une courbe en S qui est connue pour des matériaux soumis à la fatigue. La Fig. 3.C montre davantage de linéarité dans cet espace semi-log et une répartition des points à un ordre de grandeur du nombre de cycles (comportement à très long terme).

Le tableau 2 présente la moyenne du nombre de cycles à la rupture en fonction du temps de cure et du ratio de contrainte. Il montre une augmentation du nombre de cycles à la rupture en fonction des temps de cure. Il pointe aussi une plus grande homogénéité des résultats pour des essais réalisés sur des éprouvettes après plus de 120 jours de cure, les performances mécaniques optimales étant généralement atteintes après 90 jours de cure (SETRA, 2007). Dans le tableau 2 en regardant les ratios de contraintes 0,5-0,6 et 0,6-0,7, il peut être observé que les moyennes du nombre de cycles à la rupture entre le long terme et le très long terme sont différentes. Ces moyennes sont jusqu'à un ordre de grandeur différent, ce qui est conséquent. Pour un SR de 0,8-0,9 l'ordre de grandeur entre le long terme et le très long terme est inversé. La Fig. 3 permet d'émettre l'hypothèse d'une meilleure homogénéité dans la répartition des résultats pour une cure de plus de 120 jours quelques soient les autres paramètres.

TABLEAU 2. Moyenne du nombre de cycles à la rupture en fonction des catégories de temps de cure et du ratio de contrainte

Ratio de contrainte	Temps de cure		
	0-28 jours	81-120 jours	>120 jours
0,4-0,5	$2,227 \times 10^6$	-	-
0,5-0,6	$7,955 \times 10^5$	$4,490 \times 10^6$	$5,375 \times 10^6$
0,6-0,7	$1,843 \times 10^5$	$2,282 \times 10^5$	$1,130 \times 10^6$
0,7-0,8	$2,750 \times 10^4$	-	$2,051 \times 10^4$
0,8-0,9	$3,097 \times 10^4$	$7,700 \times 10^4$	$2,162 \times 10^3$
0,9-1,0	$3,464 \times 10^3$	$5,411 \times 10^3$	-

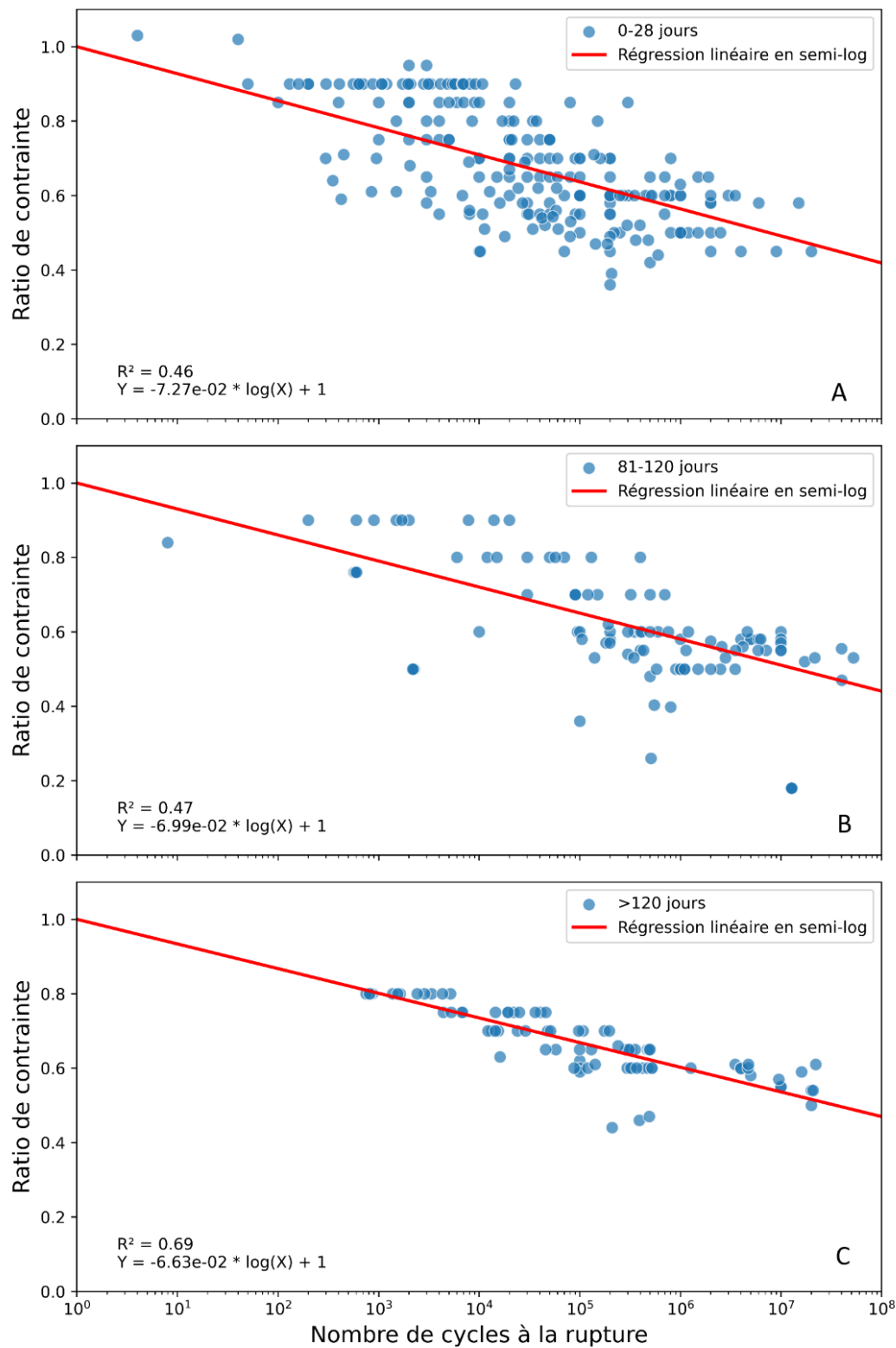


FIGURE 3. Diagrammes de Wöhler (courbes S-N) en semi-log (A) Temps de cure de 0-28 jours, (B) Temps de cure de 80-120 jours, (C) Temps de cure de plus de 120 jours

3. MODELISATION EMPIRIQUE DU COMPORTEMENT PAR TEMPS DE CURE

Une modélisation empirique linéaire en semi-log est proposée suivant les méthodes de (Lenoir et al., 2016; Nguyen et Mulders, 1984; Preteseille et Lenoir, 2015), et passant par le point théorique ($N_f = 0$, $SR = 1$). Cette modélisation (Fig. 3) permet de traduire le comportement en fatigue des sols traités sur toutes les plages de ratios de contrainte testées. Les catégories de cure inférieures à 120 jours ont un coefficient de détermination (R^2) d'environ 0.46. Pour les essais à très long terme (plus de 120 jours de cure) la régression est bien plus satisfaisante, son coefficient de détermination de 0,69 étant très supérieur aux autres. Cette modélisation permet de montrer une homogénéité dans les résultats peu importe les autres paramètres tel que la teneur en ciment. Une équation est proposée (eq.3) pour le très long terme, exprimée par la relation suivante :

$$\log(\sigma) = a - b \cdot \log(N) \text{ avec } a = 1 \text{ et } b = 6,63 \times 10^2 \quad (\text{eq.3})$$

IV. Conclusion

Une analyse d'une base de données créée à partir de la littérature disponible et regroupant plus de 400 essais de laboratoire a été réalisée grâce à des analyses statistiques. Une modélisation empirique est ensuite proposée. Cette analyse a mis en évidence la nécessité de distinguer le comportement à très long terme des sols traités à la chaux et/ ou aux liants hydrauliques, en plus des comportements à la fatigue à court et à long terme. En effet, l'analyse a mis en exergue une corrélation significative entre des temps de cure long (plus de 80 jours) et la résistance à la fatigue. Cette corrélation est très faible pour des cures courtes (jusque 28 jours). Dans un second temps, une homogénéité des résultats est observée après 120 jours de cure peu importe les autres paramètres d'essais (teneur en ciment de l'éprouvette, fréquence de chargement, ...). Enfin, une modélisation semi-logarithmique a été développée, démontrant une adéquation plus robuste avec les sols traités ayant subi des temps de cure prolongés dans l'étude des sols traités en général.

Ces résultats apportent une meilleure compréhension du phénomène de fatigue des sols traités et ouvrent une voie vers une optimisation, pour s'adapter aux contraintes spécifiques des ouvrages géotechniques linéaires. L'homogénéisation des résultats pour le comportement à très long terme soulève de nouvelles questions sur les phénomènes entrant en jeu. Un suivi de la microstructure d'éprouvettes soumises à des essais de fatigue pourrait permettre de mieux comprendre ces résultats.

Remerciement

Les auteurs remercient l'Institut Carnot Climadapt pour le financement du projet MedIA.

DISPONIBILITE DE LA BASE DE DONNEES

Les données présentées dans cette étude sont disponibles sur demande auprès des auteurs.

REFERENCES

ASTM International, 2020. Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes. ASTM D2487-20. West Conshohocken, PA : ASTM International.

Bhattacharya, P.G., Pandey, B.B., 1986. Flexural Fatigue Strength of Lime-Laterite Soil Mixtures.

Biswal, D.R., Sahoo, U.C., Dash, S.R., 2020. Fatigue Characteristics of Cement-Stabilized Granular Lateritic Soils. *J. Transp. Eng., Part B: Pavements* 146, 04019038. <https://doi.org/10.1061/JPEODX.0000147>

Festugato, L., Venson, G.I., Consoli, N.C., 2021. Parameters controlling cyclic behaviour of cement-treated sand. *Transportation Geotechnics* 27, 100488. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2020.100488>

Jiang, Y., Yuan, K., Deng, C., Tian, T., 2020. Fatigue Performance of Cement-Stabilized Crushed Gravel Produced Using Vertical Vibration Compaction Method. *J. Mater. Civ. Eng.* 32, 04020318. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0003401](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003401)

Lenoir, T., Preteseille, M., Ricordel, S., 2016. Contribution of the fiber reinforcement on the fatigue behavior of two cement-modified soils. *International Journal of Fatigue* 93, 71–81. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2016.08.007>

Lv, S., Liu, C., Lan, J., Zhang, H., Zheng, J., You, Z., 2018. Fatigue Equation of Cement-Treated Aggregate Base Materials under a True Stress Ratio. *Applied Sciences* 8, 691. <https://doi.org/10.3390/app8050691>

Nguyen, D.C., Mulders, J., 1984. Sols fins en assises de chaussées-2-comportement en fatigue des sols fins traités à la chaux et au ciment. *BULL LIAISON LAB PONTS CHAUSSEES*.

Préteseille, M., 2014. Comportement à la fatigue des sols traités aux liants hydrauliques (PhD Thesis). École Centrale de Nantes.

Preteseille, M., Lenoir, T., 2015. Mechanical fatigue behavior in treated/stabilized soils subjected to a uniaxial flexural test. *International Journal of Fatigue* 77, 41–49. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2015.03.010>

Sétra, 2007. Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques : application à la réalisation des assises de chaussées. Sétra.

Shapiro, S.S., Wilk, M.B., 1965. An analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika* 52, 591–611. <https://doi.org/10.2307/2333709>

Sobhan, K., Das, B.M., 2007. Durability of Soil–Cements against Fatigue Fracture. *J. Mater. Civ. Eng.* 19, 26–32. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2007\)19:1\(26\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2007)19:1(26))

Spearman, C., 1904. The proof and measurement of association between two things. *The American Journal of Psychology* 15, 72–101. <https://doi.org/10.2307/1412159>

Xie, J., Tang, L., Lv, S., Zhang, N., Huang, T., Liu, H., 2018. Standardization of Fatigue Characteristics of Cement-Treated Aggregate Base Materials under Different Stress States. *Applied Sciences* 8, 1500. <https://doi.org/10.3390/app8091500>