

Article

Application de la précipitation de carbonate induite par des microbes pour Contrôle de la désintégration des sols résiduels de granite

Xiao Yan Luo ¹, Yingqi Feng ², Chunjun Li ¹ et Weiping Liu ^{2,*}

¹ École de génie civil et d'architecture, Université normale des sciences et technologies du Jiangxi, Nanchang 330013, Chine ; luoxiaoyan2@126.com (XL); lichunjun2001@126.com (CL)

² École d'ingénierie des infrastructures, Université de Nanchang, Nanchang 330031, Chine ; sdtcfyq@163.com

* Correspondance : liuweiping@ncu.edu.cn

Résumé : Les sols résiduels de granite sont largement répandus dans le sud-est de la Chine. Ces sols présentent des caractéristiques mécaniques telles que des fissures meubles et riches et une désintégration facile, ce qui entraîne de graves catastrophes d'érosion des sols en cas de pluie. Les précipitations carbonatées d'origine microbienne (MICP) constituent une alternative verte pour la stabilisation des sols. Dans cette étude, une nouvelle stratégie de contrôle de la désintégration des sols résiduels granitiques utilisant la technologie MICP est proposée. Les effets de la concentration de la solution bactérienne, de la concentration de la solution de cimentation et du cycle de traitement sont étudiés au moyen d'un test de désintégration. Les paramètres optimaux de traitement des sols résiduels granitiques utilisant la technologie MICP sont déterminés en analysant les processus de désintégration et les indicateurs de qualité résiduelle de désintégration. Les résultats montrent que les échantillons traités présentent trois types de désintégration : désintégration complète, désintégration incomplète et non-désintégration. Le carbonate de calcium précipité (CaCO_3) lie les particules du sol et remplit les pores. Compte tenu de l'efficacité et du coût et d'une concentration de solution bactérienne $\text{OD}_{600} = 0,75$, cinq cycles de traitement MICP avec une concentration de solution de cimentation de 1,2 mol/L sont optimaux pour le contrôle de la désintégration des sols résiduels granitiques. Les effets de l'action de cimentation du CaCO_3 sont vérifiés par des tests de microscopie électronique à balayage (MEB) avec un spectroscope à rayons X à dispersion d'énergie (EDX). Ces résultats suggèrent que le MICP est un candidat prometteur pour contrôler la désintégration des sols résiduels granitiques.

Mots clés : sols résiduels granitiques ; précipitation de carbonates induite par des microbes ; désintégration; concentration de la solution bactérienne ; concentration de la solution de cimentation ; cycle de traitement



Citation : Luo, X. ; Feng, Y. ; Li, C. ; Liu, W. Application de la précipitation de carbonates induite par des microbes pour le contrôle de la désintégration des sols résiduels de granite. Appl. Sci. 2024, 14, 6343. <https://doi.org/10.3390/app14146343>

Rédacteur académique : Syed Minhaj Saleem Kazmi

Reçu : 3 mai 2024
Révisé : 15 juin 2024
Accepté : 2 juillet 2024
Publié : 20 juillet 2024



Copyright : © 2024 par les auteurs. Licencié MDPI, Bâle, Suisse. Cet article est un article en libre accès distribué selon les termes et conditions des Creative Commons Licence d'attribution (CC BY) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

Le sol résiduel de granite est formé par une série d'altérations physiques et chimiques de la roche granitique mère, largement répandue dans le sud-est de la Chine. Ce type de sol présente des fissures meubles et riches et une désintégration facile [1-3], entraînant une grave érosion du sol en cas de pluie [4-6]. Il existe 239 125 sites à Benggang couvrant une superficie de 1 220,05 km² [7,8], avec un taux d'érosion moyen de 590 000 t/(km² · an) [9]. Benggang présente les caractéristiques d'une intensité d'érosion élevée et d'une vaste zone d'érosion [10,11]. Le comté de Yudu, l'un des comtés présentant une grave érosion des sols dans la province du Jiangxi, en Chine, représente 29,17 % de l'ensemble du comté à cause de Benggang.

Les méthodes traditionnelles de protection des pentes dans les régions de Benggang reposent principalement sur des mesures végétales et des mesures d'ingénierie, qui présentent des inconvénients tels qu'une grande quantité d'ingénierie, une construction peu pratique, un coût élevé et une longue durée [12-14]. Par conséquent, il est d'une grande importance technique de trouver une nouvelle stratégie de protection des pentes qui soit économe en énergie, respectueuse de l'environnement et facile à construire sur un sol résiduel granitique. La précipitation carbonatée induite par des microbes (MICP) est l'une des technologies d'ingénierie géotechnique émergentes ces dernières années [15,16]. Le MICP contient trois substances typiques impliquées dans son processus : les bactéries, le substrat et la source de calcium, qui précipitent les cristaux de carbonate autour des particules du sol dans une réaction biologique, remodelant ainsi la structure du sol [17,18]. Bas

sur une bactérie productrice d'uréase enrichie dans le sol nommée *Sporosarcina pasteurii* (ATCC 11859), elle utilise l'urée comme substrat, catalyse l'hydrolyse de l'urée pour NH_4^+ et CO_3^{2-} générer du NH_4 par métabolisme et attire le Ca^{2+} grâce à la charge négative générée par des macromolécules telles que protéines à l'intérieur des bactéries, induisant ainsi la précipitation de CaCO_3 . Aucune substance toxique n'est produite pendant le processus de collage, ce qui indique qu'il s'agit d'un matériau de collage respectueux de l'environnement [19,20]. Le MICP démontre également une forte applicabilité et une grande stabilité de l'eau, qui peuvent améliorer efficacement divers types de sols, tels que les sols organiques [21], le loess [22], le sable [23], les résidus de fer [24] et le désert [25]. Les améliorations apportées par MICP aux matériaux géotechniques dépendent également des facteurs d'influence de divers processus de minéralisation, tels que les sources de calcium [26], la concentration de la solution bactérienne [27], la concentration de la solution de cimentation [28], le rapport de la solution de ciment. [29], l'âge de durcissement [30] et la valeur du pH [24]. La formation de cristaux de carbonate de calcium a un impact important sur les propriétés physiques et mécaniques du sol traité. Le sol traité avec MICP est toujours adapté à la croissance des plantes et son urée résiduelle peut servir de nutriment [19]. Cependant, il existe peu d'études sur la modification MICP du sol résiduel granitique dans la région de Benggang afin d'améliorer sa capacité à résister à l'érosion pluviale.

Un moyen important d'assurer la prévention des pertes de sol et d'eau dans la zone d'érosion consiste à améliorer la stabilité hydrique du sol de surface, améliorant ainsi sa résistance à l'érosion. Le sol résiduel de granite à surface peu profonde dans la région de Benggang est généralement meuble après une altération à long terme. Les cristaux de carbonate de calcium générés par MICP peuvent remplir les pores du sol et leur cimentation améliore la force de connexion entre les particules du sol [28]. Il est crucial de déterminer les paramètres appropriés du MICP, tels que la concentration de la solution bactérienne et la concentration de la solution instrumentale [23]. Par conséquent, une analyse quantitative est nécessaire pour l'application technique pratique du MICP dans la prévention et le contrôle de l'érosion des sols.

La désintégration du sol fait référence à la durabilité du sol lorsqu'il est en contact avec de l'eau calme et peut être utilisée pour évaluer sa stabilité hydrique [31-33]. Liu et coll. [34] ont étudié le comportement de désintégration du sol résiduel granitique le long d'un profil d'altération typique de la ville de Xiamen en Chine. Sun et coll. [35] ont étudié les quantités de désintégration et les taux de désintégration d'échantillons de sol traités avec du ciment, de la chaux vive et de la kaolinite. Zhang et coll. [36] ont révélé que l'indice de vide effectif et les courbes caractéristiques de l'eau du sol sont les principaux facteurs de contrôle affectant la vitesse de désintégration. Liu et coll. [1] ont discuté des influences combinées des fortes pluies et des pluies acides sur les caractéristiques de désintégration des sols résiduels granitiques. Cependant, les caractéristiques de désintégration des sols résiduels granitiques traités avec la technologie MICP n'ont pas reçu suffisamment d'attention. Il est nécessaire d'étudier les effets de différents facteurs de minéralisation sur les processus de désintégration. Les paramètres optimaux du MICP pour le contrôle de la désintégration des sols résiduels granitiques doivent être obtenus.

Dans cet article, la méthode MICP est utilisée pour empêcher la désintégration des sols résiduels de granite. Une série d'expériences de désintégration prenant en compte différentes concentrations de solutions bactériennes, solutions de cimentation et cycles de traitement de concentration sont réalisées pour déterminer les paramètres optimaux de la méthode MICP. Le mécanisme d'influence du MICP sur la désintégration des sols résiduels granitiques est ensuite révélé à partir des caractéristiques microstructurales. La capacité à résister à l'érosion provoquée par de fortes pluies sera étudiée à l'avenir. Cette étude préparera l'application de la technologie MICP dans le contrôle de l'érosion de Benggang.

2. Matériaux

2.1. Conditions

d'échantillonnage Le sol résiduel de granit a été collecté dans une zone d'érosion de Benggang à une profondeur de 0,5 m, située dans la ville de Gongjiang (25° 59' 24" N, 115° 26' 32" E), comté de Yudu, Jiangxi. Province, dans le sud de la Chine. La densité sèche naturelle est de 1,50 g/cm³, la limite d'humidité liquide est de 39,3 %, la limite d'humidité plastique est de 27,5 %, le coefficient de perméabilité est de 9,7 × 10⁻⁷ cm/s et la densité spécifique est de 2,56. La courbe de distribution granulométrique est représentée

Comme le montre la figure 2, le test de désintégration est effectué à l'aide d'un appareil de désintégration fabriqué par nos soins. Comme le montre la figure 2, le test de désintégration est effectué à l'aide d'un appareil de désintégration fabriqué par nos soins. Cet appareil de désintégration est constitué de quatre parties : la charpente support, l'appareil de grattage. Cet appareil de désintégration se compose de quatre parties : le cadre de support, le dispositif d'évier, le dispositif de support et le dispositif de pesée. Le cadre de support est un travail, le dispositif d'évier, le dispositif de support et le dispositif de pesée. Le cadre de support - cadre cubique en tube carré en acier inoxydable de 2,5 cm d'une taille de 60 cm x 60 cm x 50 cm. L'œuvre est un cadre cubique constitué d'un tube carré en acier inoxydable de 2,5 cm d'une taille de 60 cm x 60. Le dispositif d'évier comprend une boîte à eau thermostatique et une petite boîte en verre à l'intérieur avec des tailles de 40 cm x 40 cm x 25 cm et 30 cm x 30 cm x 25 cm, respectivement. La désintégration

Balance

Cadre de support

Boîte en verre

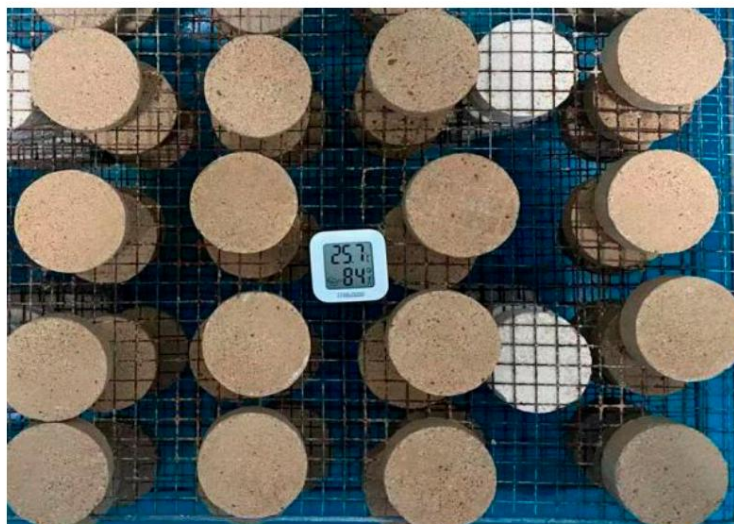
Boîte à eau thermostatique

Cordes fines

Échantillon de treillis métallique

Detailed description: The diagram illustrates a laboratory setup for measuring the thermal conductivity of a metal lattice sample. A balance scale is mounted on a support frame. The sample, a yellow circular metal lattice, is placed within a glass box that is submerged in a water bath. Fine cords connect the sample to the balance. An inset provides a magnified view of the sample's internal grid structure.

5 sur 20



Le test de désintégration est effectué à une température de l'eau de 25 °C. L'échantillon est placé sur le treillis métallique. Pendant le test, les échantillons sont plongés dans l'eau. Le poids est enregistré selon un intervalle de temps de 5 s. Pendant ce temps, la désintégration

3.2.2. Processus de test

Le test de désintégration est effectué à la température de l'eau de 25 ° C. L'échantillon est placé sur le treillis métallique. Pendant le test, les échantillons sont plongés dans l'eau. Le poids est enregistré selon un intervalle de temps de 5 s. Pendant ce temps, la morphologie de désintégration de l'échantillon est enregistrée par caméra. Lorsque l'échantillon se désintègre complètement ou si la lecture de la balance change de moins de 1 g en 10 minutes, le test se termine.

3.3. Schéma expérimental

Trois facteurs, dont la concentration de la solution bactérienne, la solution de cimentation la concentration et le cycle de traitement sont configurés dans le schéma expérimental. Le de l'eau désionisée est utilisée à la place des bactéries et de la cimentation pour pulvériser l'échantillon pour le groupe de contraste sans traitement (E1 ~ E4). Les processus de désintégration sont analysés pour obtenir le paramètre optimal. Les schémas expérimentaux sont présentés dans le tableau 1.

Tableau 1. Schémas expérimentaux.

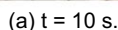
Numéro d'échantillon	Solution bactérienne Concentration (OD600)	Solution de cimentation Concentration (mol/L)	Cycle de traitement
A1 ~ A4	0,25	0,4, 0,8, 1,2, 1,6	1
A5~A8	0,5	0,4, 0,8, 1,2, 1,6	1
A9 ~ A12	0,75	0,4, 0,8, 1,2, 1,6	1
A13 ~ A16	1.0	0,4, 0,8, 1,2, 1,6	1
B1 ~ B4	0,25	0,4, 0,8, 1,2, 1,6	3
B5 ~ B8	0,5	0,4, 0,8, 1,2, 1,6	3
B9 ~ B12	0,75	0,4, 0,8, 1,2, 1,6	3
B13 ~ B16	1.0	0,4, 0,8, 1,2, 1,6	3
C1~C4	0,25	0,4, 0,8, 1,2, 1,6	5
C5 ~ C8	0,5	0,4, 0,8, 1,2, 1,6	5
C9 ~ C12	0,75	0,4, 0,8, 1,2, 1,6	5
C13~C16	1.0	0,4, 0,8, 1,2, 1,6	5
D1 ~ D4	0,25	0,4, 0,8, 1,2, 1,6	7
D5~D8	0,5	0,4, 0,8, 1,2, 1,6	7
J9~D12	0,75	0,4, 0,8, 1,2, 1,6	7
J13~D16	1.0	0,4, 0,8, 1,2, 1,6	7
E1 ~ E4	0	0	1, 3, 5, 7

4. Résultats et discussion

4.1. Processus de désintégration

Les caractéristiques morphologiques de l'échantillon de sol E3 sans traitement MICP sont présentées dans Figure 4. Lorsque l'échantillon de sol est immergé dans l'eau, de nombreuses bulles apparaissent sur la surface. surface de l'échantillon de sol, comme le montre la figure 4a. A ce stade, la désintégration du sol Le taux est inférieur au taux d'absorption d'eau, ce qui entraîne une augmentation continue du lecture du solde. En raison de l'absorption continue de l'eau, l'échantillon de sol est progressivement sature. Ensuite, une désintégration violente se produit et des fissures apparaissent à la surface du l'échantillon de sol, comme le montre la figure 4b. L'échantillon s'effondre du côté vers le centre. De grosses bulles sont générées et l'eau devient trouble. À t = 300 s, le sol est presque tombé complètement au fond de la boîte (désintégration complète). L'eau pénètre dans les pores entre les particules du sol, entraînant une augmentation de la teneur en humidité du sol et une diminution de

Sur 19

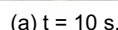


(b) $t = 60$ s.

(c) $t = 300$ s.

Figure 4. Processus de désintégration sans traitement (désintégration complète).

7 sur 20



(b) $t = 60 \text{ s}$.

(c) $t = 300$ s.

Figure 5. Processus de désintégration de désintégration incomplète.

L'échantillon de sol D11 ne présente aucun processus de désintégration traditionnelle en 300 s. Une fois que l'eau pénètre dans l'échantillon de sol, seul un lent processus d'absorption de l'eau se produit. En effet, la couche de renforcement de surface de l'échantillon de sol peut envelopper entièrement l'ensemble de l'échantillon de sol pour empêcher la désintégration après plusieurs cycles de traitement MICP. Les couches semblables à une croûte recouvrent les particules du sol, ce qui a un impact significatif sur l'interaction entre les particules et réduit l'érosion [37]. Cependant, l'eau peut encore s'infiltrer lentement, entraînant une augmentation

(c) $t = 300$ s.



Les courbes de désintégration avec trois cycles de traitement sont présentées à la figure 8. Tous les échantillons sont du type à désintégration incomplète. Pour les concentrations de solution de cimentation de 0,4, 0,8 et 1,2, la masse résiduelle de désintégration est la plus élevée lorsque la solution bactérienne la concentration est de 0,75. Dans le même temps, il convient de noter que l'impact de la bactérie la concentration de la solution varie selon les différentes concentrations de la solution de cimentation. Quand la concentration de la solution de cimentation est de 0,4, les effets de renforcement affectés par le la concentration de la solution bactérienne est de $0,75 > 0,5 > 1,0 > 0,25$. Lorsque la solution de cimentation les concentrations sont respectivement de 0,8 et 1,2, les effets de renforcement de la solution bactérienne les concentrations sont $0,75 > 1,0 > 0,5 > 0,25$. Lorsque la concentration de la solution de cimentation est 1,6, l'effet de renforcement est plus important en raison de l'augmentation de la solution bactérienne concentration. Cependant, la différence d'effet de renforcement entre 0,75 et 1,0 n'est pas significatif. Cela indique que la concentration de la solution bactérienne de 0,75 est supérieure adapté pour former une certaine couche d'épaisseur pour renforcer les échantillons de sol.

couche après un cycle de traitement. Cependant, la couche de renforcement est trop petite et trop mince et ne crée donc pas d'amélioration significative.

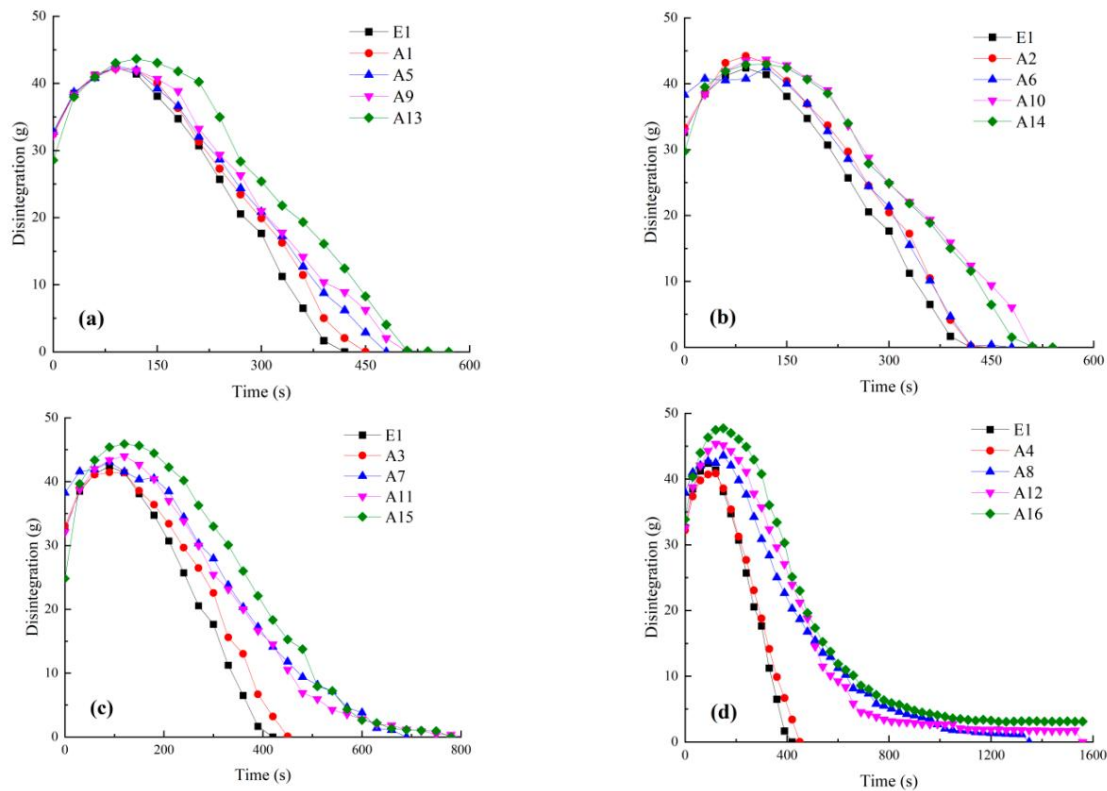


Figure 7. Courbes de désintégration avec un cycle de traitement de différentes concentrations de solution bactérienne. Figure 7. Courbe de désintégration avec un cycle de traitement de différentes concentrations de solution bactérienne : (a) 0,4, (b) 0,8, (c) 1,2 et (d) 1,6.

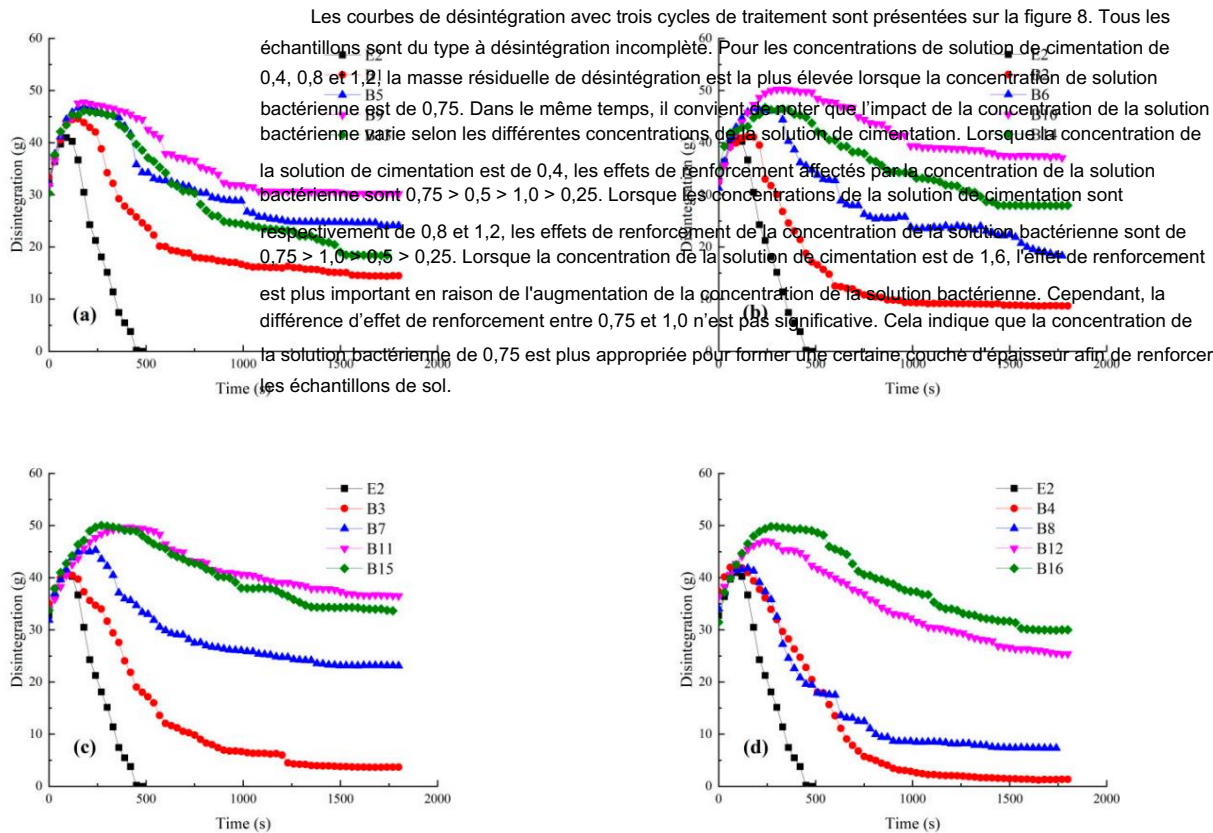


Figure 8. Courbes de désintégration avec trois cycles de traitement de différentes concentrations de solution de cimentation. Figure 8. Courbes de désintégration avec trois cycles de traitement de différentes concentrations de solution de cimentation : (a) 0,4, (b) 0,8, (c) 1,2 et (d) 1,6.

En raison de la courte durée du traitement, la réaction MICP ne s'effectue pas entièrement en un seul cycle de traitement. À une concentration plus faible de la solution de cimentation, lorsque la concentration de la solution bactérienne est supérieure à 0,5, la réaction peut être entièrement réalisée. Cela entraînera une réaction rapide. Si la concentration de la solution bactérienne est trop élevée, une grande quantité de cristaux de carbonate de calcium est produite pour remplir les minéraux de surface du sol. Le renfort reste uniquement sur la surface, ce qui le rend

En raison de la courte durée du traitement, la réaction MICP ne s'effectue pas entièrement en un seul cycle. traitement. À une concentration plus faible de solution de cimentation, lorsque la solution bactérienne la concentration est supérieure à 0,5, la réaction peut être entièrement réalisée. Cela conduira à une réaction rapide. Si la concentration de la solution bactérienne est trop élevée, une grande quantité de des cristaux de carbonate de calcium sont produits pour remplir les pores de surface du sol. Le renforcement la couche ne reste qu'en surface, ce qui rend difficile la poursuite des bactéries et du ciment infiltrant. Les courbes de désintégration avec cinq et sept cycles de traitement sont présentées dans Figures 9 et 10, respectivement. Certains échantillons présentent des phénomènes de non-désintégration après

Figure 8. Courbes de désintégration avec trois cycles de traitement de différentes solutions de cimentation con- cinq et sept cycles de traitement. L'effet de la concentration de la solution bactérienne sur les échantillons traités varie selon à différents cycles de traitement. Après plusieurs cycles de traitement, l'effet du MICP

En raison de la courte durée du traitement, la réaction MICP ne s'effectue pas entièrement en un seul cycle de traitement. À une concentration de solution de cimentation inférieure, lorsque la concentration de la solution bactérienne est la réaction peut être complètement réalisée. Cela entraînera une réaction rapide. Si les conditions de non. Une concentration de solution bactérienne plus faible convient à une concentration plus faible

La concentration de la solution bactérienne est trop élevée, une grande quantité de cristaux de carbonate de calcium est produite en concentrations de solution. Pendant ce temps, lorsque la concentration de la solution de cimentation est 1,2, pour remplir les pores au-dessus de 0,75, lorsque la concentration de la solution de cimentation est 1,2, la solution bactérienne la plus appropriée est 1,0. Cependant, il n'y a pas beaucoup de différence sept cycles de traitement sont représentés respectivement sur les figures 9 et 10. Certains échantillons présentent une non disparité par rapport à la solution bactérienne de 0,75. On peut donc conclure que, compte tenu phénomènes d'intégration après cinq et sept cycles de traitement. Compte

0,75 est efficace dans le renforcement MICP des sols résiduels granitiques.

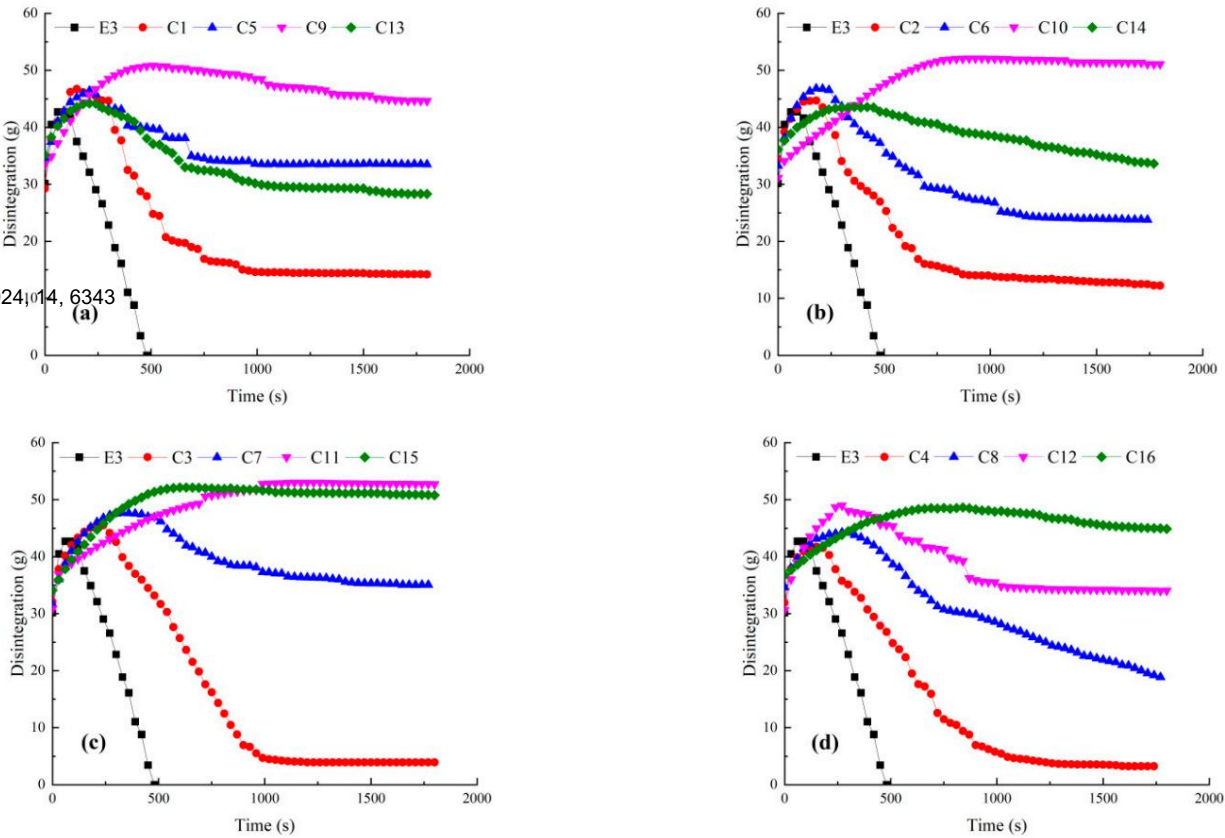


Figure 9. Courbe de désintégration avec cinq cycles de traitement de différentes concentrations de solution de cimentation. Figure 9. Courbe de désintégration avec cinq cycles de traitement de différentes concentrations de solution de cimentation: (a) 0,4; (b) 0,8; (c) 1,2 et (d) 1,6.

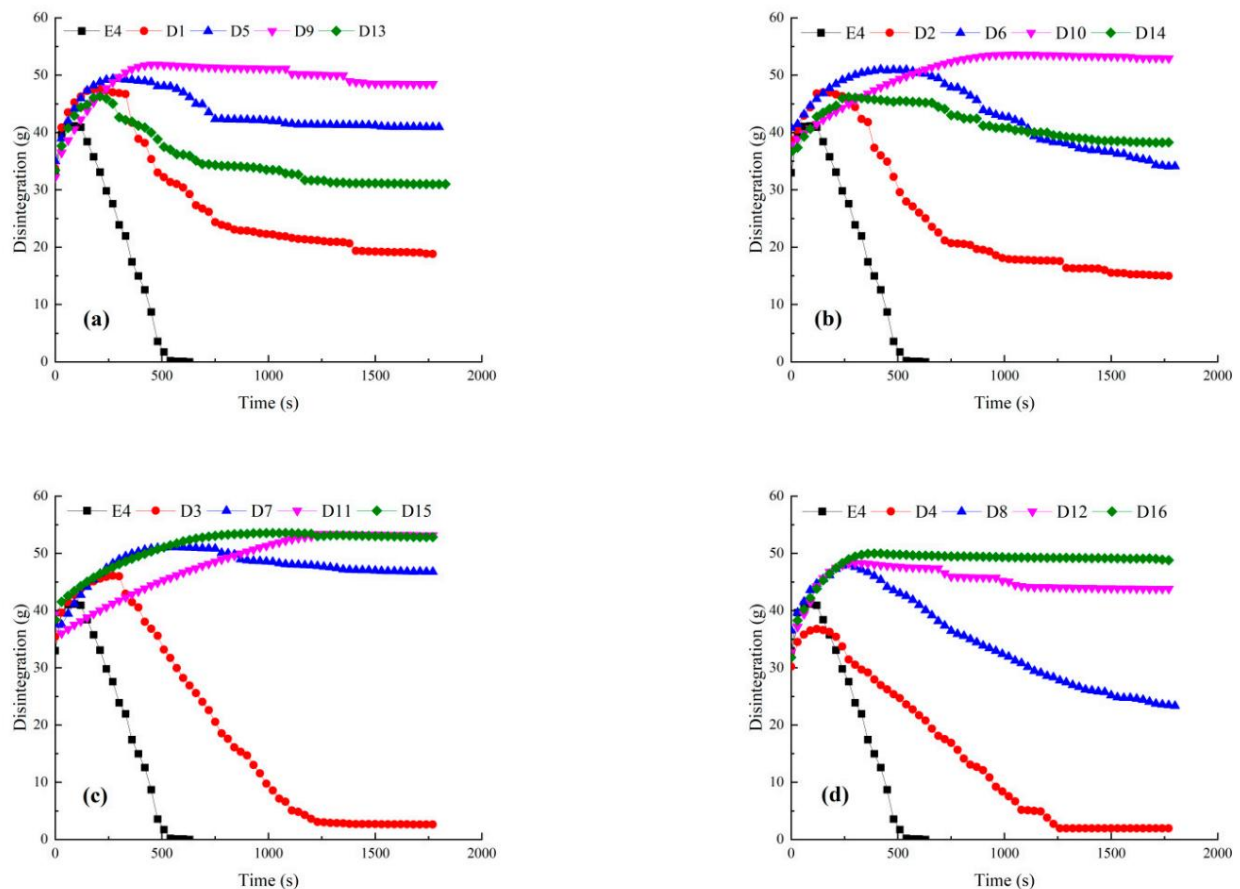


Figure 10. Courbe de désintégration avec sept cycles de traitement de différentes concentrations de solution de cimentation : (a) 0,4, (b) 0,8, (c) 1,2 et (d) 1,6.

4.3. Effet de la concentration de la solution de cimentation sur la désintégration

L'effet de la concentration de la solution bactérienne sur les échantillons traités varie en fonction des différents cycles de traitement. Après plusieurs cycles de traitement, l'effet de l'intégration du MICP, les courbes de désintégration sous différentes concentrations de solution de cimentation

la réaction est limitée. Une combinaison appropriée de la concentration de la solution bactérienne et de 0,4, 0,8, 1,2 et 1,6 mol/L est présentée pour une concentration de solution bactérienne donnée.

La concentration de la solution de cimentation peut permettre d'obtenir un bon renforcement sous une réaction suffisante. La courbe de désintégration avec un cycle de traitement est illustrée à la figure 11. Lorsque les conditions de travail. Une concentration plus faible de la solution bactérienne convient car une concentration plus faible du traitement est effectuée, il y a une amélioration limitée de la résistance à la désintégration

concentrations de la solution de cimentation. Pendant ce temps, lorsque la concentration de la solution de cimentation est $\leq 1,2$, la solution bactérienne la plus appropriée est 0,75. Lorsque la concentration de la solution de cimentation est $\geq 1,2$, la solution bactérienne la plus appropriée est 1,0. Cependant, il y a pas beaucoup de

cas. Tous les échantillons présentent le type de désintégration incomplète. Lorsque la solution bactérienne

La concentration est de 0,25, le renforcement de la concentration de la solution de cimentation est

0,4 > 0,8 > 1,2 > 1,6. Lorsque la concentration de la solution bactérienne est de 0,5, le renforcement

de la concentration de la solution de cimentation est 1,2 $\approx$ 0,4 > 0,8 > 1,6. Quand la bactérie

La concentration de la solution est de 0,75, le renforcement de la concentration de la solution

est 1,2 $\approx$ 0,8 > 0,4 > 1,6. Lorsque la concentration de la solution bactérienne est de 1,0, le renforcement

de la concentration de la solution de cimentation est 1,2 > 1,6 > 0,8 > 0,4. Cela indique également que

la concentration de la solution de cimentation doit être combinée avec la solution bactérienne

concentration pour obtenir un bon effet de traitement. À des concentrations de solution bactérienne plus faibles,

les ions contenus dans la solution cimentaire à haute concentration inhibent considérablement la

activité uréase dans la solution bactérienne [38]. Dans ces circonstances, la réaction du MICP

le taux est diminué et, par conséquent, les produits de réaction finaux sont diminués.

Lors de la intégration, les courbes de désintégration sous différentes concentrations de solution de cimentation de 0,4, 0,8, 1,2 et 1,6 mol/L sont présentées pour une concentration de solution bactérienne donnée. La courbe de désintégration avec un cycle de traitement est représentée sur la figure 11. Lorsqu'un cycle de traitement est effectué, il y a une amélioration limitée de la capacité de résistance à la désintégration en utilisant la technologie MICP, et l'échantillon se désintègre complètement.

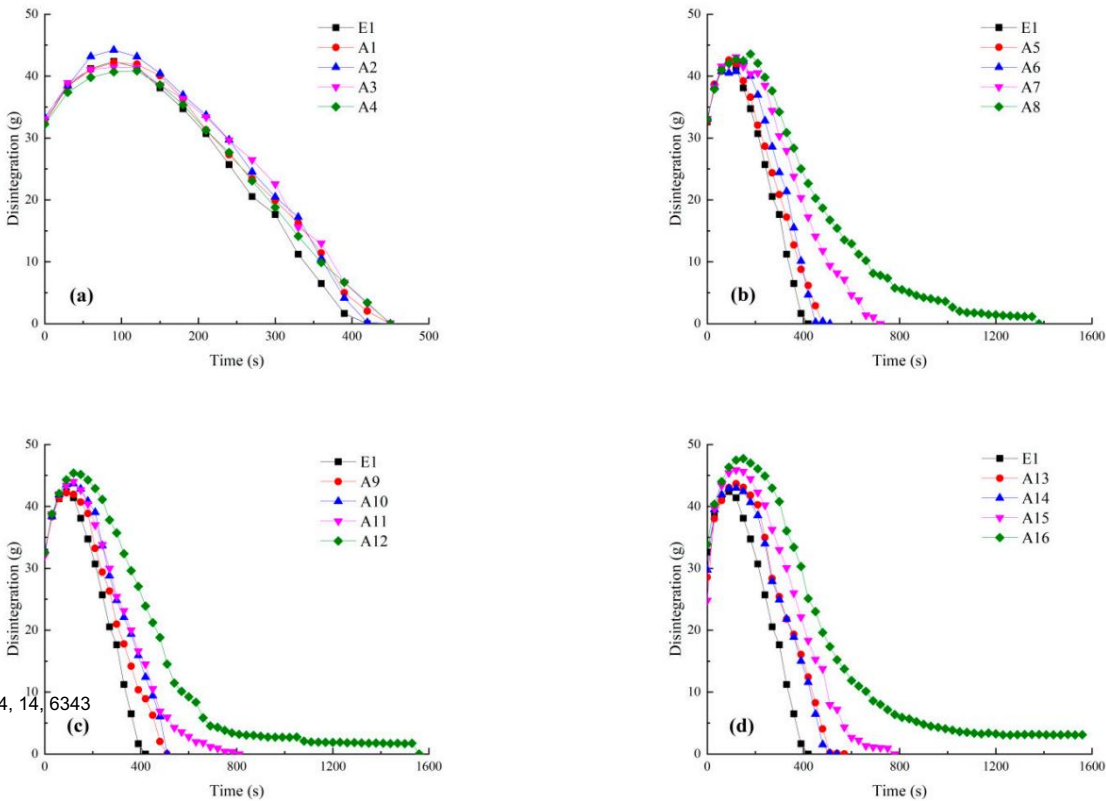


Figure 11. Courbe de désintégration avec un cycle de traitement de différentes concentrations de solution de cimentation : (a) 0,25; (b) 0,5; (c) 0,75 et (d) 1,0.

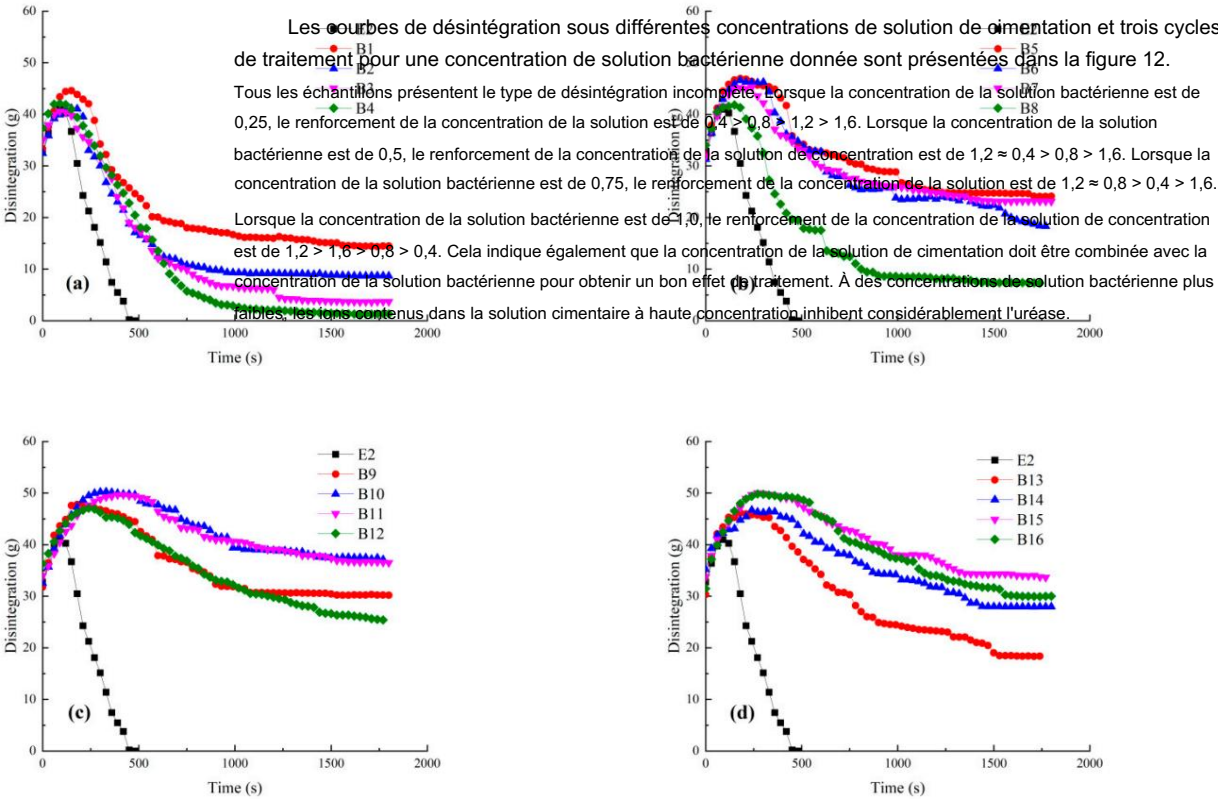


Figure 12. Courbe de désintégration avec trois cycles de traitement de différentes concentrations de solutions bactériennes. Figure 12. Courbe de désintégration avec trois cycles de traitement de différentes concentrations de solution bactériennes : (a) 0,25; (b) 0,5; (c) 0,75 et (d) 1,0.

Après cinq cycles de traitement MICP, une grande quantité de cristaux de CaCO_3 est générée. Les courbes de désintégration de la concentration de la solution de cimentation avec cinq et sept cycles de traitement sont présentées respectivement sur les figures 13 et 14. Cependant, lorsque la concentration de la solution bactérienne est de 0,25, l'effet de liaison global est médiocre, ce qui est significativement différent de celui lorsque la concentration de la solution bactérienne est supérieure à 0,5.

Après cinq cycles de traitement MICP, une grande quantité de cristaux de CaCO_3 est générée. Les courbes de désintégration de la concentration de la solution de cimentation avec cinq et sept cycles de traitement sont présentés respectivement dans les figures 13 et 14. Cependant, lorsque la concentration de la solution bactérienne est de 0,25, l'effet de liaison global est médiocre, ce qui est significativement plus important. différent de celui lorsque la concentration de la solution bactérienne est supérieure à 0,5. Donc, lors de l'examen de la concentration optimale de la solution d'instrumentation, seul le cas où la concentration de la solution bactérienne $\geq 0,5$ est prise en compte. La solution de cimentation optimale concentration 13 sur 20 est à une valeur de 1,2 lorsque la concentration de la solution bactérienne est $\geq 0,5$. Après traitement, une grande quantité de CaCO_3 est attachée aux particules environnantes et remplit le lacunes dans les particules du sol.

Appl. Sci. 2024, 14, 6343

Appl. Sci. 2024, 14, 6343

La

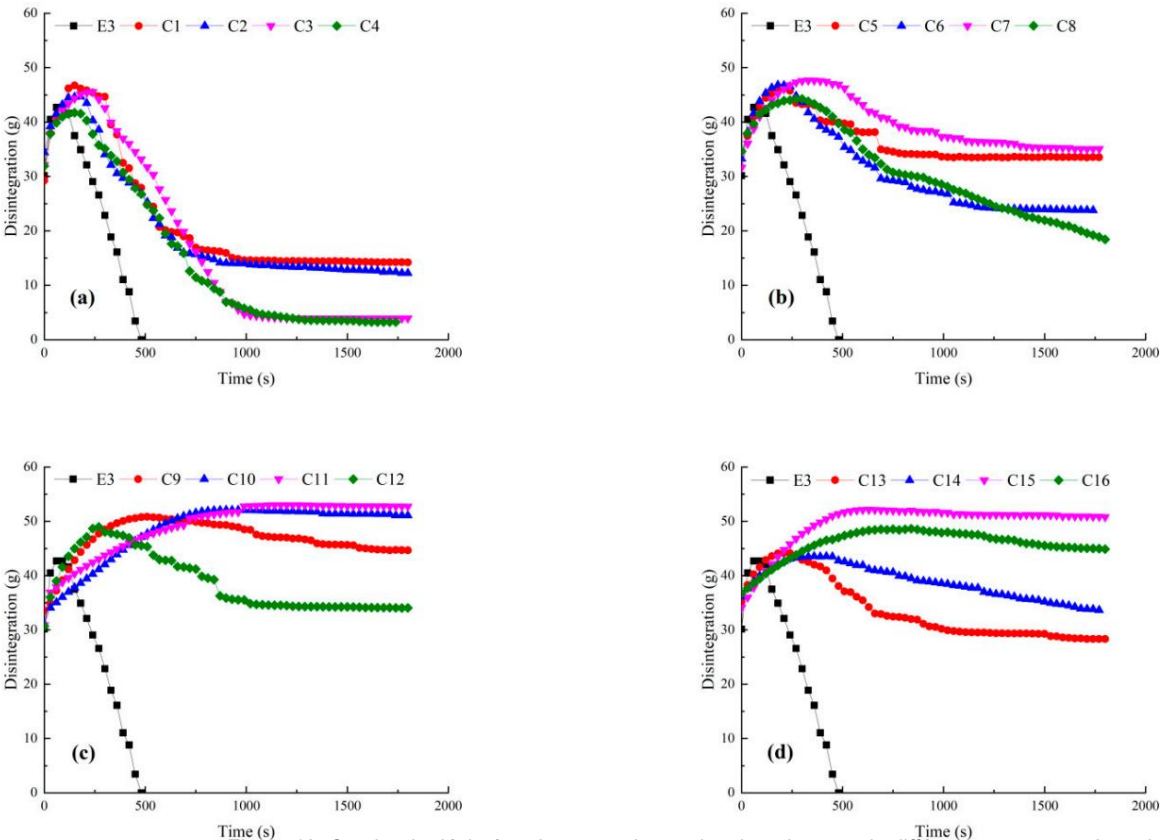


Figure 13. Courbe de désintégration avec cinq cycles de traitement de différentes concentrations de solution bactérienne : (a) 0.25, (b) 0.5, (c) 0.75 et (d) 1.0.

Figure 13. Courbe de désintégration avec cinq cycles de traitement de différentes concentrations de solutions bactériennes. Figure 13. Courbe de désintégration avec cinq cycles de traitement de différentes concentrations de solutions bactériennes : (a) 0.25, (b) 0.5, (c) 0.75 et (d) 1.0.

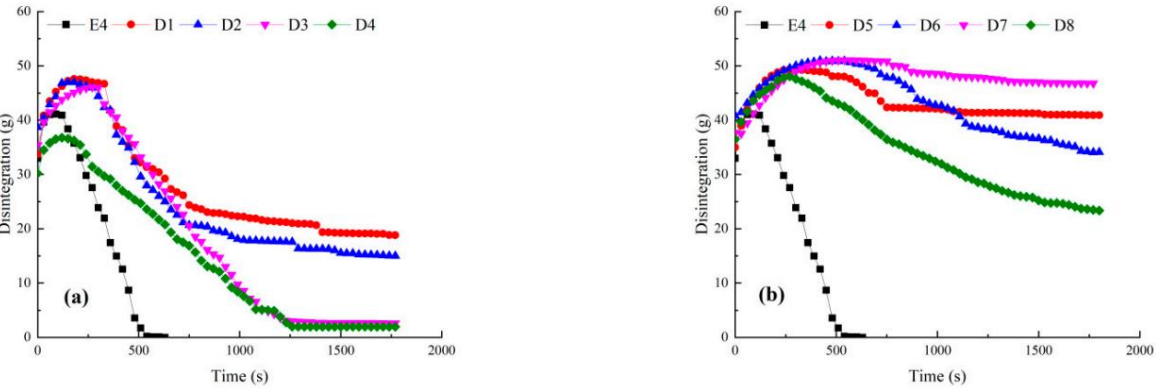


Figure 14. Suite.

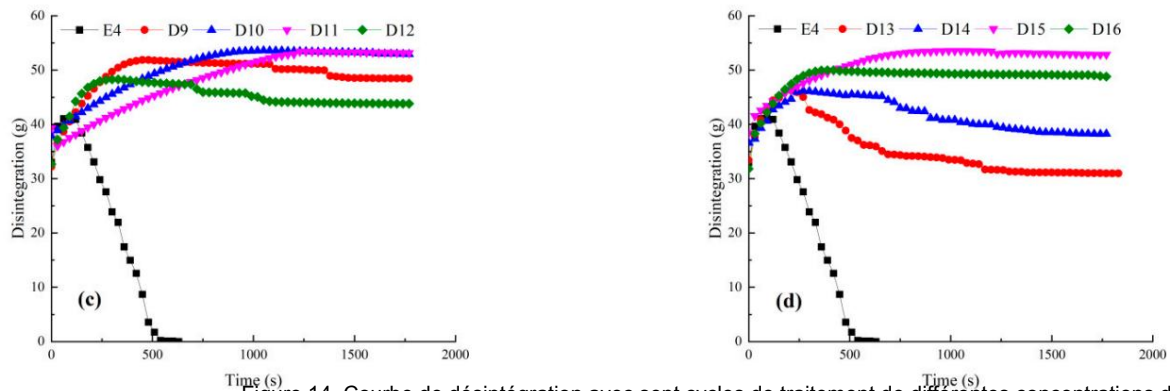


Figure 14. Courbe de désintégration avec sept cycles de traitement de différentes concentrations de solutions

Figure 14. Courbe de désintégration avec sept cycles de traitement de différentes concentrations de solutions bactériennes. Figure 14. Courbe de désintégration avec sept cycles de traitement de différentes concentrations de solutions bactériennes : (a) 0.25, (b) 0.5, (c) 0.75 et (d) 1.0.

4.4. Effet du cycle de traitement sur la désintégration

4.4. Effet du cycle de traitement sur la désintégration

Pour analyser l'effet du cycle de traitement sur le processus de désintégration, la désintégration 4.4. Effet du cycle de traitement sur la désintégration Les courbes de gradient des coefficients de solubilité aux différents cycles de traitement sont présentées dans la figure 4.4. L'effet du cycle de traitement sur le processus de désintégration. Les courbes de désintégration des échantillons de sol traités avec différents cycles de traitement sont tracées sur les courbes de concentration des échantillons de sol traités avec différents cycles de traitement données.

La concentration de solution bactérienne (BS) et à la concentration de solution de gémination (CS)

Les courbes A, B, C, D, E, F, G, H, I, J, K, L, M, N, O, P, Q, R, S, T, U, V, W, X, Y, Z, AA, AB, AC, AD, AE, AF, AG, AH, AI, AJ, AK, AL, AM, AN, AO, AP, AQ, AR, AS, AT, AU, AV, AW, AX, AY, AZ, BA, BB, BC, BD, BE, BF, BG, BH, BI, BJ, BK, BL, BM, BN, BO, BP, BQ, BR, BS, BT, BU, BV, BW, BX, BY, BZ, CA, CB, CC, CD, CE, CF, CG, CH, CI, CJ, CK, CL, CM, CN, CO, CP, CQ, CR, CS, CT, CU, CV, CW, CX, CY, CZ, DA, DB, DC, DD, DE, DF, DG, DH, DI, DJ, DK, DL, DM, DN, DO, DP, DQ, DR, DS, DT, DU, DV, DW, DX, DY, DZ, EA, EB, EC, ED, EE, EF, EG, EH, EI, EJ, EK, EL, EM, EN, EO, EP, EQ, ER, ES, ET, EU, EV, EW, EX, EY, EZ, FA, FB, FC, FD, FE, FF, FG, FH, FI, FJ, FK, FL, FM, FN, FO, FP, FQ, FR, FS, FT, FU, FV, FW, FX, FY, FZ, GA, GB, GC, GD, GE, GF, GG, GH, GI, GJ, GK, GL, GM, GN, GO, GP, GQ, GR, GS, GT, GU, GV, GW, GX, GY, GZ, HA, HB, HC, HD, HE, HF, HG, HH, HI, HJ, HK, HL, HM, HN, HO, HP, HQ, HR, HS, HT, HU, HV, HW, HX, HY, HZ, IA, IB, IC, ID, IE, IF, IG, IH, II, IJ, IK, IL, IM, IN, IO, IP, IQ, IR, IS, IT, IU, IV, IW, IX, IY, IZ, JA, JB, JC, JD, JE, JF, JG, JH, JI, JJ, JK, JL, JM, JN, JO, JP, JQ, JR, JS, JT, JU, JV, JW, JX, JY, JZ, KA, KB, KC, KD, KE, KF, KG, KH, KI, KJ, KK, KL, KM, KN, KO, KP, KQ, KR, KS, KT, KU, KV, KW, KX, KY, KZ, LA, LB, LC, LD, LE, LF, LG, LH, LI, LJ, LK, LL, LM, LN, LO, LP, LQ, LR, LS, LT, LU, LV, LW, LX, LY, LZ, MA, MB, MC, MD, ME, MF, MG, MH, MI, MJ, MK, ML, MM, MN, MO, MP, MQ, MR, MS, MT, MU, MV, MW, MX, MY, MZ, NA, NB, NC, ND, NE, NF, NG, NH, NI, NJ, NK, NL, NM, NN, NO, NP, NQ, NR, NS, NT, NU, NV, NW, NX, NY, NZ, OA, OB, OC, OD, OE, OF, OG, OH, OI, OJ, OK, OL, OM, ON, OO, OP, OQ, OR, OS, OT, OU, OV, OW, OX, OY, OZ, PA, PB, PC, PD, PE, PF, PG, PH, PI, PJ, PK, PL, PM, PN, PO, PP, PQ, PR, PS, PT, PU, PV, PW, PX, PY, PZ, QA, QB, QC, QD, QE, QF, QG, QH, QI, QJ, QK, QL, QM, QN, QO, QP, QQ, QR, QS, QT, QU, QV, QW, QX, QY, QZ, RA, RB, RC, RD, RE, RF, RG, RH, RI, RJ, RK, RL, RM, RN, RO, RP, RQ, RR, RS, RT, RU, RV, RW, RX, RY, RZ, SA, SB, SC, SD, SE, SF, SG, SH, SI, SJ, SK, SL, SM, SN, SO, SP, SQ, SR, SS, ST, SU, SV, SW, SX, SY, SZ, TA, TB, TC, TD, TE, TF, TG, TH, TI, TJ, TK, TL, TM, TN, TO, TP, TQ, TR, TS, TT, TU, TV, TW, TX, TY, TZ, UA, UB, UC, UD, UE, UF, UG, UH, UI, UJ, UK, UL, UM, UN, UO, UP, UQ, UR, US, UT, UU, UV, UW, UX, UY, UZ, VA, VB, VC, VD, VE, VF, VG, VH, VI, VJ, VK, VL, VM, VN, VO, VP, VQ, VR, VS, VT, VU, VV, VW, VX, VY, VZ, WA, WB, WC, WD, WE, WF, WG, WH, WI, WJ, WK, WL, WM, WN, WO, WP, WQ, WR, WS, WT, WU, WV, WW, WX, WY, WZ, XA, XB, XC, XD, XE, XF, XG, XH, XI, XJ, XK, XL, XM, XN, XO, XP, XQ, XR, XS, XT, XU, XV, XW, XX, XY, XZ, YA, YB, YC, YD, YE, YF, YG, YH, YI, YJ, YK, YL, YM, YN, YO, YP, YQ, YR, YS, YT, YU, YV, YW, YX, YY, YZ, ZA, ZB, ZC, ZD, ZE, ZF, ZG, ZH, ZI, ZJ, ZK, ZL, ZM, ZN, ZO, ZP, ZQ, ZR, ZS, ZT, ZU, ZV, ZW, ZX, ZY, ZZ.

Les séries A, B, C et D correspondent aux cycles de traitement 1, 3, 5 et 7. Les séries A, B, C et D correspondent respectivement aux cycles de traitement 1, 3, 5 et 7 sur la figure 15, respectivement.

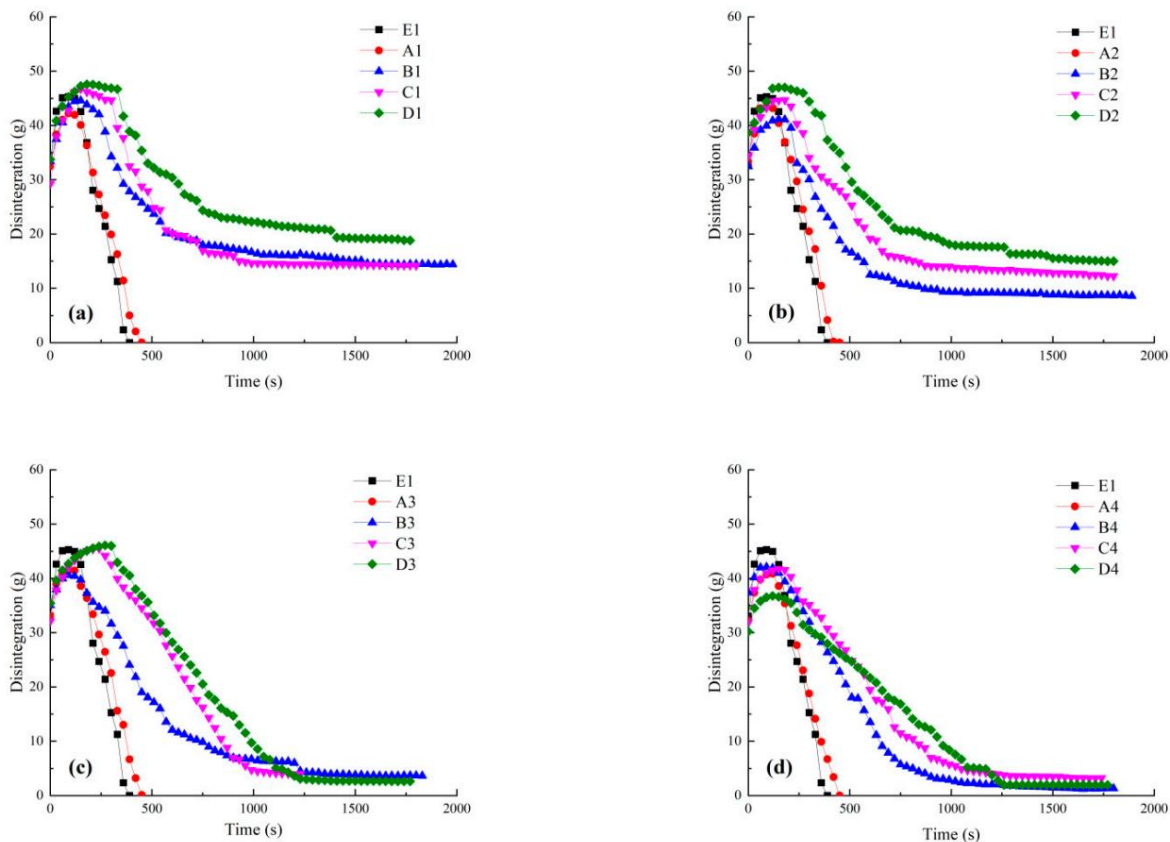


Figure 15. Suite.

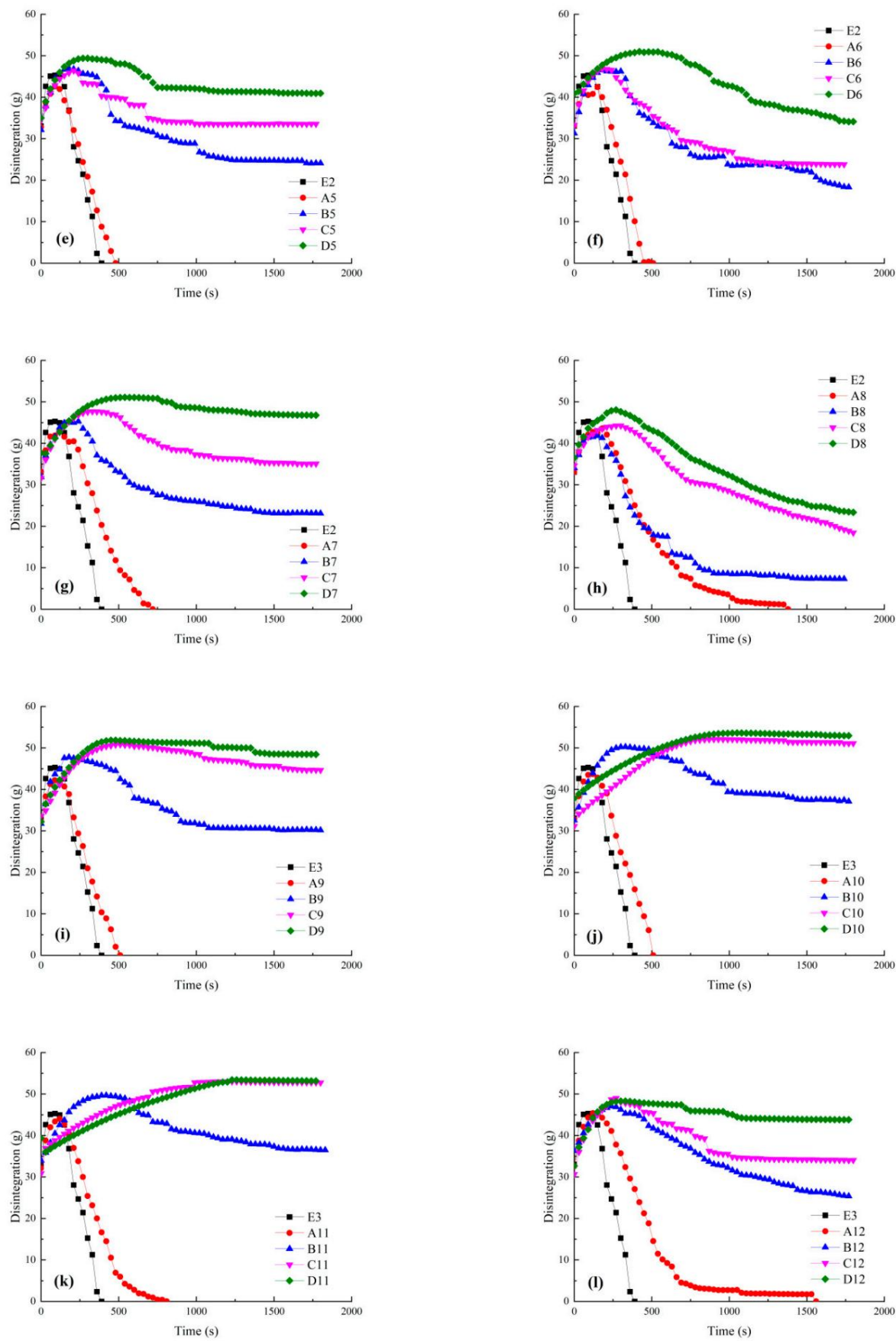
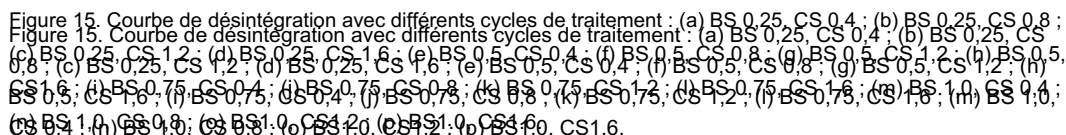


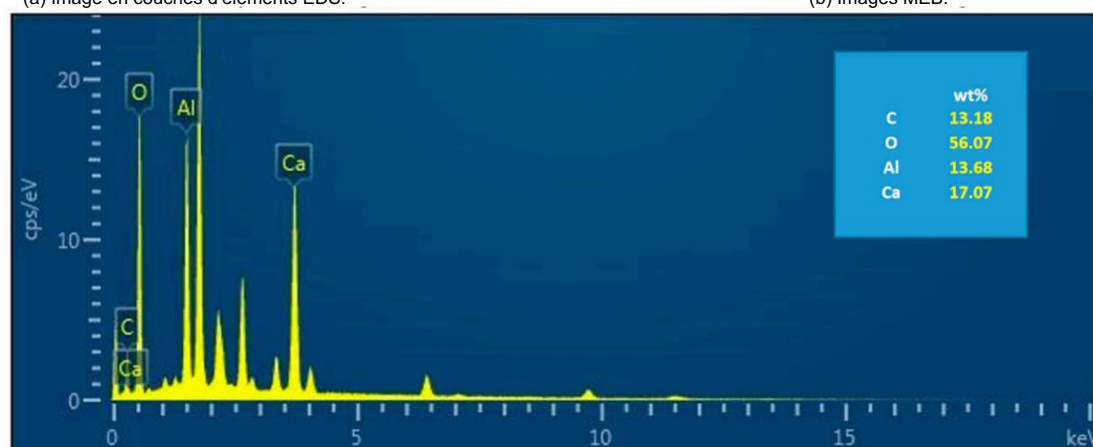
Figure 15. Suite.

[illegible]

Pour étudier la composition des particules attachées à la surface des échantillons de traitement, dans une analyse de spectre divergente des rayons X effectuée, celle-ci est présentée comme suit figure 17. La figure 17 présente un 13.18 % et C qui représente une valeur de 13.18 %, ce qui représente une montre qu'il y a O, C et présence de carbone dans les échantillons traités par le MICP [22]. La matière de la surface des particules à la surface, contrairement à la présence du CaCO₃ est produite par le processus MICP sur la

Figure 1 consists of two panels. Panel (a) is a backscattered electron image showing a fractured surface of a 100% crystalline polypropylene sample. The surface is highly textured with many small, irregular features. A scale bar in the bottom left corner indicates 10 μm. Panel (b) is an electronic image of the same fractured surface, showing elemental mapping. A legend at the bottom left identifies the elements: C (red), Ca (orange), Si (pink), Al (light blue), and O (green). The image shows a complex distribution of these elements across the surface. A scale bar in the bottom left corner indicates 10 μm.

(b) Images MEB.



(c) Diagramme du contenu des éléments.

Figure 17. Diagramme d'analyse du spectre énergétique EDS.

Bardes et al. étudie l'impact de la stratégie de traitement du choléra MDR par la stratégie d'intégration. Dans cette étude, les auteurs ont évalué l'impact de la stratégie d'intégration sur la réduction de la mortalité et le cycle de traitement lors de la prise en charge des patients atteints de choléra MDR. Les résultats de l'étude ont montré que la stratégie d'intégration a permis de réduire la mortalité et de raccourcir le cycle de traitement.

[illegible]

La couche générée par un ou trois cycles de renforcement n'est pas suffisante pour envelopper complètement la surface.

- (4) D'autres recherches sont en cours pour étudier la stabilité mécanique et la capacité à résister à l'érosion provoquée par de fortes pluies. La durabilité à long terme des sols résiduels de granite cimenté doit également être prise en compte pour parvenir à une régulation efficace de l'efficacité de la réaction de minéralisation.

Contributions des auteurs : Conceptualisation, XL et WL ; rédaction – préparation du projet original, XL ; enquête, FJ ; conservation des données, CL ; rédaction – révision et édition, WL Tous les auteurs ont lu et accepté la version publiée du manuscrit.

Financement : Cette recherche a été financée par la Fondation nationale des sciences naturelles de Chine (subvention n° 41962015) et la Fondation naturelle de la province du Jiangxi (subvention n° 20161BAB203078).

Déclaration du comité d'examen institutionnel : sans objet.

Déclaration de consentement éclairé : sans objet.

Déclaration de disponibilité des données : Les contributions originales présentées dans l'étude sont incluses dans l'article, des demandes complémentaires peuvent être adressées à l'auteur correspondant.

Conflits d'intérêts : Les auteurs ne déclarent aucun conflit d'intérêts.

Les références

- Liu, W. ; Chanson, X. ; Huang, F. Étude expérimentale sur la désintégration des sols résiduels granitiques sous l'influence combinée des cycles de mouillage-séchage et des pluies acides. *Géomate. Nat. Risques* 2019, 10, 1912-1927. [\[Référence croisée\]](#)
- Liu, X. ; Qiu, J. ; Zhang, D. Caractéristiques du ruissellement des pentes et de la teneur en eau du sol dans les colluvions de Benggang sous pluie simulée. *J. Sols Sédiments* 2018, 18, 39-48. [\[Référence croisée\]](#)
- Deng, Y. ; Shen, X. ; Xia, D. Érodabilité du sol et propriétés physicochimiques des cônes alluviaux du ravin en effondrement dans le sud de la Chine. *Pédosphère* 2019, 29, 102-113. [\[Référence croisée\]](#)
- Tang, Q. ; Duan, X. ; He, L. Variabilité et facteurs déterminants de la conductivité hydraulique saturée du sol dans les directions horizontale et verticale dans le bassin versant supérieur de Benggang. *CATENA* 2023, 222, 106810. [\[CrossRef\]](#)
- Xu, J. Benggang érosion : Les facteurs d'influence. *CATENA* 1996, 27, 249-263.
- Liang, Y. ; Zhang, B. ; Pan, X. État actuel et stratégies globales de contrôle de l'érosion des sols dans les régions vallonnées du sud Chine. *Sci. Conservation de l'eau du sol*. 2008, 6, 22-27.
- Wei, Y. ; Liu, Z. ; Wu, X. Benggang peut-il être considéré comme une érosion de ravinement ? *CATENA* 2021, 207, 105648. [\[CrossRef\]](#)
- Liang, Y. ; Ning, D. ; Pan, X. Caractéristiques et gestion de l'érosion de Benggang dans la région des sols rouges du sud. *Conservation de l'eau du sol*. Chine 2009, 1, 31-34.
- Liao, Y. ; Zheng, M. ; Li, D. Relation entre le nombre de benggang, la superficie et les valeurs intégrales hypsométriques pour différents reliefs étapes de développement. *Dégradation des terres. Dév.* 2020, 31, 2319-2328. [\[Référence croisée\]](#)
- Liu, W. ; Ouyang, G. ; Luo, X. Teneur en humidité, pression interstitielle et front de mouillage dans un sol résiduel de granite lors de l'effondrement érosion avec un angle de pente variable. *Géomorphologie* 2020, 362, 107210. [\[CrossRef\]](#)
- Liu, W. ; Cui, Y. ; Ouyang, G. Une étude expérimentale sur l'influence de la composition granulométrique sur l'effondrement de l'érosion du granite sol résiduel. *CATENA* 2023, 223, 106949. [\[CrossRef\]](#)
- Liao, Y. ; Changyuan, T. ; Zaijian, Y. Progrès de la recherche sur l'érosion de Benggang et ses mesures de prévention dans la région des sols rouges du sud de la Chine. *Acta Pédo. Péché.* 2018, 55, 1297-1312.
- Zhu, X. ; Liang, Y. ; Qu, L. Caractéristiques du ruissellement et du rendement en sédiments pour deux sols érodables typiques du sud de la Chine. *Int. J. Sédiment Res.* 2022, 37, 653-661. [\[Référence croisée\]](#)
- Bullock, A. ; King, B. Évaluation du programme chinois de conversion des terres en pente en tant que gestion durable dans les comtés de Tianquan et Wuqi. *J. Environ. Gérer.* 2011, 92, 1916-1922. [\[Référence croisée\]](#)
- van Paassen Léon, A. ; Ghose, R. ; van der Linden Thomas, JM Quantification de l'amélioration biomédiate du sol par uréolyse : expérience de biogrout à grande échelle. *J. Géotechnologie. Géoenvironnement. Ing.* 2010, 136, 1721-1728. [\[Référence croisée\]](#)
- Portugal, CRMe ; Fonyo, C. ; Machado, CC Biocimentation par précipitation de calcite induite microbiologiquement, alternative verte pour les routes : est-ce une avancée majeure ? Une revue critique. *J. Nettoyer. Prod.* 2020, 262, 121372. [\[Réf. croisée\]](#)
- Phillips, AJ ; Gerlach, R. ; Lauchnor, E. Applications techniques de la biominéralisation uréolytique : une revue. *Bio-encrassement* 2013, 29, 715-733. [\[Référence croisée\]](#)
- Tang, CS ; Zhu, C. ; Cheng, Q. Fissuration des sols par dessiccation : examen des approches d'investigation, des mécanismes sous-jacents et facteurs qui influencent. *Terre-Sci. Rév.* 2021, 216, 103586. [\[CrossRef\]](#)
- Li, S. ; Li, C. ; Yao, D. Faisabilité des précipitations carbonatées induites par des microbes et des barrières en damier de paille sur la désertification contrôle et restauration écologique. *Écol. Ing.* 2020, 152, 105883. [\[Réf. croisée\]](#)

20. Liu, S. ; Wang, R. ; Yu, J. Efficacité de l'anti-érosion d'un revêtement MICP sur les surfaces de tuiles anciennes en terre cuite. Constr. Construire. Maître. 2020, 243, 118202. [\[Réf. croisée\]](#) 21.
- Çanakçı, H. ; Sidik, W. ; Kiliç, 'I H Effet de la précipitation bactérienne de carbonate de calcium sur la compressibilité et la résistance au cisaillement du sol organique. Sols trouvés. 2015, 55, 1211-1221. [\[Référence croisée\]](#)
22. Cheng, YJ; Tang, CS ; Pan, XH Application de précipitations carbonatées induites par des microbes pour le contrôle de l'érosion de surface du loess. Ing. Géol. 2021, 294, 106387. [\[Réf. croisée\]](#)
23. Jiang, New Jersey ; Tang, CS ; Yin, LY Applicabilité de la méthode de calcification microbienne pour le contrôle de l'érosion de surface des pentes sablonneuses. J. Mater. Civ. Ing. 2019, 31, 04019250. [\[Réf. croisée\]](#)
24. Lai, Y. ; Yu, J. ; Liu, S. Étude expérimentale pour améliorer les propriétés mécaniques du sable de résidus de fer en utilisant le MICP à faible pH. Constr. Construire. Maître. 2021, 273, 121729. [\[Réf. croisée\]](#)
25. Meng, H. ; Gao, Y. ; He, J. Précipitations carbonatées induites microbiennement pour le contrôle de l'érosion éolienne des sols désertiques : essais à l'échelle du terrain. Geoderma 2021, 383, 114723. [\[CrossRef\]](#)
26. Wang, L. ; Ren, Z. ; Wang, H. Relations microstructure-propriété dans le mortier de ciment avec traitement de surface induit par des microbes précipitation carbonatée. Composer. Partie B Ing. 2022, 239, 109986. [\[Réf. croisée\]](#)
27. Cheng, L. ; Cord-Ruwisch, R. ; Shahin, MA Cimentation du sol sableux par précipitation de calcite induite microbiennement à divers degrés de saturation. Peut. Géotechnologie. J. 2013, 50, 81-90. [\[Référence croisée\]](#)
28. Zhao, Q. ; P'tit.; Li, C. Facteurs affectant l'amélioration des propriétés techniques du sol traité au MICP catalysé par les bactéries et l'uréase. J. Mater. Civ. Ing. 2014, 26, 04014094. [\[Réf. croisée\]](#)
29. Tang, CS ; Yin, LY ; Jiang, NJ Facteurs affectant la performance du sol traité par précipitation carbonatée induite par microbienne (MICP) : une revue. Environ. Science de la Terre. 2020, 79, 94. [\[Réf. croisée\]](#)
30. Choi, SG; Chang, moi; Lee, M. Revue des propriétés d'ingénierie géotechnique des sables traités par du calcium induit microbien précipitation carbonatée (MICP) et biopolymères. Constr. Construire. Maître. 2020, 246, 118415. [\[Réf. croisée\]](#)
31. Fajardo, M. ; McBratney, Alberta; Field, DJ Évaluation de l'extinction des sols par reconnaissance d'images. Travail du sol Res. 2016, 163, 119-129. [\[Référence croisée\]](#)
32. Ze, Z. ; Vadim, P. ; Svetlana, N. Caractéristiques de désintégration d'un loam argileux cryolithogène avec différentes teneurs en eau : Moscou terreau de couverture (prQIII), étude de cas. Ing. Géol. 2019, 258, 105159. [\[Réf. croisée\]](#)
33. Kasmerchak, CS; Mason, JA; Liang, M. Analyse par diffraction laser de la stabilité et de la désintégration des agrégats dans les forêts et les prairies sols du nord du Minnesota, aux États-Unis. Géoderme 2019, 338, 430-444. [\[Référence croisée\]](#)
34. Liu, X. ; Zhang, X. ; Kong, L. Désintégration des sols résiduels granitiques avec divers degrés d'altération. Ing. Géol. 2022, 305, 106723. [\[Référence croisée\]](#)
35. Soleil, Y. ; Liu, Q. ; Xu, HS Influences de différents modificateurs sur la désintégration des sols résiduels de granite améliorés sous conditions humides et cycles secs. Int. J. Min. Sci. Technologie. 2022, 32, 831-845. [\[Référence croisée\]](#)
36. Zhang, S. ; Tang, HM Étude expérimentale du mécanisme de désintégration des sols résiduels granitiques insaturés. Mécanique du sol rocheux. 2013, 34, 1668-1674.
37. Meyer, F. ; Frange.; Min, S. ; Stetler, L. ; Bang, S. Stabilisation des sols induite par microbiologie : application de Sporosarcina pasteurii pour le contrôle des poussières fugitives. Dans Geo-Frontiers 2011 : Avancées en ingénierie géotechnique ; Société américaine des ingénieurs civils : Reston, VA, États-Unis, 2011 ; pages 4002 à 4011.
38. Wang, R. ; Tang, CS ; Poêle, X. ; Shen, Z. ; Liu, Y. ; Lu, X. Une approche biotechnologique pour l'élimination des matières en suspension dans les boues de biogaz via la précipitation de calcite induite par des microbes (MICP). J. Nettoyer. Prod. 2024, 459, 142537. [\[Référence croisée\]](#)
39. Katebi, H. ; Fahmi, A. ; Ouria, A. ; Babaeian Amini, A. ; Kafil, HS Traitement microbien de surface du sable avec Sporosarcina pasteurii pour Améliorer la résistance à l'érosion éolienne dans le lac d'Urmia. Appl. Environ. Science du sol. 2021, 8893115. [\[Réf. croisée\]](#)
40. Bruce Donald, A. Glossaire de la terminologie du coulis. J. Géotechnologie. Géoenvironnement. Ing. 2005, 131, 1534-1542. [\[Référence croisée\]](#)

Avis de non-responsabilité/Note de l'éditeur : Les déclarations, opinions et données contenues dans toutes les publications sont uniquement celles du ou des auteurs et contributeurs individuels et non de MDPI et/ou du ou des éditeurs. MDPI et/ou le(s) éditeur(s) déclinent toute responsabilité pour tout préjudice corporel ou matériel résultant des idées, méthodes, instructions ou produits mentionnés dans le contenu.