

Effets de l'application foliaire d'un extrait liquide d'algue marine (*Enteromorpha intestinalis* Linnaeus Link.) sur la croissance végétative et la physiologie des jeunes plantes de tomate cultivées sous stress salin

S. TOUEILEB¹, B. LARIBI^{2*} ET K. DJEHCHEIKH MALEININE³

¹Institut Supérieur Agronomique de Chott Meriem. BP 47, 4042 Chott Meriem, Sousse, Tunisie.

²Institut National Agronomique de Tunisie. 43, Av. Charles Nicolle, 1082 Tunis, Tunisie.

³Institut Supérieur d'Enseignement Technologique de Rosso-Mauritanie.

*Corresponding author: bochra_laribi@yahoo.fr

Abstract - The present study was carried out for the first time in Mauritania in order to study the possibilities of improving tomato (*Solanum lycopersicum* L.) production through mitigating the depressive effects of salinity by seaweed extract application within this vegetable species. The experiment was conducted at the Higher Institute of Technological Education (ISET) of Rosso in Mauritania. Three varieties (Xina, Mongal and Orbit) were cultivated according to a split-plot design with 3 replications and they were irrigated with 3 concentrations of NaCl (0, 2 and 4 g/L) with or without foliar spraying of the *Enteromorpha intestinalis* (= *Ulva intestinalis*) seaweed liquid extract at a concentration of 18%. The salt stress tolerance was carried out through agronomic and physiological parameters. The main results showed that almost all the agronomic (plant height, number of leaves/plant, and physiological (chlorophyll and carotenoid pigment contents, proline content) parameters were negatively influenced by the salt stress but some were slightly improved thanks to the foliar application of the seaweed extract. Therefore, foliar spraying of the *Enteromorpha intestinalis* seaweed liquid extract can be considered as an effective means in improving the NaCl stress tolerance of the 3 tested tomato varieties.

Keywords: Chlorophyll, Growth, NaCl stress, Proline, seaweed extract, *Solanum lycopersicum*.

Résumé - Le présent travail est réalisé pour la première fois en Mauritanie afin d'étudier les possibilités d'amélioration de la production de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) en atténuant les effets dépressifs de la salinité par l'application d'un extrait algal. Pour répondre à cet objectif, un essai expérimental a été installé à l'Institut Supérieur d'Enseignement Technologique (I.S.E.T.) de Rosso en Mauritanie. Ainsi, trois variétés (Xina, Mongal et Orbit) ont été cultivées selon un dispositif expérimental en split-plot avec 3 répétitions et ont été irriguées en additionnant 3 concentrations de NaCl (0, 2 et 4 g/L) avec ou sans pulvérisation foliaire de l'extrait liquide de l'algue marine *Enteromorpha intestinalis* (= *Ulvaintestinalis*) à 18%. La détermination du degré de tolérance à la salinité a été réalisée à travers des paramètres agronomiques et physiologiques. Les principaux résultats ont montré que presque tous les paramètres agronomiques (hauteur, nombre de feuilles/plante, diamètre de la tige et longueur des entre-nœuds) et physiologiques (teneurs en pigments chlorophylliens et caroténoïdes, teneur en proline) ont été influencés négativement par la contrainte saline mais quelques-uns ont été légèrement améliorés grâce à l'application foliaire de l'extrait algal. Par conséquent, la pulvérisation foliaire de l'extrait liquide de l'algue marine *Enteromorpha intestinalis* peut être considérée comme un moyen efficace en amélioration de la tolérance au stress NaCl chez les 3 variétés expérimentées de tomate.

Mots clés: Chlorophylle, Croissance, Extrait algal, Proline, *Solanum lycopersicum* L., Stress NaCl.

1. Introduction

La tomate (*Solanum lycopersicum* L. Anciennement *Lycopersion esculentum*) est une plante herbacée de la famille des Solanacées et qui est considérée comme l'un des légumes fruits les plus populaires et les plus recherchés. Selon les données de la FAO (2017), la Chine qui a produit 56 308 910 Tonnes de

tomate suivie par, l'Inde dont la production de tomate a été de 18 399 000 Tonnes, les Etats-Unis qui ont produit 13 038 410 Tonnes, la Turquie et l'Egypte dont les productions de tomate ont été respectivement de l'ordre de 12 600 000 et 7 943 000 Tonnes de tomate sont les plus grands pays producteurs de tomate.

En Mauritanie, qui est un pays de transition entre le Sahara et le Sahel, la culture de tomate occupe une place importante en alimentation humaine. Cependant, sa production reste très faible par rapport aux besoins de ce pays (Tazi 1996). En effet, l'agriculture Mauritanienne est concentrée le long du fleuve Sénégal et dans les régions du centre Sud et du Sud-Est. Ainsi, elle est pratiquée dans 4 grandes zones (cultures pluviales ou de Dièri, cultures de décrue, cultures d'oasis et périmètres irrigués) se distinguant par leur situation géographique, la nature de leurs sols et surtout les ressources en eau qu'elles sont susceptibles de mobiliser. Il est à noter que les périmètres irrigués sont surtout réservés à la production intensive de riz (90%) alors que le reste étant occupé par des cultures maraîchères comme la tomate. Cependant, la superficie des terres cultivables est très réduite principalement à cause de la salinisation du sol qui engendre la désertification des terres irriguées (Tazi 1996).

En effet, la salinité est une contrainte majeure qui affecte la croissance et la productivité des plantes. Elle touche plus particulièrement les zones arides et semi-arides, qui sont caractérisées par une forte évaporation d'eau à partir du sol et par une irrégulière et insuffisante pluviométrie (Munns et al. 2006). Ainsi, l'optimisation de la croissance des plantes et des rendements pourrait être réalisée à travers la maîtrise des conditions de culture et des techniques culturales ainsi que l'introduction de nouvelles pratiques horticoles telles que l'application par pulvérisation foliaire d'extraits d'algues marines sur les cultures. En effet, ces extraits algaux sont riches en phytohormones, polysaccharides et autres composés bénéfiques pour le développement et la croissance des plantes (Du Jardin 2015). Ainsi, l'application foliaire de ces extraits algaux a été utilisée avec succès chez des espèces maraîchères comme la tomate (Hernández-Herrera et al. 2014) et la laitue (Lucini et al. 2015).

C'est pourquoi, le présent travail est réalisé pour la première fois en Mauritanie afin d'étudier les possibilités d'amélioration de la production de tomate en atténuant les effets dépressifs de la salinité au sein de cette espèce maraîchère par l'application d'un extrait algal.

2. Matériel et méthodes

2.1. Matériel végétal

Le matériel végétal utilisé est représenté par 3 variétés de tomate et qui sont : 'Xina' (variété à fruits ronds et de petit calibre), 'Mongal' (variété à fruits ronds et de grand calibre) et 'Orbit' (variété à fruits allongés). Ces 3 variétés dont la croissance est déterminée sont cultivées par les agriculteurs en Mauritanie et leurs graines ont été achetées du commerce.

2.2. Préparation, concentration et mode d'application de l'extrait algal

L'extrait algal est préparé à partir d'algues marines vertes (*Enteromorpha intestinalis*) collectées en Mars 2017 de la plage de Monastir (35° 46' N ; 10° 49' E ; 20 m) au Sahel de la Tunisie. La préparation de cet extrait algal est réalisée selon la méthode de Rama Rao (1990). Il est à noter que l'extrait liquide d'algues marines a été appliqué en cours de culture sur les plantes par pulvérisation foliaire à la concentration de 18% dont le choix est déterminé en se basant sur les résultats de l'essai expérimental réalisé par Sivasankari et al. (2006).

2.3. Installation et conduite de l'essai expérimental

Les 3 variétés de tomate ont été cultivées en hors-sol sous abri-serre ayant une superficie totale de 144,5 m² et une orientation Est-ouest à l'Institut Supérieur d'Enseignement Technologique de Rosso (16,53° N ; 15,11° E ; 8 m) en Mauritanie en Mai 2017. Le semis en pépinière a été réalisé le 25/05/2017 dans des plateaux à 77 alvéoles préalablement remplies avec de la terre enrichie avec du vermicompost. Après la levée et au stade 2 feuilles, les plants ont été repiqués le 19/06/2017 dans des sacs boudins qui ont été préalablement enterrés à une profondeur de 30 cm avant d'être remplis avec un substrat composé d'argile (1/3), de vermicompost (1/3) et de sable (1/3). L'irrigation est réalisée par l'eau du fleuve du Sénégal. En effet, ce dernier joue un rôle très important comme principale source d'eau de surface pour la Mauritanie et dont le delta est localisé dans la ville de Rosso. D'ailleurs, les eaux de ce fleuve sont susceptibles d'être utilisées comme eaux potables et eaux d'irrigation (Ould Mohamedou et al. 2008). Quant à la fertilisation, elle a consisté à appliquer 2 g d'urée après 15 jours du repiquage d'une façon hebdomadaire. Quant à la lutte contre les adventices, elle a été réalisée par désherbage manuel.

Le dispositif expérimental adopté est le split-plot avec 3 répétitions, faisant intervenir deux facteurs de variations qui sont la variété et le traitement salin avec ou sans application foliaire de l'extrait algal. Dans chaque bloc, chaque plot relatif à un niveau de salinité (0, 2 et 4 g/LNaCl) avec ou sans application foliaire de l'extrait algal à 18% est représenté par 3 plants de tomate de chaque variété testée qui ont été placés ensemble dans un même sac boudin, soient 9 plants/sac boudin. Au total, l'essai expérimental a comporté 15 sacs boudins distribués sur les 3 blocs à raison de 5 sacs boudins /bloc, soient 45 plants/bloc et donc 135 plantes au total.

2.4. Suivi de la croissance végétative

La croissance végétative a été suivie tous les 7 jours à partir du 15^{ème} jour après la plantation. Ce suivi a été réalisé sur 3 plantes marquées de manière aléatoire pour chaque variété soumise à un même traitement salin avec ou sans application de l'extrait algal à 18%. Sur ces plantes, nous avons déterminé la hauteur des plantes (cm), le nombre de feuilles développées par plante, le diamètre de la tige à mi-hauteur de la plante (cm) et la longueur des entre-nœuds (cm).

2.5. Extraction et dosage des pigments chlorophylliens et caroténoïdes

Les pigments chlorophylliens et les caroténoïdes des feuilles ont été tout d'abord extraits à l'acétone 80% selon la méthode de Torrecillas et al. (1984). La densité optique est ensuite mesurée à 460 nm, 645 nm et 663 nm après avoir placé ces extraits à l'obscurité et à 4°C pendant 72 h. Enfin, les équations établies par Mackinney (1941) et Arnon (1949) ont été appliquées afin de déterminer les teneurs en chlorophylles a, b et totale et en caroténoïdes (mg/g MF).

2.6. Dosage de la proline

Le dosage de la proline a été réalisé en suivant la méthode de Troll et Lindesly (1955) modifiée par Dreier et Goring (1974) dont le principe repose sur la quantification de la réaction proline-ninhydrine par spectrophotométrie à la longueur d'onde de 520 nm.

2.7. Analyse statistique

Les données obtenues ont été soumises à une analyse de la variance (ANOVA) à deux facteurs de variation au moyen du logiciel S.A.S, version 8.0 (SAS Institute 1999). Les moyennes ont été ensuite comparées entre elles par le test Duncan au seuil de signification de 5%.

3. Résultats et discussion

3.1. Effets de l'application de l'extrait algal sur la croissance végétative des jeunes plantes cultivées sous contrainte saline

La variation de la hauteur des plantes, du diamètre de la tige, du nombre de feuilles développées par plante et de la longueur des entre-nœuds chez les 3 variétés de tomate en fonction des traitements salins avec ou sans application de l'extrait algal est présentée dans la figure 1. L'examen de la figure 1 montre que la hauteur des plantes la plus importante est observée chez le témoin de la variété 'Xina' (28,67 cm). Cependant, les traitements salins ont affecté négativement et de manière significative la hauteur des plantes chez cette même variété et cette réduction a été d'autant plus importante avec l'accroissement de la concentration saline. Ces résultats sont en accord avec ceux rapportés par Hajer et al. (2006) qui ont trouvé que la hauteur des plants de tomate préalablement irrigués avec différentes concentrations salines d'eau de mer, a significativement diminué avec l'augmentation des niveaux de salinité de cette eau. De même, Abdelgawad et al. (2019) ont rapporté que la hauteur des plants de tomate diminue sous l'effet de l'accroissement de la salinité de l'eau d'irrigation (75 et 150 mMNaCl) chez des lignées de tomate cerise.

Toutefois, l'ajout de l'extrait algal a amélioré significativement la hauteur des plantes mais uniquement avec le traitement 2 g/LNaCl. En outre, le stress NaCl a aussi entraîné une réduction non significative de la hauteur des plantes chez la variété 'Mongal' en passant de 18,5 cm chez le témoin à 15,67 cm puis 14,33 cm, respectivement avec les traitements 2 et 4 g/L de NaCl. Cependant, l'ajout de l'extrait algal aux traitements de 2 et 4 g/L de NaCl a engendré une augmentation significative de la hauteur des plantes, respectivement de l'ordre de 23,97% et 18,38%. En revanche, le stress NaCl n'a pas affecté significativement la hauteur des plantes chez la variété 'Orbit' et d'ailleurs même l'ajout de l'extrait algal au traitement 2 g/LNaCl n'a pas aussi affecté ce paramètre de manière significative. Au contraire, une réduction significative (18,18%) de la hauteur des plantes est observée lorsque l'extrait algal est ajouté au traitement 4 g/LNaCl par rapport au témoin (Figure 1A).

Ces résultats montrent que les deux variétés 'Xina' et 'Mongal' sont sensibles à la salinité contrairement à la variété 'Orbit' qui peut tolérer jusqu'à 4 g/L de NaCl. Par conséquent, l'ajout de l'extrait algal s'est avéré nécessaire pour atténuer les effets négatifs du sel sur la hauteur des plantes chez les deux variétés 'Xina' et 'Mongal'. En effet, l'extrait algal a agi positivement sur la hauteur des plantes cultivées sous stress NaCl en gardant une hauteur qui est plutôt proche de celle des plantes témoin surtout en ajoutant cet extrait algal à la concentration de 2 g/LNaCl. Il a été d'ailleurs rapporté que les biostimulants tels que les extraits algaux ont des effets bénéfiques sur les paramètres de croissance de la plante surtout sous stress abiotique tel que la salinité (Kumari et al. 2011 ; Bulgari et al. 2019 ; Shekhar Sharma et al. 2014). En effet, les substances bioactives présentes dans les extraits algaux améliorent la performance des plantes lorsqu'elles sont cultivées en conditions de stress abiotiques (Battacharyya et al. 2015). Ainsi, il a été démontré que l'application foliaire des exopolysaccharides extraits de la micro-algue *Dunaliella salina* stimule la croissance en hauteur des plants de tomate cultivés sous deux niveaux de salinité (3 et 6g/LNaCl) (El-Aroussi et al. 2018).

Par ailleurs, le stress NaCl a entraîné une réduction significative du nombre de feuilles par plante chez la variété 'Xina'. En effet, ce paramètre a chuté de 14 à 8 feuilles avec le traitement 2 g/LNaCl accusant ainsi une réduction de 38,10% par rapport au témoin, alors qu'au contraire, une augmentation de 32,6% a été observée avec ce même traitement après l'ajout de l'extrait algal. En revanche, la variété 'Mongal' paraît la moins affectée par la contrainte saline au niveau du nombre de feuilles par plante. Ainsi, une réduction de 29,79% de ce paramètre a été notée avec le traitement 4 g/L de NaCl par rapport au témoin. Cependant, une augmentation de l'ordre de 6,38% de feuilles par plante est observée avec le traitement 2 g/LNaCl après ajout de l'extrait algal chez cette même variété. Quant à la variété 'Orbit', le nombre de feuilles par plante a diminué significativement de 16 à 13 feuilles par plante avec le traitement 2 g/LNaCl, soit une réduction de 18,75% par rapport au témoin mais il n'a pas varié significativement en ajoutant l'extrait algal à ce même traitement (Figure 1B).

Dans le même contexte, Jayasinghe et al. (2016) ont montré que l'application foliaire d'un extrait d'un fertilisant liquide à base d'extraits algaux en combinaison avec un fertilisant chimique a augmenté le nombre de feuilles par plante chez le piment. Cependant, ces mêmes auteurs ont noté que ce nombre de feuilles a diminué lorsque le fertilisant liquide à base d'extraits algaux est utilisé seul. Ils concluent donc que cette baisse du nombre de feuilles est due à l'effet inhibiteur causé par les concentrations élevées de certains macroéléments que comprend ce fertilisant liquide à base d'extraits algaux.

Quant au diamètre de la tige, il semble que le stress NaCl a un effet négatif sur ce paramètre qui a accusé une réduction très nette et significative chez les 3 variétés expérimentées de tomate avec les deux traitements de 2 et 4 g/LNaCl. Au contraire, aucune différence significative pour ce paramètre n'avait été notée entre ces deux traitements salins chez les 3 variétés. Dans le même contexte, Abdelgawad et al. (2019) ont noté que le diamètre de la tige des plants a significativement diminué avec l'augmentation de la salinité de l'eau d'irrigation à des concentrations de 75 et 150 mMNaCl chez la majorité des lignées expérimentées de tomate cerise.

En outre, l'ajout de l'extrait algal aux deux traitements salins (2 et 4 g/LNaCl) n'a pas fait varier significativement le diamètre de la tige par rapport au témoin chez les 3 variétés, excepté l'ajout de l'extrait algal au traitement 2 g/LNaCl qui a augmenté significativement ce paramètre de 12% par rapport au témoin chez la variété 'Mongal' (Figure 1C). Il semble alors que l'ajout de l'extrait algal n'a pas d'effet positif sur le diamètre de la tige chez les plantes cultivées sous stress NaCl surtout à la concentration de 4g/LNaCl chez les 3 variétés expérimentées de tomate. Ces résultats ne concordent pas avec ceux rapportés par Mattner et al. (2013) qui ont trouvé que chez le brocoli, le diamètre de la tige des plantes cultivées sous serre a augmenté significativement lorsqu'elles étaient irriguées avec un extrait algal. Toutefois, ces mêmes auteurs ont noté que le diamètre de la tige a augmenté chez les plantes cultivées en plein champ sur un sol argilo-limoneux et irriguées avec un extrait algale en comparaison avec celles qui ont été cultivées sur un sol sablonneux et irriguées avec ce même extrait algal.

La variation de la longueur des entre-nœuds chez les trois variétés de tomate en fonction des traitements NaCl (2 et 4 g/L) montre que ce paramètre a diminué de manière significative chez la variété 'Xina' et cette réduction est d'autant plus importante avec l'accroissement de la concentration NaCl. Toutefois, la longueur des entre-nœuds n'a pas été affectée significativement par les deux traitements de 2 et 4 g/LNaCl chez les deux variétés 'Mongal' et 'Orbit'.

Ainsi, les résultats relatifs à la diminution de la longueur des entre-nœuds chez la variété 'Xina' sous l'effet du stress salin sont comparables à ceux observés par Sibomana et al. (2013) chez la tomate cultivée sous stress hydrique. En effet, ces auteurs ont noté que chez tomate, la longueur des entre-

nœuds des plantes témoins est plus élevée que celle des plantes soumises à un stress hydrique modéré et sévère et dont la croissance végétative a diminué à cause de cette contrainte abiotique.

Cependant, l'ajout de l'extrait algal aux deux traitements salins (2 et 4 g/L NaCl) n'a pas affecté significativement la longueur des entre-nœuds chez les trois variétés expérimentées et aucune différence significative n'avait été observée entre les plants témoins et ceux traités avec l'extrait algal à 18% (Figure 1D). Ces résultats prouvent donc que l'extrait algal n'a pas d'impact positif sur la longueur des entre-nœuds chez les trois variétés de tomate lorsqu'elles sont soumises à un stress NaCl. En effet, Mendoza-Morales et al. (2019) ont trouvé que l'application d'un extrait liquide de l'algue marine *Ulva fasciata* à la concentration de 20% n'a pas augmenté la longueur des entre-nœuds des plants chez la lentille cultivée alors qu'en utilisant de faibles concentrations (5 et 10%) de cet extrait, la croissance aérienne de ces plants a été améliorée et la longueur de leurs entre-nœuds a augmenté. Ils ont alors conclu que les extraits algaux liquides et particulièrement ceux de l'*Ulva fasciata* agissent à faibles doses comme des régulateurs de croissance pour améliorer la croissance végétative des plantes.

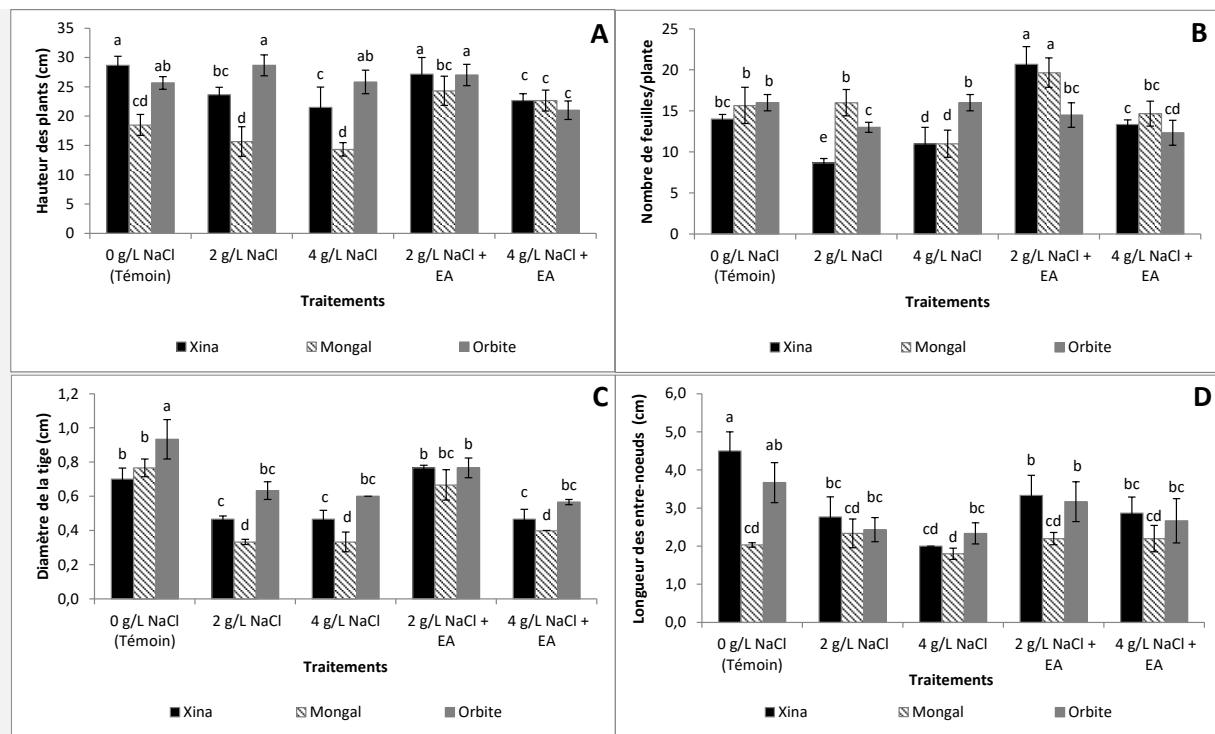


Figure 1 : Effets des traitements appliqués : Témoin (0 g/L NaCl) ; 2 g/L NaCl ; 4 g/L NaCl ; 2 g/L NaCl + EA ; 4 g/L NaCl + EA sur les paramètres de croissance végétative des jeunes plants (A : hauteur des plants ; B : nombre de feuilles développées/plante ; C : diamètre de la tige ; D : longueur des entre-nœuds) chez les 3 variétés expérimentées de tomate (EA = extrait algal à 18%).

*Les valeurs suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de 5% selon le test Duncan.

3.2. Effets de l'application de l'extrait algal sur les teneurs en pigments chlorophylliens et en caroténoïdes chez les jeunes plants cultivées sous contrainte saline

Les résultats relatifs aux teneurs en pigments chlorophylliens et en caroténoïdes chez les trois variétés de tomate montrent que le témoin de la variété 'Xina' présente les valeurs significativement les plus élevées en comparaison avec les plants témoins des deux autres variétés (Figure 2). Parmi les trois variétés traitées avec les différentes concentrations de NaCl, la variété 'Mongal' est significativement la plus affectée par le traitement de 4 g/L NaCl. En effet, ce dernier a causé une diminution significative de la teneur en chlorophylle a (0,76 mg/g MF) (Figure 2A), en chlorophylle b (0,82 mg/g MF) (Figure 2B) et en chlorophylle totale (1,58 mg/g MF), soit une réduction respective de 64,97 ; 36,43 et 54,20% par rapport au témoin (Figure 2C). En effet, il a été rapporté que les teneurs en chlorophylle a, en chlorophylle b et en chlorophylle totale ont été significativement réduites chez la tomate lorsque les plants ont été soumis à 3 et 6 g/L NaCl et cette réduction a été d'autant plus importante avec l'accroissement de la concentration en sel (El Arroussi et al. 2018). En outre, la teneur en caroténoïdes est négativement influencée par le stress salin chez les trois variétés de tomate soumises au stress salin (Figure 2D). En effet, cette teneur a diminué significativement de 78,85% ; 70,60% et 68,37%, respectivement chez les variétés 'Xina', 'Mongal' et 'Orbit' avec le traitement de 4 g/L NaCl. Ces résultats ne sont pas en accord avec ceux trouvés par Borghesi et al. (2011) qui ont noté que la teneur

en caroténoïdes augmente proportionnellement avec l'accroissement des concentrations en sel chez 4 géotypes de tomate. Cependant, la pulvérisation foliaire de l'extrait algal à 18% aux plantes soumises à un stress salin sévère (4g/LNaCl) a amélioré significativement les teneurs en pigments chlorophylliens et en caroténoïdes en comparaison avec les plantes sévèrement stressées (4 g/LNaCl) chez la variété 'Xina'. En effet, les teneurs en chlorophylle a, en chlorophylle b, en chlorophylle totale et en caroténoïdes ont augmenté respectivement de 47,03% ; 9,34% ; 34,96% et 48,04% avec l'ajout de l'extrait algal au traitement salin de 4 g/LNaCl. En outre, une augmentation significative de l'ordre de 43,28% et 16,40% a été respectivement observée pour la teneur en chlorophylle a et en chlorophylle totale des plantes sévèrement stressées (4 g/LNaCl) après l'ajout de l'extrait algal à 18% chez la variété 'Mongal'. Quant à la variété 'Orbite', l'amélioration des teneurs en pigments chlorophylliens et en caroténoïdes a été observée lorsque l'extrait algal est pulvérisé sur les plantes moyennement stressées (2 g/LNaCl). En effet, les teneurs en chlorophylle a, en chlorophylle b, en chlorophylle totale et en caroténoïdes ont augmenté respectivement de 64,96% ; 54,40% ; 60,59% et 78,77% avec l'ajout de l'extrait algal au traitement salin de 2 g/LNaCl (Figure 2).

Très récemment, Yao et al. (2020) ont montré que l'application de l'extrait algal de *Sargassum horneria* a un effet positif sur la teneur des feuilles en chlorophylle chez la tomate, ce qui est d'ailleurs en accord avec nos résultats. De même, Kumari et al. (2011) ont constaté que la teneur foliaire en pigments photosynthétiques (chlorophylle et caroténoïdes) a augmenté significativement chez la tomate lorsque l'extrait de l'algue brune *Sargassum johnstonii* Setchell & Gardner est appliqué et ceci indépendamment de sa méthode d'application. Cependant, ces mêmes auteurs ont démontré que la pulvérisation foliaire de cet extrait algal a été la plus efficace. En effet, il a été suggéré que la teneur élevée en chlorophylle des feuilles des plantes traitées à l'extrait algal d'*Ascophyllum nodosum* (Linnaeus) en comparaison avec les plantes témoins dépend des bêtaïnes présentes dans cet extrait (Whapham et al. 1993 ; Blunden et al. 1997). En revanche, la teneur en chlorophylles des feuilles n'a pas augmenté en appliquant l'extrait algal d'*Ascophyllum nodosum* aussi bien en absence qu'en présence de contrainte hydrique chez l'épinard (Xu et Lescovar 2015).

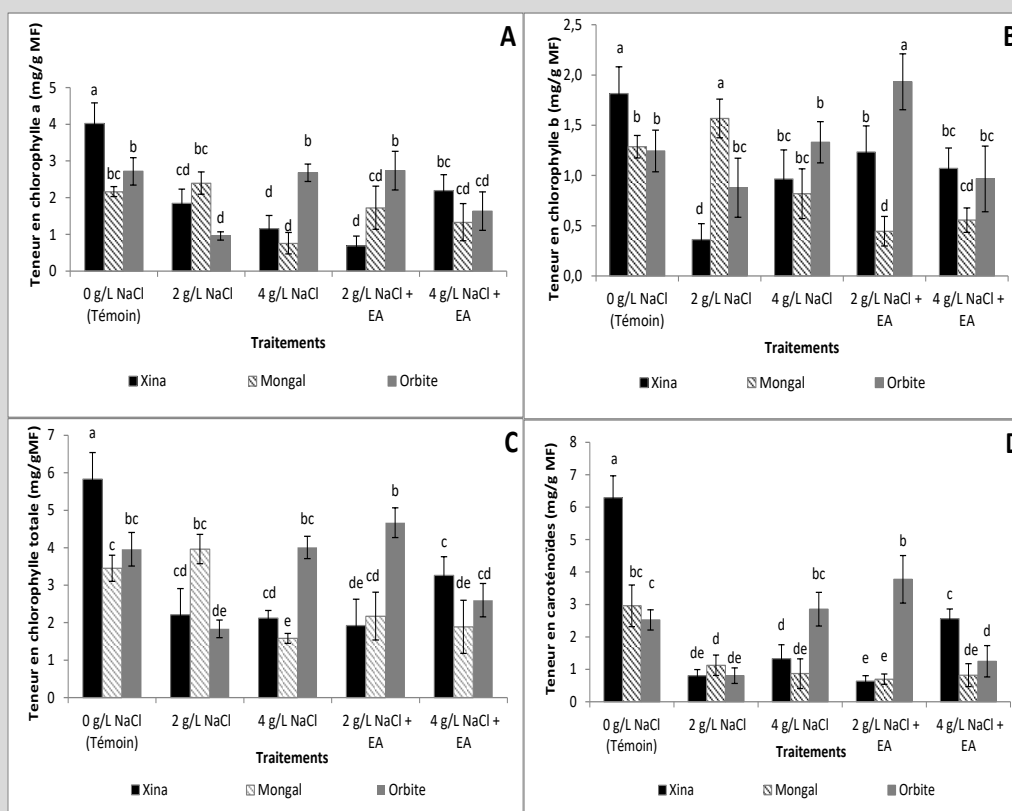


Figure 2 :Variation des teneurs (mg/g MF) en pigments chlorophylliens et en caroténoïdes (A : Teneur en chlorophylle a ; B : Teneur en chlorophylle b ; C : Teneur en chlorophylle totale ; D : Teneur en caroténoïdes) en fonction des traitements appliqués : Témoin (0 g/L NaCl) ; 2 g/L NaCl ; 4 g/LNaCl ; 2 g/L NaCl + EA ; 4 g/LNaCl +EA chez les 3 variétés expérimentées de tomate (EA = extrait algal à 18%).*Les valeurs suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de 5% selon le test Duncan.

3.3. Effets de l'application de l'extrait algal sur la teneur en proline chez les jeunes plants cultivées sous contrainte saline

Les effets des traitements salins avec ou sans extrait algal sur la teneur foliaire en proline sont présentés dans le tableau 1.

Tableau 1 : Effets des traitements appliqués sur la teneur en proline ($\mu\text{g/g MF}$) des feuilles chez les 3 variétés expérimentées de tomate (*EA = extrait algal à 18%*).

Variété	Traitement	Proline ($\mu\text{g/g MF}$)
Xina	0 g/LNaCl (Témoin)	0,034 \pm 0,002 ab
	2 g/LNaCl	0,025 \pm 0,002 b (-25,28%)
	4 g/LNaCl	0,040 \pm 0,001 a (+13,73%)
	2 g/LNaCl + EA	0,028 \pm 0,008 cd (-17,90%)
	4 g/LNaCl + EA	0,018 \pm 0,005 d (-46,02%)
	0 g/LNaCl (Témoin)	0,011 \pm 0,002 c
Mongal	2 g/LNaCl	0,026 \pm 0,005 b (+55,47%)
	4 g/LNaCl	0,033 \pm 0,004 ab (+65,40%)
	2 g/LNaCl + EA	0,030 \pm 0,003 ab (+61,31%)
	4 g/LNaCl + EA	0,018 \pm 0,007 c (+37,89%)
	0 g/LNaCl (Témoin)	0,025 \pm 0,003 b
	2 g/LNaCl	0,015 \pm 0,005 bc (-40,84%)
Orbit	4 g/LNaCl	0,018 \pm 0,002 bc (-28,24%)
	2 g/LNaCl + EA	0,043 \pm 0,013 a (+40,59%)
	4 g/LNaCl + EA	0,015 \pm 0,005 c (-38,17%)
	0 g/LNaCl (Témoin)	0,025 \pm 0,003 b

*Les valeurs d'une même ligne suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de 5% selon le test Duncan.

**Les chiffres entre parenthèses indiquent les % de réduction ou d'augmentation par rapport au témoin.

D'après le tableau 1, la teneur en proline augmente proportionnellement avec l'accroissement de la concentration en sel de 55,47 et 65,40%, respectivement avec les traitements 2 et 4 g/LNaCl chez la variété 'Mongal' contrairement à la variété 'Orbit' dont les teneurs en proline ont diminué avec ces mêmes traitements. En outre, une légère augmentation (+13,73%) de la teneur en proline est observée seulement avec la concentration de 4 g/LNaCl chez la variété 'Xina'. Par conséquent, la teneur en proline est affectée par le stress salin et varie aussi en fonction des variétés expérimentées. En effet, la synthèse d'osmolytes comme la proline est un mécanisme de tolérance qu'adoptent les plantes en cas de stress salin (Ashraf et Wu 1994 ; Munns et Tester 2008). D'ailleurs, il a démontré que chez la tomate, l'accumulation de la proline augmente considérablement surtout dans les feuilles chez les génotypes tolérants au stress salin en comparaison aux génotypes considérés comme sensibles à cette contrainte abiotique (Ghrasallah et al. 2016).

Cependant, la pulvérisation foliaire de l'extrait algal des plants de tomate cultivés en présence de 2 g/LNaCl a causé une diminution de la teneur en proline, de l'ordre de 17,90% par rapport au témoin chez la variété 'Xina'. Au contraire, les teneurs en proline ont légèrement augmenté chez les plants cultivés sous stress salin modéré (2 g/LNaCl) et traités avec l'extrait algal en comparaison avec celles des plants modérément stressés mais non traités avec cet extrait chez les deux variétés 'Mongal' et 'Orbit' (Tableau 1).

Néanmoins, la teneur en proline a augmenté de 37,89% par rapport au témoin chez la variété 'Mongal' lorsque les plants ont été à la fois traités avec l'extrait algal et soumises à 4 g/LNaCl. En revanche, cette teneur en proline des plants cultivés sous stress salin sévère (4

g/LNaCl) et traités avec l'extrait algal a diminué de 46,02 et 38,17% en comparaison avec les plants témoins, respectivement chez les variétés 'Xina' et 'Orbit' (Tableau 1). Bien que les résultats ainsi obtenus soient mitigés, il semble que la pulvérisation foliaire de l'extrait algal chez les plants cultivés sous contrainte saline a affecté négativement la teneur en proline chez la variété 'Xina' alors que cette teneur a augmenté chez la variété 'Mongal'. Quant à la variété 'Orbit', la teneur en proline des plants traités avec l'extrait algal a été plus élevée en présence de 2 g/LNaCl en comparaison avec celle des plants traités et soumis à 4 g/LNaCl. En effet, il a démontré que le traitement avec un extrait d'algue marine à la concentration de 4% des plants de Niébé (*Vigna unguiculata* L.) a réduit la production de proline lorsque ces plants avaient été soumis à un stress salin de 50 mMNaCl (Manaf 2016). Dans ce même contexte, El Arroussi et al. (2018) ont noté que la teneur en proline augmente sous stress salin chez la tomate mais l'effet négatif du sel est atténué en traitant les plants avec les exo-polysaccharides extraits de la micro-algue *Dunaliella salina*.

4. Conclusion

En testant la tolérance à la salinité chez 3 variétés de tomate ('Xina', 'Mongal' et 'Orbit'), des différences significatives ont été observées entre elles pour l'ensemble des paramètres relatifs à la germination, la croissance végétative et la physiologie de ces jeunes plants de tomate. Toutefois, cette étude a permis de montrer que l'application foliaire d'un extrait algal à une concentration de 18% permet d'améliorer nettement la tolérance à la salinité de ces jeunes plants mais avec quelques différences d'une variété à une autre. Par conséquent, l'utilisation des extraits d'algues marines peuvent être considérés comme un moyen efficace en amélioration de la tolérance de la tomate à NaCl via l'adaptation de mécanismes physiologiques comme la photosynthèse en agissant sur les pigments chlorophylliens et les caroténoïdes ainsi que la synthèse d'osmo-protecteurs tels que la proline.

Il serait donc intéressant de mener une étude plus approfondie sur les modes d'action de l'extrait de l'algue marine *Enteromorpha intestinalis* sur les mécanismes de tolérance aux stress abiotiques des plantes d'espèces horticoles telles que la tomate. Il serait aussi utile d'expérimenter d'autres espèces d'algues marines telles que les algues brunes et en testant différentes concentrations.

Par ailleurs, cette étude a montré que les ressources algales de certains pays comme la Mauritanie peuvent être aussi exploitées en agriculture pour produire les extraits algaux et les utiliser en tant que moyens efficaces en amélioration de la tolérance des plantes à l'effet dépressif du sel chez les espèces horticoles telles que la tomate.

5. Références

- Abdelgawad KF, El-Mogy MM, Mohamed MIA, Garchery C, Stevens RG (2019)** Increasing ascorbic acid content and salinity tolerance of cherry tomato plants by suppressed expression of the ascorbate oxidase gene. *Agronomy* 9 (51): 14p
- Abou El-Maged MM, Zaki MF, Abou-Hussein SD (2008)** Effect of organic manure and different levels of saline irrigation water on growth, green yield and chemical content of sweet fennel. *Aust. J. Appl. Sci.* 2:90-98
- Arnon D (1949)** Copper enzymes in isolated chloroplasts. Polyphenoloxidase in *Beta vulgaris*. *Plant Physiol* 24:1-15
- Ashraf MY, Wu L (1994)** Breeding for salinity tolerance in plants. *Crit Rev Plant Sci* 13(1):17-42
- Battacharyya D, Zamani Babgohari M, Rathor P, Prithiviraj B (2015)** Seaweed extracts as biostimulants in horticulture. *Sci Horticult* 196: 39-48
- Blunden G, Jenkins T, Liu Y-W (1997)** Enhanced leaf chlorophyll levels in plants treated with seaweed extract. *J Appl Phycol* 8: 535-543

- Borghesi E, González-Miret ML, Escudero-Gilete ML, Malorgio F, Heredia FJ, Meléndez-Martínez AJ (2011)** Effects of salinity stress on carotenoids, anthocyanins, and color of diverse tomato genotypes. *J Agric Food Chem* 59:11676-11682
- Bulgari R, Franzoni G, Ferra A (2019)** Biostimulants application in horticultural crops under abiotic stress conditions. *Agronomy* 9: 306
- Dreier W, Gröing M (1974)** Der einfluss hoher salzkonzentration auf verschieden physiologische parameter von maiswurzeln. [L'influence d'une concentration élevée en sel sur divers paramètres physiologiques des racines de maïs] *Win Z. der HU Berlin, NathNaturwiss R* 23: 641-644
- Du Jardin P (2015)** Plant biostimulants: Definition, concept, main categories and regulation. *SciHorticult* 196: 3-14
- ElArroussi H, Benhima R, Elbaouchi A, Sijilmassi B, ElMernissi N, Aafsar A, Meftah-Kadmiri I, Bendaou N, Smouni A(2018)** *Dunaliella salina* exopolysaccharides: a promising biostimulant for salt stress tolerance in tomato (*Solanum lycopersicum*). *J Appl Phycol* 30: 2929-2941
- FAO (2017)** Production mondiale de la tomate en 2017. FAOSTAT, FAO: Rome, Italie. (<http://www.faostat.fao.org/>).
- Gharsallah C, Fakhfakh H, Grubb D, Gorsane F (2016)** Effect of salt stress on ion concentration, proline content, antioxidant enzyme activities and gene expression in Tomato cultivars. *AoB Plants* 18: 1-47
- Hajer AS, Malibari AA, Al-Zahrani HS, Almaghrabi OA (2006)** Responses of three tomato cultivars to sea water salinity 1. Effect of salinity on the seedling growth. *Afr J Biotech.* 5 (10): 855-861
- Hernández-Herrera RM, Santacruz-Ruvalcaba F, Ruiz-López MA, Norrie J, Hernández-Carmona G (2014)** Effect of liquid seaweed extracts on growth of tomato seedlings (*Solanum lycopersicum* L.). *J Appl Phycol* 26:619-628
- Jannin L (2012)** Caractérisation des modifications physiologiques et métaboliques induites chez *Brassica napus* L. par l'apport d'extraits algaux ou d'acides humiques. Thèse de Doctorat en Physiologie, Biologie des organismes, populations, interactions. Université de Caen Basse-Normandie, France. 137p
- Jayasinghe PS, Pahalawattaarachchi V, Ranaweera KKDS (2016)** Effect of seaweed liquid fertilizer on plant growth of *Capsicum annum*. *Discovery* 52(244): 723-734
- Kumari R, Kaur I, Bhatnagar AK (2011)** Effect of aqueous extract of *Sargassum johnstonii* Setchell & Gardner on growth, yield and quality of *Lycopersicon esculentum* Mill. *J Appl Phycol* 23: 623-633
- Lucini L, Roupheal Y, Cardarelli M, Canaguier R, Kumar P, Colla G (2015)** The effect of a plant-derived biostimulant on metabolic profiling and crop performance of lettuce grown under saline condition. *SciHorticult* 182: 124-133
- Manaf HH (2016)** Beneficial effects of exogenous selenium, glycine betaine and seaweed extract on salt stressed cowpea plant. *Ann Agric Sci* 61(1):41-48
- Mattner SW, Wite D, Riches DA, Porter IJ, Arioli T(2013)** The effect of kelp extract on seedling establishment of broccoli on contrasting soil types in southern Victoria, Australia. *BiolAgricHortic* 29 (4): 258-270
- Mackinney G (1941)** Absorption light by chlorophyll solutions. *J Biol Chem* 140: 315-322
- Mendoza-Morales LT, Mendoza-González AC, Mateo Cid LE, Rodríguez-Dorantes A (2019)** Effect of seaweed liquid extracts on the internode variation of *Lens esculenta* seedlings. *Int J Sci* 5(01):1-5
- Munns R, James RA, Lauchli A (2006)** Approaches to increasing the salt tolerance of wheat and other cereals. *J Expt Bot* 57: 1025-1043
- Munns R, Tester M (2008)** Mechanisms of salinity tolerance. *Annu Rev Plant Biol* 59:651-681

- Rama Rao K (1990)** Preparation of liquid Seaweed fertilizer from *Sargassum*. In: Seaweed Research and Utilization Association Workshop on Algal Products and Seminar on *Phaeophyceae* in India. 4th – 7th June, Madras, India, 16p
- OuldMohamedou E, Lebkiri A, Rifi EH, Lebkiri M, Fadli M, Pontie M, Ould Mahmoud AK, Fagel ML (2008)** Typologie physico-chimique et métallique des eaux du fleuve Sénégal au niveau de la ville de Rosso (Mauritanie). Afr. Sci. 04(3): 394-409
- SAS Institute (1999)** SAS/STAT User's Guide, version 8.0. SAS Institute Inc, Cary, NC
- Schonfeld MA, Johnson RC, Carver BF, Mornhinweg DW (1988)** Water relations in winter wheat as drought resistance indicators. Crop Sci 28: 526-531
- Sibomana IC, Aguyoh JN, Opiyo AM (2013)** Water stress affects growth and yield of container grown tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill) plants. Glob J Bio-Sci Bio Technol 2: 461-466
- Shekhar Sharma HS, Fleming C, Selby C, Rao JR, Martin T (2014)** Plant biostimulants: a review on the processing of macroalgae and use of extracts for crop management to reduce abiotic and biotic stresses. J Appl Phycol 26:465-490
- Tazi M (1996)** Mauritanie: rapport de pays pour la conférence technique internationale de la FAO sur les ressources phyto-génétiques. Leipzig, FAO. 53p
- Torretilas A, Leon A, Del Amor F, Martinez-Mompean MC (1984)** Determinación rápida de clorofila en discos foliares de limonero [Dosage rapide de la chlorophylle dans les disques foliaires de citronnier]. Fruits 39: 617-622
- Troll W, Lindsley J (1955)** A photometric method for the determination of proline. J Biochem 215 (2): 655-660
- Whapham CA, Blunden G, Jenkins T, Hankins SD (1993)** Significance of betaines in the increased chlorophyll content of plants treated with seaweed extracts. J Appl Phycol 5:231-234
- Xu C, Leskovar DI (2015)** Effects of *A. nodosum* seaweed extracts on spinach growth, physiology and nutrition value under drought stress. Sci Horticult 183: 39-47
- Yao Y, Wang X, Chen B, Zhang M, Ma J (2020)** Seaweed extract improved yields, leaf photosynthesis, ripening time, and net returns of tomato (*Solanum lycopersicum* Mill.). A.C.S. Omega 5: 4242-4249