Recherche Agronomique, 2025
Vol. 23, n° 1, p. 97-113

Optimisation de la germination de *Medicago arborea* L. (Fabaceae), sous stress salin par l'apport combiné de Na_2SiO_3 et de biochar : approche par la méthode des surfaces de réponse

H. Tarek, O. Kebab et R. Amdoum*

Institut National De Recherche Forestière. BP 37 Cheraga, Bainem. Alger
* Auteur de correspondance : amdoun2006@yahoo.fr

Reçu : 05 juillet 2025 Révisé : 17 août 2025 Accepté : 25 août 2025

Résumé : Cette étude vise à optimiser la germination de *Medicago arborea* sous stress salin de 0,2 g/L de NaCl, par l'application combinée de biochar et de silicate de sodium (Na_2SiO_3). Un plan d'expériences de type Box-Behnken a été utilisé pour évaluer les effets de trois facteurs : la granulométrie du biochar, son poids et la concentration en Na_2SiO_3. L'analyse de variance (ANOVA) a révélé des effets significatifs du poids du biochar et de la concentration en silicate ainsi que des interactions notables entre les facteurs. L'optimisation numérique a permis d'identifier les conditions optimales de germination. Ces valeurs correspondent à une granulométrie de 4,81 mm, un poids de 0,39 g et une concentration de silicate de sodium de 5,01 mM. Le modèle prédit un taux de germination de 89,5% sous ces conditions. L'essai de validation a confirmé cette prédiction, avec un taux de germination observé d'environ 90%, inclus dans l'intervalle de prédiction à 95% (75,09–100%) attestant ainsi de la robustesse et de la fiabilité du modèle développé. Ces résultats démontrent l'efficacité de l'apport biochar-silice pour optimiser la germination en milieu salin. L'approche adoptée ouvre des perspectives intéressantes pour la gestion durable des semis en zones arides et semi-arides.

Mots clés : *Medicago arborea* L., salinité, biochar, silicate, méthode des surfaces de réponse (RSM), optimisation de la germination.

Summary : This study aimed to optimize the germination of *Medicago arborea* under salt stress of 0.2 g/L NaCl through combined application of biochar and sodium silicate (Na_2SiO_3). A Box-Behnken experimental design was employed to evaluate the effects of three factors: biochar particle size, biochar weight, and Na_2SiO_3 concentration. Analysis of variance (ANOVA) revealed significant effects of biochar weight and silicate concentration, alongside notable interactions between the factors. Numerical optimization identified optimal conditions: a particle size of 4.81 mm, a biochar weight of 0.39 g, and a sodium silicate concentration of 5.01 mM. Under these conditions, the

model predicted a germination rate of 89.5%. A validation experiment confirmed this prediction with an observed germination rate of approximately 90% which fell within the 95% prediction interval (75.09−100%), thereby attesting to the robustness and reliability of the developed model. These findings demonstrate the efficacy of biochar-silica co-application in optimizing germination in saline environments. The approach adopted offers promising perspectives for sustainable seedling management in arid and semi-arid regions.

Key words : *Medicago arborea* L., salinity, biochar, silica, response surface methodology (RSM), germination optimization.

INTRODUCTION

Medicago arborea L., également connue sous le nom de luzerne arborescente, est une légumineuse pérenne reconnue pour son potentiel fourrager (Amato *et al.,* 2004 ; Aissat *et al.,* 2019) et pour son rôle dans la lutte contre l'érosion des sols (Andreu *et al.,* 1994). Grâce à leur symbiose avec les rhizobiums du sol, les espèces de luzerne sont capables de fixer l'azote atmosphérique, contribuant ainsi à l'enrichissement de la fertilité des sols (Crespi & Galvez, 2000 ; Tarek, 2022 ; Teggar *et al.,* 2024).

M. arborea est généralement considérée comme tolérante aux stress abiotiques tels que la sécheresse et la salinité (Lapeyronie, 1982 ; Nedjimi *et al.,* 2014). Au niveau métabolique, la tolérance au stress salin implique des ajustements complexes, notamment une régulation fine du métabolisme azoté. La synthèse et l'accumulation de solutés compatibles, tels que la proline, jouent un rôle crucial en tant qu'osmo-régulateurs, permettant aux cellules de maintenir leur turgescence et de protéger les structures macromoléculaires contre les dommages induits par le sel (Hichem *et al.,* 2015 ; Nadeem *et al.,* 2019). Toutefois, malgré cette tolérance globale, la germination des graines constitue une phase critique pour l'établissement de la plante, en particulier dans des environnements contraignants comme les sols salins. La salinité agit principalement par un effet osmotique inhibant le processus de germination (Hajlaoui *et al.,* 2016 ; Aissat *et al.,* 2019).

Le problème de la salinité est non seulement plus fréquent mais également plus contraignant que le stress hydrique, en raison de l'accumulation progressive de sels solubles dans le sol liée à des pratiques d'irrigation inadaptées et à une faible lixiviation naturelle. Parmi les stratégies prometteuses pour améliorer la tolérance au stress salin, l'apport exogène de divers agents joue un rôle

clé. Des microorganismes bénéfiques tels que *Rhizobium*, les PGPR (Plant Growth-Promoting Rhizobacteria) et les champignons mycorhiziens, ont montré leur efficacité dans ce contexte (Abd-Alla *et al.,* 2014 ; Egamberdieva *et al.,* 2017 ; Evelin *et al.,* 2019). D'autres approches incluent des apports organiques comme l'acide βaminobutyrique (BABA) qui est efficace contre le stress hydrique (Jakab *et al.,* 2005).

Le biochar se distingue également par ses propriétés d'amendement, améliorant la structure et la fertilité des sols ainsi que leur teneur en matière organique (Ali *et al.,* 2017 ; Kamara *et al.,* 2015 ; Khan *et al.,* 2024 ; Nurbekova *et al.,* 2024 ; Asif *et al.,* 2025). De plus, les apports minéraux offrent une autre piste intéressante. Des composés tels que le $CaSO_4$ (Tuna *et al.,* 2007), le $CaCl_2$ (Rahman *et al.,* 2016), le K^+ (Ahanger et al., 2015) et les silicates (Liang *et al.,* 2007 ; Kiprotich & Mwangi, 2025), ont été étudiés pour atténuer les effets phytotoxiques du NaCl.

Parmi ces minéraux, le silicate de sodium (Na_2SiO_3) fournit du silicium, un élément bénéfique reconnu pour renforcer la tolérance des plantes aux stress abiotiques. Il agit en améliorant les fonctions physiologiques et en activant le système de défense antioxydant (Zhu & Gong, 2014 ; Muneer & Jeong, 2015 ; Nurbekova *et al.,* 2024).

Bien que les effets individuels du biochar et du silicate aient été largement étudiés dans différents contextes de stress abiotique, leur application combinée reste peu documentée, en particulier pour la phase de germination de *M. arborea* en conditions salines. Cette association présente un potentiel synergique : le biochar, par sa capacité à améliorer la rétention d'eau et la disponibilité des nutriments, pourrait agir de concert avec le silicium apporté par le silicate de sodium, reconnu pour renforcer la tolérance au sel par des mécanismes physiologiques et antioxydants. La présente étude se distingue ainsi par l'évaluation et l'optimisation simultanées de ces deux amendements. Dans cette étude, la méthode des surfaces de réponse (RSM: *Response Surface Methodology*), introduite par Box et Wilson en 1951, sera utilisée. Cette approche est particulièrement adaptée pour analyser et optimiser les interactions entre plusieurs facteurs. L'objectif principal est d'optimiser la germination de M. arborea en conditions de stress salin à travers l'apport combiné de biochar et de silicate de sodium (Na_2SiO_3).

2. MATERIEL ET METHODES

2.1. Plan expérimental

La méthodologie des surfaces de réponse (RSM) a été appliquée à travers le plan de Box-Behnken (1960) afin d'évaluer l'effet de plusieurs facteurs

sur la germination de *M. arborea*. Cette méthode permet de modéliser la réponse (taux de germination) tout en limitant le nombre d'expériences nécessaires.

Trois facteurs ont été étudiés, chacun à trois niveaux codés (*–1, 0, +1*) : la granulométrie du biochar (1 ; 3 et 5 mm), la masse de biochar (0,26 ; 0,78 et 1,3 g), et la concentration en silicate de sodium (Na_2SiO_3) (1 ; 3,5 et 6 mM).

Le biochar utilisé a été produit à partir de résidus de bois dur (*Quercus suber*) par pyrolyse lente sous vide à 450 °C, des conditions reconnues pour moduler la porosité (surface spécifique, distribution des pores) et la capacité d'adsorption, notamment via la limitation des réactions d'oxydation secondaires et l'évacuation des volatils (Antal & Grønli, 2003).

Le Na_2SiO_3 a été retenu comme source de silicium en germination en raison de sa haute solubilité, de sa stabilité en solution et de sa capacité à libérer rapidement l'acide monosilicique (H_4SiO_4), forme biologiquement active du Si. Ce choix a également été motivé par sa disponibilité matérielle.

Le plan expérimental comprend 15 combinaisons expérimentales, chacune répétée cinq fois. La codification des variables a été réalisée selon l'équation suivante :

$$x_i = \frac{A_{i-} A_0}{\Delta A_i} \qquad (1)$$

Où x_i est la valeur codée du facteur, A_i la valeur réelle, A_0 la valeur au point central, et ΔA_i l'intervalle de variation du facteur (ou "pas").

2.2. Essai de germination

Les graines de *M. arborea* ont été récoltées au sein d'une population introduite dans la forêt de Baïnem située sur le massif de la Bouzaréah, au nord-ouest d'Alger. Le site, localisé à 3°02' E et 36°49' N, se trouve à une altitude d'environ 300 mètres, avec des précipitations annuelles moyennes de l'ordre de 600 mm (INRF, 2015).

Environ vingt pieds-mères ont été sélectionnés aléatoirement. Des gousses matures ont été récoltées à hauteur moyenne des arbustes. Les graines mélangées pour ne constituer qu'un seul lot, ont été soumises à une scarification mécanique.

La perlite a été retenue comme substrat en raison de son caractère inerte, limitant ainsi les interactions physico-chimiques non contrôlées qui auraient pu survenir avec un sol naturel. Ce choix visait à isoler les effets des facteurs étudiés et à analyser le phénomène dans des conditions expérimentales épurées. Des pots de 0,25 L ont été remplis de perlite puis arrosés avec une solution de NaCl à 0,2 g/L. Cette concentration a été retenue à la suite d'essais préliminaires visant à identifier un niveau de salinité

intermédiaire, ni trop faible pour induire un effet négligeable, ni trop élevé pour inhiber totalement la germination. Les résultats de ces essais ont montré que 0,2 g/L de NaCl réduisait la germination d'environ 50% par rapport au témoin, tout en permettant le suivi des effets différentiels des traitements appliqués. La perlite a ensuite été mélangée à une quantité précise de biochar selon les combinaisons définies par le plan expérimental.

Pour chaque essai, 10 graines ont été semées par pot. Chaque lot de 100 graines a été arrosé avec une solution contenant du silicate de sodium (Na_2SiO_3) en fonction des modalités du plan Box-Behnken. Les pots ont ensuite été placés dans une chambre de culture régulée à 30 °C. La germination a été suivie quotidiennement pendant 15 jours. Une graine a été considérée germée dès l'apparition d'une radicule de 2 mm, conformément aux critères définis par l'AOSA (1992). Le taux de germination (*Y*) a été calculé selon la formule suivante :

$$Y = \left(\frac{G_s}{S_g}\right) 100 \qquad (2)$$

Où *Gs* représente le nombre de graines germées, *Sg* le nombre total de graines semées.

Chaque condition expérimentale a été répétée cinq fois afin d'assurer la robustesse et la fiabilité des résultats.

2.3. Modélisation, optimisation et validation du modèle

Les données issues des 15 expériences sont utilisées pour ajuster un modèle quadratique selon l'équation 3. L'ajustement du modèle, qui revient à calculer ses coefficients, a été réalisé par la méthode des moindres carrés (Goupy & Creighton 2006).

$$Y = \alpha_0 + \sum_{j=1}^{k} \alpha_j x_j + \sum_{j<1} \alpha_{jj} x_j^2 + \sum \sum_{l=2}^{k} \alpha_{jl} x_j x_l + \varepsilon \qquad (3)$$

Où *Y* représente la réponse mesurée (taux de germination), α_0 est l'ordonnée à l'origine, α_j, α_{jj} et α_{jl} sont les coefficients estimés, x_j et x_l les variables indépendantes et ε l'erreur aléatoire supposée distribuée selon une loi normale centrée réduite.

L'objectif de l'optimisation est d'identifier les niveaux des trois facteurs étudiés permettant de maximiser la germination. Pour ce faire, l'algorithme *hill-climbing* a été utilisé. Cet algorithme explore localement les combinaisons de facteurs afin de retenir à chaque itération celle qui améliore la réponse jusqu'à atteindre un optimum local. Ce type d'approche est particulièrement bien adapté aux modèles quadratiques.

Une fois les conditions optimales déterminées, accompagnées du taux de germination prédit et de son intervalle de prédiction à 95%, cinq séries d'essais supplémentaires ont été réalisées afin de

valider expérimentalement le modèle prédictif. La validation du modèle est considérée comme satisfaisante si les taux de germination observés lors de ces essais se situent dans l'intervalle de prédiction (PI) à 95% défini par le modèle.

2.4. Analyse statistique

Une analyse de variance (ANOVA) a été effectuée sur le modèle ajusté afin d'évaluer la signification statistique des effets individuels des facteurs et de leurs interactions. L'ensemble des traitements statistiques a été réalisé à l'aide du logiciel DesignExpert 13 (version DEMO).

3. RESULTATS ET DISCUSSION

3.1. Résultats

3.1.1. Modélisation de la germination

Les résultats de l'application du plan Box-Behnken sont présentés dans le tableau I. Chaque ligne du tableau représente une expérience distincte. À partir de ces données, un modèle polynomial quadratique a été ajusté pour traduire la variation de la germination (*Y*) selon l'effet simple et d'interaction des

Tableau I. Résultats de l'application du plan Box-Behnken

Exp.	Valeurs réelles			Valeurs codées			*Y* (%)
	Biochar		Na_2SiO_3	Biochar		Na_2SiO_3	
	x_1 (mm)	x_2 (g)	x_3 (mM)	x_1	x_2	x_3	
1	1	0,78	1	*-1*	*0*	*-1*	56
2	3	0,78	3,5	*0*	*0*	*0*	67
3	5	0,78	1	*1*	*0*	*-1*	33
4	5	0,26	3,5	*1*	*-1*	*0*	89
5	1	1,3	3,5	*-1*	*1*	*0*	67
6	1	0,26	3,5	*-1*	*-1*	*0*	59
7	3	0,78	3,5	*0*	*0*	*0*	78
8	3	1,3	6	*0*	*1*	*1*	67
9	5	0,78	6	*1*	*0*	*1*	89
10	5	1,3	3,5	*1*	*1*	*0*	52
11	3	0,78	3,5	*0*	*0*	*0*	72
12	3	0,26	6	*0*	*-1*	*1*	57
13	3	1,3	1	*0*	*1*	*-1*	31
14	1	0,78	6	*-1*	*0*	*1*	56
15	3	0,26	1	*0*	*-1*	*-1*	56

Exp. Expériences. x_1 : granulométrie du biochar, x_2 : poids du biochar, x_3 : concentration du Na_2SiO_3. Y : Germination (%)

trois facteurs étudiés (x_1 : granulométrie du biochar, x_2 : poids du biochar et x_3: concentration de Na_2SiO_3. Le modèle ajusté s'écrit :

$$Y = 72,33 + 3,13x_1 - 5,50x_2 + 11,63x_1 - 11,25x_1x_2 + 14,00x_1x_3 + 8,75x_2x_3 + 0,08x_1^2 - 5,67x_2^2 - 13,92x_3^2$$

Ce modèle a été utilisé pour maximiser la germination de *M. arborea* sous conditions salines.

3.1.2. ANOVA

Le modèle traduisant les effets des trois facteurs sur la germination de *M. arborea* est hautement significatif. L'ANOVA révèle que le poids du biochar et la concentration du Na_2SiO_3 exercent des effets statistiquement significatifs sur la germination. L'effet de la granulométrie du biochar n'est significatif qu'en interaction avec le poids du biochar ou avec Na_2SiO_3. L'interaction du poids du biochar avec la concentration de Na_2SiO_3 est également significative (Tableau II).

3.1.3. Surfaces de réponse

L'analyse des surfaces de réponse permet de modéliser et de comprendre l'effet combiné des différents facteurs sur la germination. Pour faciliter l'interprétation, ces surfaces peuvent être représentées graphiquement. On distingue notamment les surfaces isoréponses, qui sont des représentations en deux dimensions d'une surface de réponse : elles montrent les variations de la réponse (Y) en fonction de deux

Tableau II. ANOVA du model quadratique traduisant les effets du Biochar et de la silice sur le taux de germination *Medicago arborea*

Source	SCE	Dl	CM	F-value	p-value
Model	3799,52	9	422,17	15,82	0,0036**
x_1 : Granulométrie du biochar	78,12	1	78,12	2,93	0,1477
x_2 : Poids du biochar	242,00	1	242,00	9,07	0,0297*
x_3 : Concentration du Na_2SiO_3	1081,13	1	1081,13	40,52	0,0014**
$x_1 x_2$	506,25	1	506,25	18,97	0,0073**
$x_1 x_3$	784,00	1	784,00	29,38	0,0029**
$x_2 x_3$	306,25	1	306,25	11,48	0,0195*
x_1^2	0,0256	1	0,0256	0,0010	0,9765
x_2^2	118,56	1	118,56	4,44	0,0889
x_3^2	715,10	1	715,10	26,80	0,0035**
Residual	133,42	5	26,68		
Cor Total	3932,93	14			

SCE : somme des carrés des écarts**. Dl :** degré de liberté. **CM :** carrés moyens

facteurs tandis que le troisième est maintenu constant. Ces figures (Fig. 1, 2 et 3) sont issues du modèle polynomial quadratique ajusté aux données expérimentales.

Des poids de biochar de 0,26 et 0,78 g, combinés à des tailles de granules de biochar de 3 et 5 mm sont propices à un taux de germination élevé (Fig. 1). La combinaison de tailles de granules de biochar de 3 à 5 mm avec des concentrations de Na_2SiO_3 supérieur à 3,5 mM est la plus bénéfique pour la germination (Fig. 2). Des concentrations de Na_2SiO_3 faibles, quel que soit le poids du biochar, conduisent à des taux de germination réduits. La tendance générale souligne l'importance d'un équilibre entre le poids du biochar et l'apport de Na_2SiO_3. Des poids de biochar de 0,26 et 0,78 g associés à des concentrations de Na_2SiO_3 supérieur à 3,5 mM, sont les conditions les plus propices pour la germination (Fig. 3).

3.1.4. Optimisation et validation

Les conditions optimales en valeurs codées permettant de maximiser la germination de *M. Arborea*, sont 0,90 pour la granulométrie du biochar,

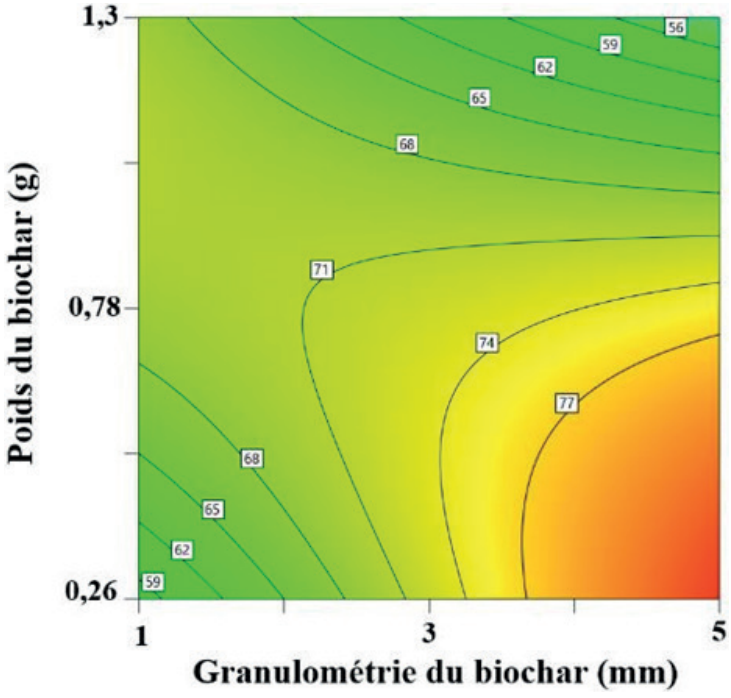


Figure 1. Courbes d'isoréponse du pourcentage de germination en fonction de la granulométrie et du poids du biochar.

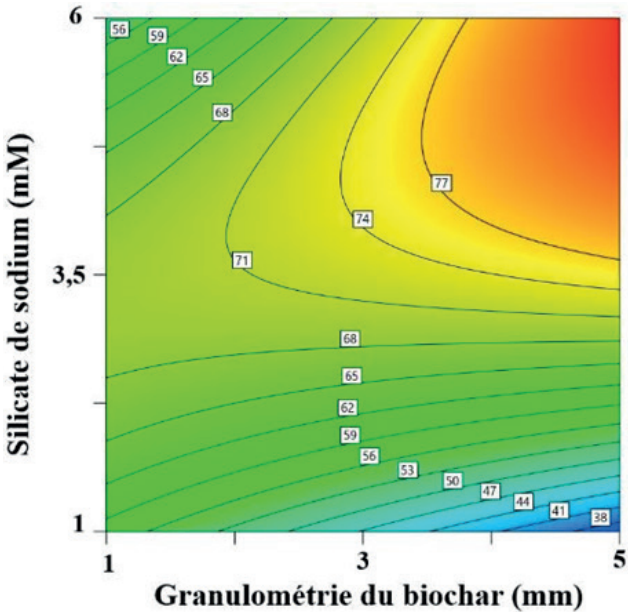


Figure 2. Courbes d'isoréponse du pourcentage de germination en fonction de la granulométrie du biochar et de la concentration en silicate de sodium.

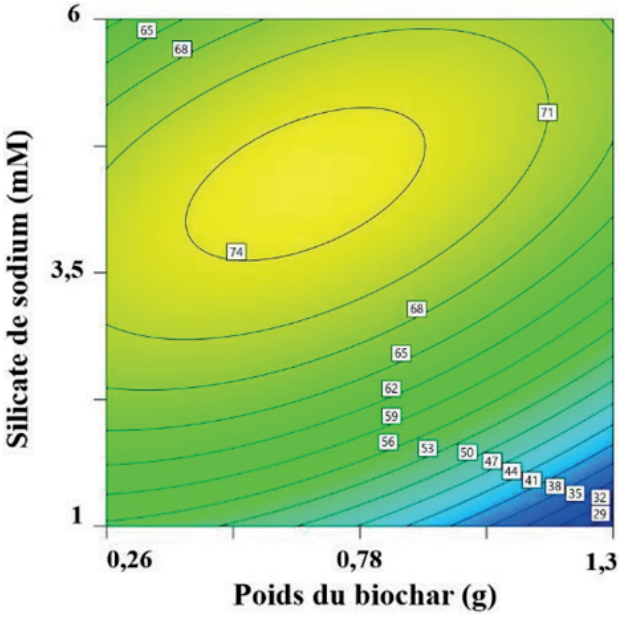


Figure 3. Courbes d'isoréponse du pourcentage de germination en fonction du poids du biochar et de la concentration en silicate de sodium.

–0,76 pour son poids et 0,60 pour la concentration en Na_2SiO_3. Ces valeurs correspondent respectivement, en valeurs réelles, à une granulométrie de 4,81 mm, un poids de 0,39 g, et une concentration en Na_2SiO_3 de 5,01 mM.

Le taux de germination prédit par le modèle dans ces conditions optimales est de 89,5 %. L'expérimentation de validation menée avec ces paramètres a permis d'obtenir un taux de germination moyen d'environ 90 %, ce qui se situe dans l'intervalle de prédiction à 95 % défini par le modèle (75,09 % à 100 %). La largeur de cet intervalle reflète la variabilité biologique inhérente au processus de germination, particulièrement marquée chez les semences soumises à un stress salin, ainsi que la dispersion résiduelle des données intégrées au modèle. Malgré cela, la concordance étroite entre les valeurs observées et prédites confirme la validité, la précision et la robustesse du modèle de réponse développé pour optimiser la germination de *M. arborea* en conditions salines amendées. Par comparaison, la germination sans stress salin avoisine 81 %, ce qui montre que la méthode testée permet d'améliorer le niveau de germination malgré la contrainte saline.

3.2. Discussion

Les résultats obtenus montrent que la germination de *M. arborea* est significativement influencée par le poids du biochar et la concentration en silicate de sodium (Na_2SiO_3) tandis que la granulométrie agit principalement en interaction avec ces facteurs. Cette observation s'inscrit dans un cadre cohérent avec les connaissances actuelles sur les effets du biochar et du silicium sur la physiologie des plantes et la qualité du substrat.

3.2.1. Influence du biochar

Le biochar est reconnu pour ses effets positifs sur la structure physique du sol, notamment en améliorant la capacité de rétention d'eau et l'aération, deux paramètres essentiels pour la germination des graines (Lehmann & Joseph, 2024). Un apport modéré permet d'optimiser ces propriétés sans provoquer d'effets négatifs tels que la compaction ou la modification excessive du pH qui pourraient inhiber la germination (Jeffery *et al.,* 2011). La granulométrie joue également un rôle déterminant : des particules de taille moyenne (3–5 mm) favorisent un bon compromis entre rétention d'eau et disponibilité en oxygène autour des graines, en modulant la surface spécifique et la porosité du substrat (Laird *et al.,* 2010).

Plusieurs études confirment que l'amendement par biochar améliore significativement la germination et la croissance des légumineuses en conditions salines. Rahaman *et al.* (2023) ont observé que l'application de

biochar (6 t/ha) augmentait la hauteur des plants (33,33 cm), le nombre de gousses (56,33/plant) et le rendement (5,49 t/ha) du haricot kilomètre (*Vigna unguiculata*) sous stress salin (0,1 M NaCl), comparativement à un témoin non amendé. De même, Ali *et al.* (2023) ont montré que le biochar, combiné à l'acide salicylique, améliorait l'indice de germination, la vigueur et la croissance du pois chiche (*Cicer arietinum*), atténuant ainsi les effets de la salinité. Enfin, Farooq *et al.* (2020) ont rapporté que l'association biochar-prétreatment osmotique des graines réduisait l'accumulation de Na^+ (–30 %) et augmentait l'activité enzymatique (*α-amylase*) ainsi que la teneur en chlorophylle (+48,8 %) chez le niébé (*Vigna unguiculata*). Ces résultats confirment que le biochar, seul ou combiné à d'autres stratégies, agit à la fois sur la physiologie des plantes et la biodisponibilité des nutriments, renforçant la tolérance au stress salin chez les légumineuses.

3.2.2. Influence du Na_2SiO_3

Le silicium apporté sous forme de Na_2SiO_3, joue un rôle clé dans la protection des plantes contre les stress abiotiques notamment la salinité (Epstein, 1994). Il renforce les parois cellulaires, améliorant la résistance mécanique des tissus embryonnaires et réduisant la perméabilité aux ions toxiques (Ma, 2004). De plus, le silicium est impliqué dans la modulation des réponses antioxydantes, limitant les dommages oxydatifs induits par le stress salin (Gong *et al.,* 2003). La concentration optimale observée (>3,5 mM) correspond vraisemblablement à un seuil à partir duquel ces mécanismes de protection sont pleinement activés, ce qui est en accord avec les travaux de Liang *et al.* (2007) et Zhu *et al.* (2019).

3.2.3. Interaction biochar/Na_2SiO_3

L'interaction significative entre le poids du biochar et la concentration en Na_2SiO_3 suggère une synergie entre les effets physico-chimiques du substrat et les mécanismes physiologiques induits par le silicium. Le biochar peut agir comme un réservoir améliorant la disponibilité et la libération progressive du silicium, optimisant ainsi son absorption par les graines (Wang *et al.,* 2019). Par ailleurs, le biochar peut adsorber une partie des ions sodium, réduisant la toxicité ionique et atténuant le stress salin, ce qui complète l'effet protecteur du silicium (Chen *et al.,* 2011). Cette combinaison crée un microenvironnement favorable à la germination, en améliorant à la fois les conditions physiques du substrat et la résistance physiologique des graines.

3.2.4. Importance de l'équilibre des facteurs

Les résultats soulignent l'importance d'un équilibre précis entre la quantité de

biochar et la concentration de Na_2SiO_3. Des doses insuffisantes de silicium ne permettent pas d'activer efficacement les mécanismes de défense, tandis que des concentrations excessives pourraient devenir toxiques (Souri *et al.,* 2021). De même, un poids de biochar trop élevé peut altérer la structure du substrat et la disponibilité en eau, réduisant ainsi la germination (Spokas, 2010). La granulométrie adaptée optimise ces effets en modulant la porosité et l'aération (Beesley *et al.,* 2010).

3.2.5. Implications agronomiques

Ces résultats sont particulièrement pertinents pour les efforts de réhabilitation des sols dans les régions arides et semi-arides, comme celles d'Algérie, où la salinité des sols constitue une contrainte majeure pour la croissance des plantes et la réhabilitation des terres dégradées (Aissat *et al.,* 2019; Tarek, 2022). *M. arborea* s'avère être une espèce idéale pour de telles applications car elle est capable de tolérer le stress abiotique, tout en apportant des bénéfices écologiques importants, tels que la fixation de l'azote et la protection contre l'érosion (Valdenegro *et al.,* 2001). Chez *M. arborea*, comme chez de nombreuses autres espèces végétales, l'accumulation de proline et de sucres solubles constitue une réponse physiologique majeure permettant de limiter les effets des stress salin et hydrique (Szabados & Savouré, 2010 ; Aissat *et al.,* 2019). En combinant les effets du biochar et du silicate de sodium, cette étude vise à optimiser la performance de germination de cette espèce dans des conditions salines, et ainsi contribuer aux efforts de réhabilitation des sols dégradés.

4. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Les résultats obtenus mettent en évidence le potentiel du biochar et du silicate de sodium (Na_2SiO_3) pour améliorer la germination de *M. arborea* en conditions de stress salin, ouvrant la voie à des solutions pratiques durables adaptées aux environnements arides et semi-arides. Des essais supplémentaires en conditions de plein champ, sur sols salins ou arides naturels, sont nécessaires afin de confirmer l'efficacité de cette approche et d'évaluer son applicabilité agronomique à grande échelle. L'exploration des mécanismes physiologiques et moléculaires sous-jacents, ainsi que l'évaluation de différentes formes de silicium (K_2SiO_3, Ca_2O_4Si, etc.) et de leur interaction avec d'autres amendements tels que les PGPR, constituent également des perspectives prioritaires. Une attention particulière devra être portée aux effets à long terme sur la croissance, la nodulation et la symbiose rhizobienne.

REFERENCES

Abd-Alla M. H., El-Enany A. W. E., Nafady N. A., Khalaf D. M. et Morsy F. M., 2014. Synergistic interaction of *Rhizobium leguminosarum* bv. *viciae* and arbuscular mycorrhizal fungi as a plant growth promoting biofertilizers for faba bean (*Vicia faba* L.) in alkaline soil. *Microbiol Res*. Vol. 169 (1) : 49-58.

Ahanger M. A., Tomar N. S., Tittal M., Argal S. et Agarwal R. M., 2015. Plant growth under water/salt stress: ROS production ; antioxidants and significance of added potassium under such conditions. *Physiol Plant*. Vol. 155 (3) : 352-366.

Aissat A., Mehdadi Z., Leogrande R. et Stellacci A. M., 2019. Characterization of *Medicago arborea* L. Response to Water and Salt Stress. *J Stress Physiol Biochem*. Vol. 15 (4). 103-113

Ali S., Rizwan M., Qayyum M. F., Ok Y. S., Ibrahim M., Riaz M., Rehman M. Z. U., 2017. Biochar soil amendment on alleviation of drought and salt stress in plants : a critical review. *Environ Sci Pollut Res*. Vol. 24 (14) : 12700-12712.

Ali, U., Ullah, S., & Nafees, M. (2023). Resistance induction in chickpea (*Cicer arietinum* L.) against salinity stress through biochar as a soil amendment and salicylic acid-induced signaling. *Gesunde Pflanzen*, 75 (5), 1871-1883.

Amato G., Stringi L. et Giambalvo D., 2004. Productivity and canopy modification of *Medicago arborea* as affected by defoliation management and genotype in a Mediterranean environment. *Grass Forage Sci*. Vol. 59: 20-28.

Andreu V., Rubio J. L. et Cerni R., 1994. Use of a shrub (*Medicago arborea*) to control water erosion on steep slopes. *Soil Use Manag*. Vol. 10 (3) : 95-99.

Antal, M. J., & Grønli, M. (2003). The art, science, and technology of charcoal production. *Industrial & engineering chemistry research*, 42 (8), 1619-1640.

Asif A. H., Shi L., Ding T., Zhang S. et Sun H., 2025. Emerging engineered biochar for environmental and energy applications. *J Bioresour Bioprod*. Vol. 10 (1) : 1-3.

Beesley L., Moreno-Jiménez E. et Gomez-Eyles J. L., 2010. Effects of biochar and greenwaste compost amendments on mobility, bioavailability and toxicity of inorganic and organic contaminants in a multi-element polluted soil. *Environ Pollut*. Vol. 158 (6) : 2282-2287.

Box G. E. P. et Behnken D. W., 1960. Some new three level designs for the study of quantitative variables. *Technometrics*. Vol. 2 (4) : 455-475.

Box G. E. P. et Wilson K. B., 1951. On the experimental attainment of optimum conditions. *J R Stat Soc B*. Vol. 13 (1) : 1-45.

Chen B., Chen Z. et Lv S., 2011. A novel magnetic biochar efficiently sorbs organic pollutants and phosphate. *Bioresour Technol*. Vol. 102 (2) : 716-723.

Crespi M. et Gálvez S., 2000. Molecular mechanisms in root nodule development. *J Plant Growth Regul*. Vol. 19 : 155-166.

Egamberdieva D., Wirth S., Jabborova D., Räsänen L. A. et Liao H., 2017. Coordination between *Bradyrhizobium* and *Pseudomonas* alleviates salt stress in soybean through altering root system architecture. *J Plant Interact*. Vol. 12 (1) : 100-107.

Epstein E., 1994. The anomaly of silicon in plant biology. *Proc Natl Acad Sci USA*. Vol. 91 (1): 11-17.

Evelin, H., Devi, T. S., Gupta, S., & Kapoor, R. (2019). Mitigation of salinity stress in plants by arbuscular mycorrhizal symbiosis : current understanding and new challenges. Frontiers in Plant Science, 10, 470.

Farooq, M., Rehman, A., Al-Alawi, A. K., Al-Busaidi, W. M., & Lee, D. J. (2020). Integrated use of seed priming and biochar improves salt tolerance in cowpea. *Scientia Horticulturae*, 272, 109507.

Gong H. J., Chen K. M., Chen G. C., Wang S. M. et Zhang C. L., 2003. Effects of silicon on growth of wheat under drought. *J Plant Nutr*. Vol. 26 (5): 1055-1063.

Goupy J. et Creighton L., 2006. Introduction to Experiments Plans. Dunod, Paris.

Hajlaoui H., Maatallah S., Nasri N. et Nasr H., 2016. Germination capacity of some halophytic plants species under increasing salinity. *Afr J Agric Res*. Vol. 11 (43) : 4333-4342.

Hichem, H., Samira, M., & Mounir, D. (2015). Effet du stress salin sur l'efficience d'utilisation d'azote et les bilans ioniques chez deux variétés de maïs (*Zea mays* L.) fourragères. *Journal of Animal &Plant Sciences*, 24 (3), 3787-3801.

INRF station d'Alger (Document interne), 2015. Cadre physique et biotique de la forêt de Bainem.

Jakab G., Ton J., Flors V., Zimmerli L., Métraux J. P. et MauchMani B., 2005. Enhancing *Arabidopsis* salt and drought stress tolerance by chemical priming for its abscisic acid responses. *Plant Physiol*. Vol. 139 (1) : 267-274.

Jeffery S., Verheijen F. G., van der Velde M. et Bastos A. C., 2011. A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis. *Agric Ecosyst Environ*. Vol. 144 (1) : 175-187.

Kamara A., Kamara H. S. et Kamara M. S., 2015. Effect of rice straw biochar on soil quality and the early growth and biomass yield of two rice varieties. *Agric Sci*. Vol. 6 (08) : 798.

Khan Z., Zhang K., Khan M. N., Zhu K. et Hu L., 2024. Effects of biochar persistence on soil physiochemical properties, enzymatic activities, nutrient utilization, and crop yield in a three-year rice-rapeseed crop rotation. *Eur J Agron*. Vol. 154 : 127096.

Kiprotich J. et Mwangi A., 2025. Utilization of Silicate and Various Cultivation Methods to Mitigate Salt Stress Impact on Bean Plants. *J Agric Sci*. Vol. 2 (3): 406-412.

Laird D. A., Fleming P., Wang B., Horton R. et Karlen D. L., 2010. Biochar impact on nutrient leaching from a Midwestern agricultural soil. *Geoderma*. Vol. 158 (3-4) : 436-442.

Lapeyronie A., 1982. Les productions fourragères méditerranéennes. Techniques agricoles et productions méditerranéennes. G. P. Maisonneuve & Larose, Paris, 425 p.

Lehmann J. et Joseph S. (Eds.), 2024. Biochar for environmental management : science, technology and implementation. Taylor & Francis.

Liang Y., Sun W., Zhu Y. G. et Christie P., 2007. Mechanisms of silicon-mediated alleviation of abiotic stresses in higher plants : a review. *Environ Pollut*. Vol. 147 (2) : 422-428.

Ma J. F., 2004. Role of silicon in enhancing the resistance of plants to biotic and abiotic stresses. *Soil Sci Plant Nutr*. Vol. 50 (1): 11-18.

Muneer S. et Jeong B. R., 2015. Proteomic Analysis of SaltStress Responsive Proteins in Roots of Tomato (*Lycopersicon esculentum* L.) Plants towards Silicon Efficiency. *Plant Growth Regul*. Vol. 77 : 133-146.

Nadeem, M., Li, J., Yahya, M., Wang, M., Ali, A., Cheng, A., ... & Ma, C. (2019). Grain legumes and fear of salt stress: Focus on mechanisms and

management strategies. *International Journal of Molecular Sciences*, 20 (4), 799.

Nedjimi B., Mohammedi N. et Belkeiri S., 2014. Germination Responses of Medic Tree (*Medicago arborea*) Seeds to Salinity and Temperature. *J Agric Res*. Vol. 3 (4) : 308-312.

Nurbekova Z., Satkanov M., Beisekova M., Akbassova A., Ualiyeva R., Cui J., Chen Y., Wang Z. et Zhangazin S., 2024. Strategies for Achieving High and Sustainable Plant Productivity in Saline Soil Conditions. *Horticulturae*. Vol. 10 : 878.

Rahaman, S., Ali, M. S., Mohammad, N., Rahman, M. E., Rahman, M. T., Nahid, S. F. T. Z. A., ... & Ahmed, R. (2023). Effect of biochar on growth and yield of yard long bean (*Vigna unguiculata*) under salinity stress. *Journal of Agroforestry and Environment*, 16 (2), 63-68.

Rahman A., Nahar K., Hasanuzzaman M. et Fujita M., 2016. Calcium supplementation improves Na+/K+ ratio, antioxidant defense and glyoxalase systems in salt-stressed rice seedlings. *Front Plant Sci*. Vol. 7 : 609.

Souri Z., Khanna K., Karimi N. et Ahmad P., 2021. Silicon and plants : current knowledge and futurs prospects. *J Plant Growth Regul*. Vol. 40 : 906-925.

Spokas K. A., 2010. Review of the stability of biochar in soils: predictability of O:C molar ratios. *Carbon Manag*. Vol. 1 (2) : 289-303.

Szabados L. et Savoure A., 2010. Proline : a multifunctional amino acid. *Trends Plant Sci*. Vol. 15 (2): 89-97.

Tarek H., 2022. Note sur le *Medicago arborea* sous stress salin. *Ann Rech For Algérie*. Vol. 12 (01) : 26-31.

Teggar N., Gharabi D., Hassani A. et Sahari M., 2024. Physiological and biochemical adaptation of *Medicago sativa* to salt stress. *Int J Environ Stud*. Vol. 81 (5): 2323-2333.

Tuna A. L., Kaya C., Ashraf M., Altunlu H., Yokas I. et Yagmur B., 2007. The effects of calcium sulphate on growth, membrane stability and nutrient uptake of tomato plants grown under salt stress. *Environ Exp Bot*. Vol. 59 (2) : 173-178.

Valdenegro M., Barea J. M. et Azcón R., 2001. Influence of arbuscular-mycorrhizal fungi, *Rhizobium meliloti* strains and PGPR inoculation on the growth of *Medicago arborea* used as model legume for re-vegetation and biological reactivation in a semi-arid

mediterranean area. *Plant Growth Regul*. Vol. 34 : 233-240.

Wang Y., Xiao X., Zhang K. et Chen B., 2019. Effects of biochar amendment on the soil silicon cycle in a soil-rice ecosystem. *Environ Pollut*. Vol. 248 : 823-833.

Zhu Y. et Gong H., 2014. Beneficial effects of silicon on salt and drought tolerance in plants. *Agron Sustain Dev*. Vol. 34 (2) : 455-472.

Zhu Y. X., Gong H. J. et Yin J. L., 2019. Role of silicon in mediating salt tolerance in plants : a review. *Plants*. Vol. 8 (6) : 147.