

L'ATTÉNUATION DU STRESS SALIN PAR L'EXTRAIT DE VERMICOMPOST CHEZ *SOLANUM LYCOPERSICUM* L. EN MOBILISANT LES MÉCANISMES DE TOLÉRANCE AU SEL

BENAZZOUK Salima^{1,2*}, LUTTS Stanley² et DJAZOULI Zahr Eddine¹

1. Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie, Université de Blida 1. B.P. 270, route de Soumaa; Ouled yaich Blida, Algérie

2. Groupe de Recherche en Physiologie végétale, Earth and Life Institute-Agronomy (ELIA), Université catholique de Louvain, 5 (Bte 7.07.13) Place Croix du Sud, 1348 Louvain-la-Neuve ; Belgique.

Reçu le 12/08/2018, Révisé le 26/11/2018, Accepté le 30/11/2018

Résumé

Description du sujet : La salinité est une grande menace pour l'agriculture et l'environnement. Elle compromet gravement la croissance et le rendement de la tomate. L'utilisation de fertilisants organiques tels que le vermicompost constitue une alternative intéressante à la sélection de variétés résistantes.

Objectifs : Le but de notre étude est d'évaluer l'impact de l'application de l'extrait de vermicompost sur la croissance, la teneur en eau, les teneurs en Na et K ainsi que l'accumulation des solutés solubles (proline et sucres totaux) chez la tomate (cv. Ailsa Craig) exposée au stress salin.

Méthodes : En conditions hydroponiques, les plantules de tomate sont exposées pendant 7 jours à la toxicité saline (150 mM NaCl) en présence ou en absence de vermicompost (6ml/l).

Résultats : La salinité réduit la croissance (particulièrement la biomasse foliaire) ainsi que les teneurs en eau et le potentiel osmotique. Le stress salin induit une accumulation de Na au niveau racinaire, une réduction du K et une accumulation de proline et de sucres totaux. L'ajout de vermicompost dans la solution nutritive (6ml/l) permet d'atténuer les effets néfastes du NaCl. Le vermicompost en présence du sel améliore la croissance foliaire de la plante et augmente la teneur en eau des feuilles. En outre, il accentue la réduction du potentiel osmotique au niveau racinaire, réduit très faiblement la teneur en Na des feuilles, augmente les teneurs en Na et K des racines et favorise l'accumulation de la proline et des sucres totaux.

Conclusion : Le vermicompost est un amendement organique qui pourrait être utilisé pour améliorer la croissance de la tomate en conditions de stress salin.

Mots clés : la croissance. Proline. Stress salin. Sucres solubles. Tomate. Vermicompost

ALLEVIATION OF SALINITY STRESS BY VERMICOMPOST EXTRACT IN *SOLANUM LYCOPERSICUM* L. BY MOBILIZING SALT TOLERANCE MECHANISMS.

Abstract

Description of the subject: Salinity is a big threat to agriculture and the environment. It seriously compromises tomato growth and yield. The use of the organic fertilizers such as Vermicompost is an interesting alternative to the selection of resistant varieties.

Objective: The aim of our study is to evaluate the impact of the application of Vermicompost extract on the growth, the water content, the Na and K contents as well as the accumulation of soluble solutes (proline and total sugars) in the tomato (Cv Ailsa Craig) exposed to salt stress.

Methods: Under hydroponic conditions, the young tomato seedlings are exposed for 7 days to saline toxicity (150 mM NaCl) in the presence or absence of Vermicompost (6ml/l).

Results: Salinity reduces the growth (especially leaf biomass) as well as water content and osmotic potential. Salt stress induces root-level Na accumulation, K reduction, and proline and total sugars accumulation. The Vermicompost (6ml/l) alleviate the harmful effects of NaCl. In salt condition, Vermicompost improves the foliar growth of the plant and increases the water content of the leaves. In addition, it reduces the osmotic potential at the root level, the Na content of the leaves, increases the Na and K contents of the roots and promotes the accumulation of proline and total sugars.

Conclusion: Vermicompost is an organic amendment that could be used to improve tomato growth under salt stress conditions.

Keywords: Growth. Proline. Salt stress. Soluble sugars. Tomato. Vermicompost.

* Auteur correspondant: BENAZZOUK Salima, E-mail: benazzouksalima@yahoo.fr

INTRODUCTION

La tomate *Solanum lycopersicum* est l'un des fruits les plus consommés au monde et occupe une place importante dans l'alimentation humaine [1]. Cette espèce est souvent exposée à de multiples contraintes de l'environnement. La salinité est l'un des principaux facteurs qui affectent la croissance de la plante et le rendement en fruit dans de nombreuses régions du globe [1]. Le problème se pose avec une acuité particulière dans les régions Méditerranéennes où la limitation des ressources en eau de bonne qualité pour l'irrigation associée à une évapotranspiration importante peut être à l'origine de la salinisation progressive des sols.

La salinité est un stress complexe qui affecte tous les stades de vie de la plante depuis la germination jusqu'à la maturation des fruits. Une plante exposée au stress salin présente, à des degrés divers, une perturbation de l'ensemble de sa physiologie et est affectée au niveau de sa nutrition minérale, de la régulation de son statut hydrique, de la gestion de stress oxydatifs secondaires, de son statut hormonal et de son activité photosynthétique [2]. La complexité du stress salin résulte également du fait qu'il induit une double contrainte : une contrainte hydrique liée à une réduction du potentiel osmotique de la solution du sol qui compromet l'alimentation en eau [3] et une contrainte minérale qui induit une accumulation d'ions potentiellement toxiques (Na^+ et Cl^- en excès) et une réduction des teneurs en éléments essentiels comme le K^+ . Un ajustement osmotique efficace, basé sur l'accumulation de solutés organiques compatibles comme la proline ou les sucres, et le maintien d'une bonne sélectivité K^+/Na^+ sont des propriétés importantes qui contribuent à la résistance à la salinité chez la tomate comme chez de nombreuses espèces cultivées [4].

La sélection de nouvelles variétés de tomates plus résistantes au stress salin constitue une priorité. Elle implique une démarche complexe de génétique quantitative associée à une approche QTL et ayant recours, le cas échéant, à des croisements interspécifiques avec des espèces sauvages apparentées présentant des propriétés halophytes [2].

L'obtention de porte-greffe mieux adaptés à une culture sur sol salin peut également constituer une alternative intéressante pour assurer le maintien de la production chez des plantes exposées au NaCl [5]. Ces stratégies à long terme peuvent cependant être utilement complétées par l'adoption de mesures phytotechniques simples et peu coûteuses, directement accessibles aux agriculteurs.

L'adoption d'une stratégie de fertilisation adaptée peut ainsi fournir d'intéressants résultats au niveau de la nutrition minérale de la plante confrontée à la contrainte saline [4, 6]. Une application exogène de produits à action biostimulante est également envisagée [7]. Les effets positifs de ces substances sont souvent dus à des composés hormonaux ou à des molécules à action antioxydante dont le prix est élevé [8]. Par rapport à des produits de synthèse, souvent coûteux et peu respectueux de l'environnement, l'utilisation de vermicompost constitue une alternative particulièrement intéressante.

Le vermicompost est un produit organique issu de la digestion de matières organiques par des vers de terre [9]. Le vermicompost est un produit naturel utilisé comme un amendement alternatif du sol : il contribue à maintenir ou à restaurer une bonne porosité du substrat et favorise la croissance racinaire. Le vermicompost renferme des nutriments facilement assimilés par la plante tel que les nitrates, le phosphore, le potassium, le calcium et le magnésium [10] et peut être utilisé sous forme de fertilisant liquide [10, 11]. Le vermicompost est également riche en acides humiques, en polyphénols et en flavonoïdes susceptibles d'aider la plante à assurer une meilleure gestion des stress oxydatifs induits par des contraintes de l'environnement [12].

L'application foliaire du jus de vermicompost a un effet positif sur la croissance et le rendement de la tomate [10, 13]. Certaines études recommandent par ailleurs son utilisation pour améliorer la résistance aux nématodes [14] ou au stress thermique [15]. Les données relatives à l'utilisation du vermicompost en conditions de stress salin demeurent par contre fragmentaires [16] et ses impacts sur l'alimentation minérale et l'ajustement osmotique conditionnant la résistance de la plante ne sont pas élucidés.

La présente étude se fixe pour objectif d'identifier et de quantifier les effets du vermicompost sur les teneurs en Na^+ , en K^+ , en proline et en sucres solubles totaux en relation avec l'ajustement osmotique d'une variété de tomate (Ailsa Craig) soumise à la toxicité saline en conditions de culture hydroponique.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

1.1. Conduite du stress et application des traitements

Les graines de tomate (*Solanum lycopersicum* (cv. Ailsa Craig)) sont mises en germination en serre dans du terreau durant 15 jours. Les plantules obtenues sont alors transférées dans une chambre de croissance sous une humidité relative de 70% pendant le jour et 90% la nuit, une température de l'ordre de 25°C le jour et 20°C la nuit et un éclairage quotidien de 16 h avec une intensité lumineuse de $150 \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$. Les plantes sont acclimatées en solution nutritive dans des bacs contenant 2L de solution nutritive Hoagland (en mM : KNO_3 3 mM, $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 1, KH_2PO_4 2, MgSO_4 ; en μM : 0,5, Fe-EDTA 32,9 μM , H_3BO_4 30 μM , MnSO_4 5 μM , CuSO_4 1 μM , ZnSO_4 1 μM (NH_4) $6\text{Mo}7\text{O}$ 1. Après 7 jours d'acclimatation en l'absence de traitement, 6mL/L de vermicompost, seul ou en combinaison avec 150 mM de NaCl sont appliqués de façon à définir 4 traitements : contrôle (sans sel ni vermicompost), NaCl 150 mM, vermicompost et NaCl 150 mM + vermicompost. Un mélange de résidus végétaux (déchets ménagers) est utilisé pour la préparation du vermicompost, ces résidus sont mélangés aux vers de terre anécique *Eisenia foetida* dans le composteur à raison de 200g de lombric /Kg de déchets ménagers. Le composteur, est un système de trois casiers superposé, le casier supérieur contient le mélange déchets organiques ménagers et vers de terre. Le vermicompostage se fait à l'obscurité, à une température de 25°C et le processus dure 2 mois. À la fin de la transformation, on récupère dans le casier du milieu, les moulages de vers de terre (vermicompost), issus de la dégradation par digestion des vers de terre. Dans le casier basal, on recueille le jus de vermicompost qui est issu de l'égouttage du vermicompost. Chaque bac contient 6 plantes, et chaque traitement implique 4 bacs distincts.

La solution nutritive est ré-ajustée tous les deux jours et les bacs sont aléatoirement redistribués dans la chambre de culture à cette occasion.

Après 7 jours de traitement, les plantes sont récoltées. Les racines sont brièvement rincées dans de l'eau déminéralisée à froid durant 30 secondes et séchées en surface. Les racines et les parties aériennes sont ensuite séparées et pesées afin d'en déterminer le poids frais. Pour chaque traitement, 4 plantes sont mises à l'étuve à une température de 70°C durant 48h en vue de la détermination du poids sec. Après estimation des teneurs en eau, 50 mg de MS sont minéralisées à chaud dans 4 mL d'acide nitrique 35%. Le résidu est re-solubilisé dans de l'eau régale (10 mL) puis filtré. Les teneurs en Na^+ et en K^+ sont ensuite estimées par mesure au spectromètre d'absorption atomique (Thermo Scientific Series S) et les teneurs en ces éléments minéraux sont exprimées sur base de la matière sèche.

Pour la mesure du potentiel osmotique, les échantillons préalablement congelés sont découpés en fragments et placés dans des tubes Eppendorff percés à leur base de 4 orifices. Ces tubes sont eux-mêmes insérés dans des tubes intacts. L'ensemble est soumis à 3 cycles de congélation/décongélation afin d'assurer la rupture des membranes. Les tubes sont ensuite centrifugés à 15 000 g à une température de 4°C. L'osmolarité du suc tissulaire recueilli est estimée par tonométrie à l'aide d'un osmomètre Wescor 5500 et convertie en potentiel osmotique par application de la loi de Van t'Hoff.

Pour l'estimation des teneurs en proline, les échantillons sont finement broyés à froid à l'aide d'un mortier : l'extraction est réalisée dans une solution 1% d'acide salicylique. Après centrifugation (8000 g, 4 °C), les teneurs en proline sont estimées par la méthode de la ninhydrine acide 1% dans 60% d'acide acétique (v/v) et extraction par le toluène [17]. L'absorbance est lue au spectrophotomètre (Beckmann) à une longueur d'onde de 520 nm. Les teneurs, estimées au départ d'une courbe étalon de L-proline (Sigma-Chemical) sont exprimées par unité de matière fraîche.

Les sucres solubles sont extraits après avoir broyé 0.25 g de matière congelée dans 7 ml d'éthanol 80% et incubation durant 10 minutes. La mesure des teneurs en sucres solubles totaux se fait après coloration à l'antrone et lecture de l'absorbance à 625 nm.

1.2. Analyses statistiques

Nous avons utilisé le modèle général linéaire (G.L.M.) dans le but d'appréhender l'effet strict des facteurs (traitements et compartiment) sur la phytochimie de la tomate. La signification des comparaisons des moyennes a été confirmée par un test de comparaison par paire (Test Tukey). Les contributions significatives retenues sont au seuil d'une probabilité de 5%, les calculs ont été déroulés par le logiciel XLSTAT vers. 9.

RÉSULTATS

Le vermicompost appliqué en l'absence de sel réduit faiblement et de façon non-significative le poids frais des parties aériennes et des racines (Test One-way Anova, $F=1,67$; $p=0,076$, $p>5\%$) (Fig. 1).

Le sel a un effet délétère très important et hautement significatif sur la production de biomasse. Cet effet est plus marqué au niveau des parties aériennes que des racines (Test One-way Anova, $F=33,82$; $p=0,003$, $p<5\%$) : le rapport Parties aériennes/racines est en effet de 2.1 pour les plantes contrôle et de 1.2 pour les plantes exposées à la salinité. La présence de vermicompost permet cependant d'atténuer les effets négatifs de la salinité sur la croissance des plantes. L'effet bénéfique du vermicompost est plus important au niveau des feuilles qu'au niveau des racines.

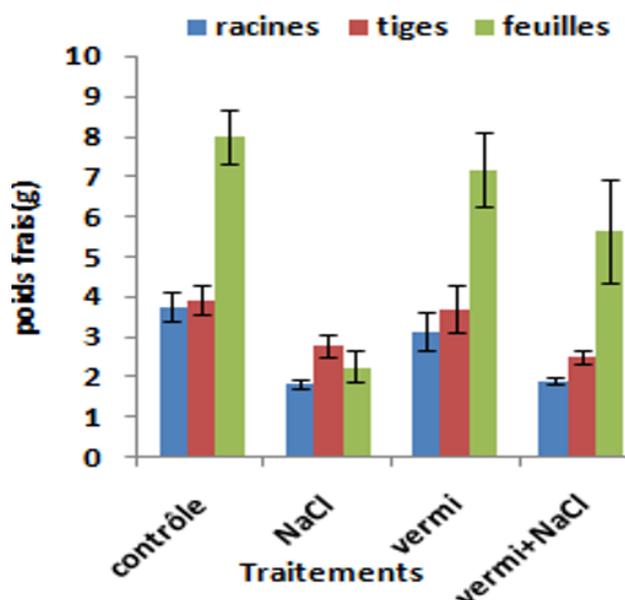


Figure 1 : Effet du vermicompost (6ml/l) sur le poids frais des feuilles et des racines de tomate exposée à 150mM de NaCl. Les résultats sont présentés sous forme de moyennes \pm les erreurs standards

Les teneurs en eau diminuent de façon significative chez les plantes exposées à la salinité, tant au niveau des racines que des parties aériennes (Tableau 1). L'addition de vermicompost à des plantes exposées à la salinité augmente les teneurs en eau foliaire comparativement à des plantes exposées à la salinité en l'absence de vermicompost.

L'addition de vermicompost en l'absence de sel n'a pas d'effet sur le potentiel osmotique des plantes cultivées (Tableau 2). Le sel induit une réduction brutale de Ψ_s qui diminue de 66% au niveau des racines et de 42% au niveau des feuilles. La présence de vermicompost accentue la réduction de Ψ_s au niveau des racines (83%) et, dans une moindre mesure, au niveau des feuilles (49%).

Tableau 1 : Effet du vermicompost (6ml/l) sur la teneur en eau des racines et des feuilles de tomate exposée à 150Mm de NaCl. Les résultats sont présentés sous forme de moyennes \pm les erreurs standards

Traitements	WC(%) racines	WC(%) feuilles
Contrôle	93,20 \pm 0,45 a	91,28 \pm 0,60 a
NaCl	91,57 \pm 0,41 c	88,30 \pm 0,74 c
VC	92,05 \pm 0,70 ab	90,88 \pm 0,60 b
VC+NaCl		91,98 \pm 0,25 b
		90,80 \pm 0,50 b
<i>f</i>		55,94
<i>p</i>		0,005**
		92,17
		0,001**

Tableau 2 : Effet du vermicompost (6ml/l) sur le potentiel osmotique des racines et des feuilles de tomate exposée à 150Mm de NaCl. Les résultats sont présentés sous forme de moyennes \pm les erreurs standards

Traitements	ψ_s (Mpa) racines	ψ_s (Mpa) feuilles
Contrôle	-0,448 \pm 0,013a	-0,690 \pm 0,019a
NaCl	-0,740 \pm 0,020b	-0,990 \pm 0,029b
VC	-0,459 \pm 0,029a	-0,666 \pm 0,014a
VC +NaCl	-0,823 \pm 0,024c	-1,039 \pm 0,025c
<i>f</i>	101,66	72,84
<i>p</i>	0,032*	0,042**

Les teneurs en Na augmentent de façon importante chez les plantes exposées à la salinité (Test One-way Anova, $F=93,06$; $p=0,028$, $p<5\%$) (Fig. 2A). Ces teneurs sont plus importantes au niveau des racines qu'au niveau des parties aériennes. La présence de vermicompost dans la solution nutritive de plantes exposées au sel ne réduit que très faiblement les teneurs en Na des parties aériennes mais augmente par contre de façon significative (27%) les teneurs en Na au niveau des racines.

Les plantes cultivées en présence de vermicompost et en l'absence de NaCl présentent les mêmes teneurs en K que les plantes témoins (Fig. 2B).

Le sel induit une réduction des teneurs en K : le rapport K/Na passe de 49,5 au niveau des feuilles de plantes témoins à 1,76 au niveau des feuilles de plantes exposées au NaCl (Test One-way Anova, $F=2,11$; $p=0,057$, $p>5\%$). Au niveau des racines, ce même rapport passe 13,08 à 0,95. La présence de vermicompost n'augmente pas de façon significative les teneurs en K des feuilles mais augmente cependant de 39% les teneurs en K au niveau des racines. Il importe en outre de souligner qu'au niveau des racines, les teneurs en K des plantes exposées au vermicompost+NaCl (0,822 mmol g⁻¹ MS) sont plus élevées que les teneurs en K des plantes exposées au vermicompost en l'absence de sel (0,673) mmol g⁻¹ MS).

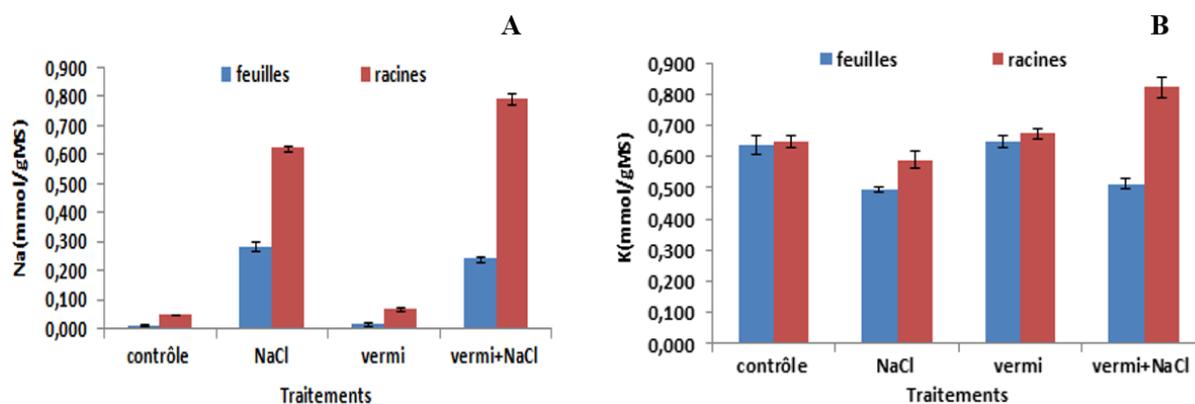


Figure 2 : effet du vermicompost (6ml /l) sur la teneur en Na (A) et K (B) des feuilles et racines de tomate exposée à 150mM de NaCl. Les résultats sont présentés sous forme de moyennes \pm les erreurs standards

Il n'y a pas de différences significatives entre les teneurs en proline des plantes cultivées en conditions contrôles et les plantes cultivées en présence de vermicompost (Test One-way Anova, $F=4,77$; $p=0,089$, $p>5\%$) (Fig. 3A). Les teneurs en proline sont toujours plus élevées au niveau des feuilles qu'au niveau des racines. L'addition de NaCl induit une accumulation importante de proline de 830% au niveau des racines et de 450% au niveau des feuilles. Les teneurs en, proline demeurent plus élevées au niveau des parties aériennes.

L'exposition de plantes traitées au NaCl à du vermicompost augmente de 25% les taux d'accumulation de proline au sein des feuilles. En l'absence de NaCl, les teneurs en sucres sont plus importantes chez les racines de plantes exposées à du vermicompost que chez celle plantes témoins alors qu'il n'y a pas de différences significatives pour les teneurs en sucres des feuilles (Fig. 3B). La salinité induit une augmentation des teneurs en sucres solubles dans tous les organes. Le vermicompost accentue cette accumulation de façon significative au niveau du système racinaire.

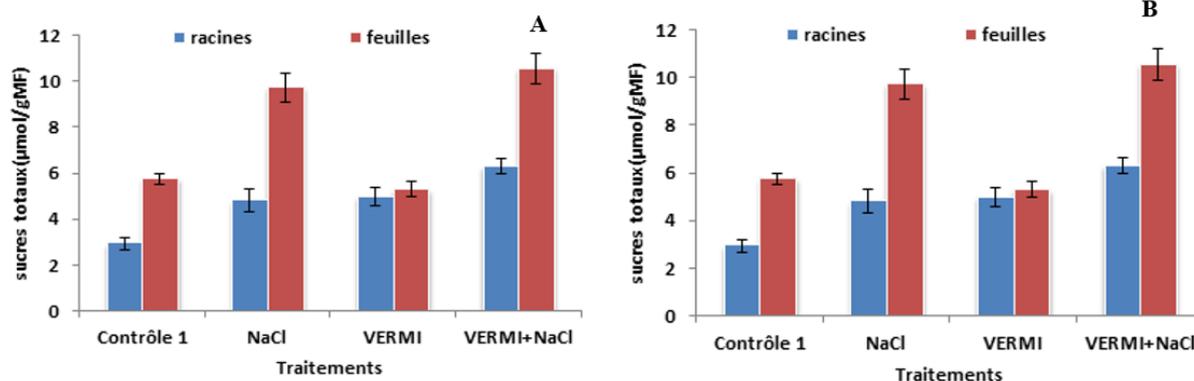


Figure 3 : Effet du vermicompost (6ml/l) sur la teneur en proline (A) et en sucres totaux (B) de tomate exposée à 150mM de NaCl. Les résultats sont présentés sous forme de moyennes \pm les erreurs standards

DISCUSSION

La présente étude montre que l'application de vermicompost permet d'augmenter la résistance de la tomate à la salinité. En effet, les plantes exposées au sel en présence de vermicompost présentent une meilleure croissance que les plantes exposées au NaCl en l'absence d'amendement organique.

Les effets positifs des amendements organiques comme le vermicompost sur la croissance des plantes ont été rapportés chez de nombreuses espèces [18-21]. Les effets bénéfiques de ces composés sont souvent attribués à la présence de substances humiques [22]. A côté de la présence d'humines, d'acides humiques et d'acides fulviques, des substances aux activités biologiques de nature hormonale sont parfois mentionnées [23, 24]. Les substances issues de la transformation par les lombrics de résidus végétaux peuvent également impliquer des sucres, des polyphénols, des composés aminés et de la quinone [25].

Nos résultats suggèrent toutefois que l'application de vermicompost en l'absence de sel n'a pas d'effets positifs majeurs sur la croissance de la plante. Ceci tranche avec les résultats d'autres études qui montrent un effet bénéfique sur la croissance générale des plantes [26]. Il importe cependant de souligner que dans le cadre de notre démarche expérimentale, les plantes cultivées en l'absence de NaCl sont placées dans des conditions nutritives optimales : la solution nutritive contient des concentrations largement suffisantes d'éléments minéraux et il est probable que l'addition de vermicompost ne se marque pas par une amélioration notable. Pour des plantes cultivées en sols, par contre, la biodisponibilité en certains éléments peut s'avérer limitée et l'apport de vermicompost aide alors à la mobilisation de formes rapidement assimilables d'éléments minéraux importants pour le métabolisme de la plante [18, 27].

En présence de stress, par contre, le vermicompost a indéniablement un effet positif. Des observations comparables ont été rapportées chez des plantes exposées aux métaux lourds [21] et au stress hydrique [28]. Chinsamy *et al.* [16], ont récemment rapporté qu'un dérivé liquide de vermicompost contribuait à améliorer la croissance de la tomate exposée à la salinité. Notre étude suggère que cette stimulation de croissance se marque de façon plus importante au niveau des parties aériennes que des parties racinaires. Cette observation peut être surprenante dans la mesure où l'action potentiellement hormonale des substances humiques est attribué à un effet de type auxinique conduisant à une stimulation de la rhizogénèse [25]. Certaines études rendent compte d'une stimulation, par le vermicompost, de l'élongation racinaire mais aussi de la formation de racines latérales [29, 30]. Si l'architecture du système racinaire n'a pas été prise en considération ici, le poids sec des racines de plantes traitées au NaCl+vermicompost n'est pas plus élevé que celui de plantes exposées au NaCl seul. Notons cependant que les effets de la salinité sur la morphologie de la plante se marque par une forte réduction du rapport PS parties aériennes/PS racines : une augmentation préférentielle par le vermicompost de la croissance des parties aériennes ne ferait donc que résulter du rétablissement d'une homéostasie hormonale normale.

La présence de vermicompost dans la solution nutritive permet également de rétablir un rapport K/Na compatible avec les fonctions physiologiques de la plante. La salinité se marque en effet à la fois par une augmentation des teneurs en Na et par une réduction des teneurs en K [4]. Les mécanismes de résistance au stress salin se marquent par une amélioration de la sélectivité des transporteurs membranaires impliqués dans l'absorption de cations monovalents [6]. Nous observons cependant que la présence de vermicompost conduit à une augmentation de la teneur racinaire en Na⁺ chez les plantes exposées au sel. Ce résultat, à priori inattendu, pourrait s'expliquer par la présence éventuelle de Na⁺ dans le vermicompost mais cette hypothèse ne peut être retenue puisque les plantes exposées au vermicompost en l'absence de sel ne voient pas leur teneur racinaire en Na⁺ augmenter.

Une autre hypothèse serait liée au fait que les teneurs foliaires en Na⁺ diminuent et que l'accumulation racinaire de Na⁺ résulterait d'une inhibition de sa translocation vers les parties aériennes. Nous noterons néanmoins que l'accumulation racinaire de Na⁺ est quantitativement plus importante que la réduction foliaire en cet élément. Il semblerait donc que de façon inattendue, le vermicompost stimule l'absorption de Na⁺, ce qui pourrait être lié à des processus de chélation impliquant une liaison entre cet élément et les acides humiques fragmentés par les acides organiques résultant de sécrétions racinaires [31]. Il importe de souligner que cette augmentation des teneurs en Na⁺ au sein des racines n'implique pas d'inhibition supplémentaire de croissance, soulignant une fois encore que le vermicompost agit favorablement sur les mécanismes de tolérance au sel. Chez le maïs, une stimulation par le vermicompost des activités H⁺-ATPase a été démontrée [29] alors que l'implication dans les mécanismes de résistance au sel de ces ATPases membranaires pouvant contribuer à la séquestration vacuolaire d'ions toxiques est à ce jour bien établie.

Outre son impact sur l'alimentation en Na⁺, l'effet bénéfique du vermicompost résulte également de son effet favorable sur l'alimentation en K⁺ : cet effet est très marqué sur les racines des plantes exposées au NaCl. Les teneurs racinaires en K⁺ des plantes exposées au NaCl+vermicompost sont en effet plus élevées que les teneurs en K⁺ des plantes témoins.

La réduction de la disponibilité en eau est une autre composante importante du stress salin. Notre étude montre que le vermicompost agit favorablement sur les teneurs en eau des feuilles de plantes exposées au NaCl. Cette augmentation des teneurs en eau n'est pas liée à un ajustement osmotique plus efficace puisque les valeurs de Ψ_s des feuilles ne varient pas entre les traitements NaCl et NaCl+vermicompost. Un meilleur équilibre hydrique pourrait être associé à une réduction des pertes transpiratoires liée, par exemple, à une fermeture plus efficace des stomates. La conductance stomatique n'a pas été prise en considération dans la présente étude : la présence d'acide abscissique impliqué dans la fermeture des stomates au sein d'amendements organiques a déjà été rapportée [27].

Le vermicompost stimule également la production de proline et de sucres solubles chez les plantes exposées au NaCl. À côté de fonctions osmotiques, ces composés organiques compatibles peuvent également assurer la protection des structures cellulaires et agir comme agent antioxydant visant à limiter l'impact des composés d'oxygène actifs produits en situation de stress [4].

CONCLUSION

Des études complémentaires sont requises pour identifier les bases physiologiques de l'impact du vermicompost sur la croissance de la tomate exposée à la salinité mais cet amendement apparaît comme un outil prometteur pour augmenter la production de tomates sur des substrats où le stress salin représente un frein pour la production.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1]. Manaa, A., et al., *Simultaneous application of salicylic acid and calcium improves salt tolerance in two contrasting tomato (Solanum lycopersicum) cultivars*. South African Journal of Botany, 2014. **95**: p. 32-39.
- [2]. Shabala, S., *Learning from halophytes: physiological basis and strategies to improve abiotic stress tolerance in crops*. Annals of botany, 2013. **112**(7): p. 1209-1221.
- [3]. Munns, R., *Comparative physiology of salt and water stress*. Plant, cell & environment, 2002. **25**(2): p. 239-250.
- [4]. Munns, R. and M. Tester, *Mechanisms of salinity tolerance*. Annu. Rev. Plant Biol., 2008. **59**: p. 651-681.
- [5]. Albacete, A., et al., *Rootstock-mediated changes in xylem ionic and hormonal status are correlated with delayed leaf senescence, and increased leaf area and crop productivity in salinized tomato*. Plant, cell & environment, 2009. **32**(7): p. 928-938.
- [6]. Flowers, T., *Improving crop salt tolerance*. Journal of Experimental Botany, 2004. **55**(396): p. 307-319.
- [7]. Duan, J., et al., *Exogenous spermidine affects polyamine metabolism in salinity-stressed Cucumis sativus roots and enhances short-term salinity tolerance*. Journal of plant physiology, 2008. **165**(15): p. 1620-1635.
- [8]. Borsani, O., V. Valpuesta, and M.A. Botella, *Evidence for a role of salicylic acid in the oxidative damage generated by NaCl and osmotic stress in Arabidopsis seedlings*. Plant physiology, 2001. **126**(3): p. 1024-1030.
- [9]. Chaoui, H.I., L.M. Zibilske, and T. Ohno, *Effects of earthworm casts and compost on soil microbial activity and plant nutrient availability*. Soil Biology and Biochemistry, 2003. **35**(2): p. 295-302.
- [10]. Tejada, M., et al., *Agricultural use of leachates obtained from two different vermicomposting processes*. Bioresource Technology, 2008. **99**(14): p. 6228-6232.
- [11]. Gutiérrez-Miceli, F.A., et al., *Formulation of a liquid fertilizer for sorghum (Sorghum bicolor (L.) Moench) using vermicompost leachate*. Bioresource Technology, 2008. **99**(14): p. 6174-6180.
- [12]. García, A.C., et al., *Vermicompost humic acids as an ecological pathway to protect rice plant against oxidative stress*. Ecological Engineering, 2012. **47**: p. 203-208.
- [13]. Alam, M. *Effect of compost and vermicompost use on the yield of tomato and their economics*. in *I International Symposium on Organic Matter Management and Compost Use in Horticulture 1018*. 2011.
- [14]. Xiao, Z., et al., *Vermicompost increases defense against root-knot nematode (Meloidogyne incognita) in tomato plants*. Applied soil ecology, 2016. **105**: p. 177-186.
- [15]. Chinsamy, M., M.G. Kulkarni, and J. Van Staden, *Vermicompost leachate reduces temperature and water stress effects in tomato seedlings*. HortScience, 2014. **49**(9): p. 1183-1187.
- [16]. Chinsamy, M., M.G. Kulkarni, and J. Van Staden, *Garden-waste-vermicompost leachate alleviates salinity stress in tomato seedlings by mobilizing salt tolerance mechanisms*. Plant growth regulation, 2013. **71**(1): p. 41-47.
- [17]. Bates, L.S., R.P. Waldren, and I. Teare, *Rapid determination of free proline for water-stress studies*. Plant and soil, 1973. **39**(1): p. 205-207.
- [18]. Aguiar, N.O., et al., *Bioactivity of humic acids isolated from vermicomposts at different maturation stages*. Plant and soil, 2013. **362**(1-2): p. 161-174.
- [19]. Hernandez, O.L., et al., *Humic substances from vermicompost enhance urban lettuce production*. Agronomy for sustainable development, 2015. **35**(1): p. 225-232.
- [20]. Martinez-Balmori, D., et al., *Molecular characteristics of humic acids isolated from vermicomposts and their relationship to bioactivity*. Journal of agricultural and food chemistry, 2014. **62**(47): p. 11412-11419.
- [21]. Wiszniewska, A., et al., *Natural organic amendments for improved phytoremediation of polluted soils: a review of recent progress*. Pedosphere, 2016. **26**(1): p. 1-12.

- [22]. Tahiri, A., et al., *Propriétés physico-chimiques et biologiques des substances humiques en relation avec le développement végétal (synthèse bibliographique)*. Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement, 2014. **18**(3): p. 436-445.
- [23]. Pizzeghello, D., et al., *Isopentenyladenosine and cytokinin-like activity of different humic substances*. Journal of Geochemical Exploration, 2013. **129**: p. 70-75.
- [24]. Young, C. and L. Chen, *Polyamines in humic acid and their effect on radical growth of lettuce seedlings*. Plant and soil, 1997. **195**(1): p. 143-149.
- [25]. Canellas, L., et al., *Probing the hormonal activity of fractionated molecular humic components in tomato auxin mutants*. Annals of Applied Biology, 2011. **159**(2): p. 202-211.
- [26]. Dobbss, L., et al., *Changes in root development of Arabidopsis promoted by organic matter from oxisols*. Annals of Applied Biology, 2007. **151**(2): p. 199-211.
- [27]. Quaggiotti, S., et al., *Effect of low molecular size humic substances on nitrate uptake and expression of genes involved in nitrate transport in maize (Zea mays L.)*. Journal of Experimental Botany, 2004. **55**(398): p. 803-813.
- [28]. García, A.C., et al., *Potentialities of vermicompost humic acids to alleviate water stress in rice plants (Oryza sativa L.)*. Journal of Geochemical Exploration, 2014. **136**: p. 48-54.
- [29]. Canellas, L.P., et al., *Humic acids isolated from earthworm compost enhance root elongation, lateral root emergence, and plasma membrane H⁺-ATPase activity in maize roots*. Plant physiology, 2002. **130**(4): p. 1951-1957.
- [30]. Trevisan, S., et al., *Humic substances induce lateral root formation and expression of the early auxin-responsive IAA19 gene and DR5 synthetic element in Arabidopsis*. Plant Biology, 2010. **12**(4): p. 604-614.
- [31]. Canellas, L.P., et al., *Bioactivity and chemical characteristics of humic acids from tropical soils sequence*. Soil Science, 2008. **173**(9): p. 624-637.