

EFFET DE L'EXTRAIT LIQUIDE DE L'ALGUE VERTE *CHAETOMORPHA LINUM* (MÜLLER) KÜTZ., 1849 SUR LA GERMINATION ET LA CROISSANCE DU BLE DUR *TRITICUM TURGIDUM* L. SUBSP. *DURUM*

Leila CHEBIL AJJABI*¹, I. BEN AMMAR², L. KTARI¹, D. CHERIF¹,
H. CHERIFI¹ et S. SADOK¹

¹: Laboratoire de Biotechnologie Bleue et Bioproduits Aquatiques, INSTM centre La Goulette, Port de pêche La goulette, Tunis, 2060.

²: Institut Supérieur des Sciences et Technologies de l'Environnement de Borj-cédria, Technopole Technologique de Borj-cédria BP 1003

*leila.chebil@instm.rnrt.tn

ملخص

تأثير مستخلص الطحلب الأخضر *Chaetomorpha linum* (Müller) Kütz., 1849 على إنبات ونمو القمح الصلب *durum* *Triticum turgidum* L. subsp. كانت مستخلصات الطحالب تستخدم، منذ زمن بعيد، كسماد لما لها من تأثير معروف على نمو النباتات ومقاومتها للأمراض. ففي هذا البحث، تمت دراسة تأثير استخدام الطحلب الأخضر *Chaetomorpha linum* (Müller) Kütz., 1849 كمخصب حيوي في زراعة القمح الصلب *Triticum turgidum* L. subsp. تم اختبار مستخلص الطحلب بتركيزات مختلفة (1%، 3%، 5%، 8% و 10%) لتقييم تأثيره على إنبات بذور القمح الصلب ونموها مقارنة باستخدام الماء المقطر. وقد أظهرت النتائج أن أفضل معدلات الإنبات لوحظت في المحاصيل ذات التركيزات الأقل من مستخلص الطحالب (1% و 3%). كما وقع تسجيل أفضل معدلات النمو في المحاصيل التي حصلت على تركيز 3% من مستخلص الطحلب. وكنتيجة لهذا البحث فإن مستخلص الطحلب الأخضر *Chaetomorpha linum*، له نتائج واعدة لإنبات القمح ونموه. الكلمات المفتاحية: الطحلب الأخضر *Chaetomorpha linum*، مستخلص السائل للطحالب، القمح الصلب، إنبات، نمو.

RESUME

L'extrait algal liquide (EAL) est utilisé comme fertilisant depuis longtemps et il est connu par son effet sur la croissance et la résistance des plantes aux maladies. Dans ce travail, l'effet de l'extrait de l'algue verte *Chaetomorpha linum* ((Müller) Kütz., 1849) a été étudié, en tant que biofertilisant dans la culture du blé *Triticum turgidum* L. subsp. *durum*. L'extrait algal a été testé à différentes concentrations (1%, 3%, 5%, 8% et 10%) afin d'évaluer son effet sur la germination et la croissance de la graine de blé par rapport au témoin (eau distillée). Les résultats ont montré que les meilleurs taux de germination ont été observés dans les cultures ayant reçues les plus faibles concentrations de l'extrait algal (1% et 3%). Les meilleurs taux de croissance des différents organes de la plante ont été enregistrés dans les cultures ayant reçues la concentration de 3% d'EAL. La présente étude a démontré que l'extrait liquide de l'algue marine verte *Chaetomorpha linum* pourrait servir de bio-fertilisant de remplacement, tout en étant écologique, peu coûteux et pouvant offrir des avantages économiques et environnementaux considérables aux agriculteurs.

Mots clés : *Chaetomorpha linum*, Macroalgue verte, Extrait algal liquide, Blé dur, Germination, Croissance.

ABSTRACT

Effect of the green algae *Chaetomorpha linum* ((Müller) Kütz., 1849) liquid extract on germination and growth of durum wheat *Triticum turgidum* L. subsp. *Durum* : Algal extract has long been used as a fertilizer and is known for its effect on plant growth and resistance to disease. In this work, the effect of the green algae *Chaetomorpha linum* ((Müller) Kütz., 1849) extract was studied as a biofertilizer in the cultivation of wheat *Triticum turgidum* L. sub sp. *durum*. Algal extract was tested at different concentrations (1%, 3%, 5%, 8% and 10%) to assess its effect on wheat seed germination and growth. The control culture was conducted with distilled water. The results showed that the best germination rates were observed in crops with the lowest concentrations of algal extract (1% and 3%). The best growth rates were recorded in crops that received the 3% concentration of algal extract. The green algae *Chaetomorpha linum* ((Müller) Kütz., 1849) extract is showing promising results for wheat germination and growth. The present study demonstrated that seaweed liquid extract could serve as an alternative biofertilizer eco-friendly and deliver substantial economic and environmental benefits to farmers.

Keywords: *Chaetomorpha linum*, Green macroalgae, Liquid Algal Extract, Durum wheat, Germination.

INTRODUCTION

L'utilisation excessive d'engrais chimiques et de pesticides en agriculture moderne pose de graves problèmes de pollution mondiale et de perte de fertilité des terres (Galbiattia et al., 2007). Les

bio-engrais basés sur des sources renouvelables sont les suppléments les plus efficaces aux engrais chimiques (Michalak et Chojnacka, 2015). L'utilisation de bio-engrais est utile pour le maintien de la fertilité du sol et la stabilité de sa composition en éléments nutritifs. Ainsi, la recherche de produits

organiques naturels pour une productivité durable des cultures a été soulignée. Les bio-engrais sont des engrais organiques totalement naturels qui aident à fournir aux sols tous les nutriments nécessaires pour les plantes.

Les algues marines sont considérées comme l'une des ressources durables les plus importantes (Abetz, 1980) ayant un potentiel industriel (Sylvia et al., 2005). Leur composition offre une excellente opportunité d'étudier une diversité de composés biologiquement actifs rares (Zhang et Ervin, 2004 ; Zodape et al., 2009) qui présentent un éventail de caractéristiques physiologiques et biochimiques (Zhang et Schmidt, 1997 ; Zhang et Ervin, 2004). Elles sont riches en substances stimulant la croissance (Sylvia et al., 2005) telles que la kinétine, la zéatine, le gibberelline (Zodape et al., 2009) les auxines et cytokinines (Zhang et Ervin, 2004), les macro et micro-éléments (Strik et al., 2003), les acides aminés et les vitamines (Mišurcová, 2011).

Le potentiel des algues pour les applications agricoles a été utilisé depuis l'antiquité, mais les récentes demandes d'agriculture biologique et d'aliments biologiques ont beaucoup stimulé l'application de traitements biologiques comme les extraits d'algues en agriculture. De nos jours, des extraits liquides d'algues, utilisés par irrigation ou par pulvérisation foliaire, sont en cours d'application (Godlewska et al., 2016). Ces extraits sont plus faciles et rapides à utiliser puisqu'ils limitent les effets négatifs des algues déjà décomposées et compostées alors que l'application d'algues fraîches sur le sol, demande généralement d'attendre longtemps pour leur décomposition.

Les extraits liquides obtenus à partir d'algues marines ont suscité beaucoup d'intérêt en les utilisant par pulvérisation foliaire pour induire la croissance et le rendement des cultures de céréales, légumes, fruits, vergers et plantes horticoles (Thivy, 1961 ; Metha, et al., 1967 et Bokil et al., 1974 ; Godlewska et al., 2016 ; Vijayakumar et al., 2019).

Ils contiennent des composants tels que les polysaccharides (galactane, alginate, laminarine..), les protéines (les lectines..), les acides gras polyinsaturés, les pigments (chlorophylles, caroténoïdes et phycobiliprotéines), les polyphénols (acides phénoliques, flavonoïdes, acide cinnamique, isoflavones, acide benzoïque, lignanes, quercétine...), les minéraux (K, Mg, Ca, Na....) et les hormones de croissance végétales (cytokinines, auxines, gibbérellines, abscisiques...).

Les extraits d'algues sont de nos jours plus utilisables que les fongicides synthétiques pour lutter contre les champignons infectant les plantes en raison de leur sécurité accrue et de leurs effets relativement négligeables sur l'environnement (Haroun et al., 1995; Brimmer and Boland, 2003; Galal et al.,

2011). De plus, Baloch et al. (2013) ont signalé que l'utilisation *in vivo* des algues brunes (*Spatoglossum variable* et *Polycladia indica*) et de l'algue rouge *Melanothamnus afaqhusainii* avait des effets suppressifs importants sur les champignons responsables des pourritures racinaires tels *Fusarium solani* et *Macrophomina phaseolina* attaquant l'aubergine (*Solanum melongena*) et la pastèque *Citrullus lanatus*. Il a été aussi rapporté que l'extrait liquide de l'algue verte *Chaetomorpha antennina* a stimulé l'émergence précoce des semences de tomate et leur pourcentage de germination tout en exerçant une influence positive sur la croissance végétative exprimée par une augmentation de la hauteur de la plante, du nombre de branches et du rendement des feuilles (Chanthini et al., 2019).

Le blé est la céréale la plus produite dans de nombreuses régions du monde, en particulier en Afrique du Nord, et est communément appelé le roi des céréales. Le blé dur est cultivé dans les régions méditerranéennes y compris en Tunisie. Il est souvent préféré au blé tendre en raison de sa tolérance à la sécheresse et sa grande adaptation à diverses conditions environnementales (Garcia Parrilla et al., 2016). Il s'agit donc d'une culture prometteuse pour les sols modérément salés des zones semi-arides (Song et al., 2005). Très peu de travaux ont étudié l'effet l'extrait algal liquide sur la culture de blé dur (Kumar et Sahoo, 2011 ; Latique et al., 2014). Il a été rapporté que l'extrait liquide de l'algue brune *Sargassum vulgare* utilisé à faible dose (0,2 %) a engendré une meilleure réponse au taux de germination associée à un temps de germination moyen plus faible (Latique et al., 2014).

Bien que les extraits d'algues utilisés en agriculture et en horticulture sont principalement préparés à partir d'algues brunes d'*Ascophyllum nodosum*, *Ecklonia maxima*, *Macrocystis pyrifera* et *Sargassum vulgare* (Hankins et Hokey, 1990 ; Blunden, 1991 ; Kavipriya et al., 2011), la présente étude consiste à étudier le potentiel biofertilisant de l'extrait liquide de la macroalgue verte *Chaetomorpha linum* en tant que biostimulant pour la germination, la croissance et le développement du blé dur *Triticum turgidum* L. subsp. *durum*.

MATERIEL ET METHODES

1. Echantillonnage de l'algue *Chaetomorpha linum*

C. linum, est une macroalgue verte filiforme, très abondante sur les côtes tunisiennes et surtout en milieux lagunaires (Ksouri et al., 1997). L'échantillonnage a été effectué sur la rive sud du lac nord de Tunis (36°49'N, 10°14'E) durant les mois de Février, Mars et Avril 2019 où la salinité est de 37-38

PSU et la température de l'eau est comprise entre 15-20°C. L'algue a été collectée à la main et transportée dans des glacières au laboratoire pour le nettoyage. Les épiphytes et les particules de sable qui sont accolés aux thalles ont été éliminés moyennant un lavage à l'eau de mer puis un lavage abondant à l'eau de robinet.

2. Préparation de l'Extrait Algal Liquide (EAL)

Après le nettoyage et l'égouttage, les thalles ont été exposés à l'air libre et à l'ombre pendant 4 jours puis séchés à l'étuve pendant 48h à 60°C. Les thalles ainsi séchés ont été ensuite broyés par un moulin à café puis tamisés afin d'éliminer une partie de leur contenu en sel. La poudre algale obtenue a été stockée dans un flacon étanche jusqu'à utilisation. L'extrait algal a été préparé en mélangeant la poudre algale avec de l'eau distillée dans un rapport de 1/20 (W/ V). Le mélange est mis dans un bain marie à 40°C pendant 30 minutes. Après refroidissement, le mélange a été filtré sur un torchon mousseline et le filtrat a été centrifugé à 10000 rpm pendant 10 min. Le surnageant est considéré comme étant 100% d'extrait algal liquide à partir duquel six concentrations différentes (0% (témoin), 1%, 3%, 5%, 8% et 10%) ont été préparées en utilisant de l'eau distillée.

La caractérisation physico- chimique de l'extrait algal liquide, tels que la salinité, le pH et la couleur, a été déterminée respectivement par un réfractomètre portable (type Aqua Medic RHS-10ATC), un pH-mètre (type Eutec Termofisher) et colorimètre ; et en éléments chimiques tels que Azote, Phosphore, Sodium, Potassium, Manganèse, Magnésium, Aluminium, Zinc, Nickel, Cobalt, Cadmium, Chrome, Cuivre et Plomb a été estimée par spectrométrie d'émission atomique-ICP.

3. Protocole expérimental

3.1. Suivi de la germination et la croissance de la graine de blé *in-vitro*

La graine utilisée dans cette étude est celle du blé dur *Triticum turgidum* L. subsp. *durum* qui est une angiosperme (Monocotylédone) appartenant à la famille de Poaceae. Afin de déterminer l'effet de l'EAL sur le développement des graines de blé dur, un essai de mise en germination a été entrepris dans les conditions de laboratoire tout en le testant sous différentes concentrations 1%, 3%, 5%, 8% et 10%.

Les graines de blé sont préalablement désinfectées dans une solution d'hypochlorite de sodium à 0,5%

pendant quelques minutes puis rincées abondamment à l'eau distillée. Les graines choisies, à peu près de même taille, sont ensuite mises à germer dans des boîtes de Petri (Ø10 cm) à raison de dix graines par boîte. Les boîtes de Petri sont tapissées par 2 papiers filtre Watman.

Après ensemencement, les graines sont arrosées une seule fois au début de l'expérience avec un volume de 15ml d'EAL de différentes concentrations (1%, 3%, 5%, 8% et 10%), selon le traitement. Quant au témoin (0% EAL), les graines ont été traitées par un volume 15ml d'eau distillée. Toutes les boîtes ont été maintenues à l'obscurité dans un incubateur où la température est fixée à 25°C. L'expérience est conduite en quintuplé (n=5) et est suivie pendant 11 jours.

Les observations quotidiennes permettent de noter les premières graines germées. Le critère de germination retenu est la sortie du coleoptile hors des téguments de la graine sur un minimum de 2 mm de longueur. Les paramètres suivis sont :

- la précocité de la germination qui correspond au taux des graines germées dès le 1^{er} jour de germination

- le taux de germination qui exprime le cumul des graines germées quotidiennement évalué après 3 jours de mise en germination.

- la cinétique de germination qui permet de mieux comprendre la signification physiologique du comportement germinatif ; le nombre de graines germées a été compté quotidiennement jusqu'au 11^{ème} jour permettant ainsi de dessiner la cinétique de germination ; la durée de germination qui représente l'intervalle de temps entre le moment où la 1^{ère} graine germe et celui où la dernière graine germe pour le même traitement a été aussi définie.

Le taux de germination est calculé en se basant sur la formule suivante :

$$Tg = \frac{N * 100}{Nt} \quad (\text{Latique et al., 2016})$$

Avec Tg : Taux de germination

N : Nombre des graines germées

Nt : Nombre total de graines semées

- La longueur du coléoptile, la longueur moyenne et le nombre des racines de la graine de blé germée ont été mesurés, après trois jours de la germination pour les différents traitements et le témoin (Fig. 1).

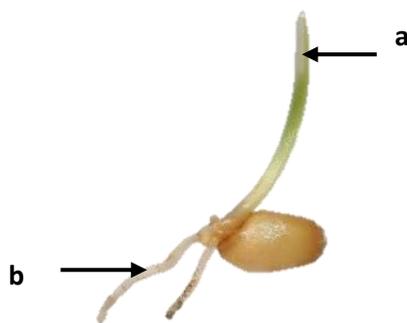


Figure 1: Graine de blé germée

a : Coléoptile ; b : Racine

Le coléoptile est un organe transitoire lors de la germination formant une gaine protectrice pointue autour des pousses émergentes (pré-feuilles) chez la graine de blé. Il atteint son maximum de développement le troisième jour de la germination.

3.2. Mise en culture dans le sol et suivi de la croissance

Dans le but de déterminer l'effet de l'EAL sur la croissance des graines de blé, une culture dans le sol a été effectuée.

Les graines saines, sélectionnées à peu près de même taille, ont été divisées en lots de 5 chacun et ont été semées dans des pots en plastique contenant 70g de sol, à une profondeur de 2,5 cm au-dessous du niveau du sol et ont été mises à germer.

Dans chaque pot, les graines ont été ensuite arrosées 2 fois par semaine avec 50 ml d'EAL à différentes concentrations (1%, 3%, 5%, 8% et 10%) selon les traitements.

Parallèlement, la culture témoin (0% EAL) est montée dans les mêmes conditions et arrosée avec l'eau distillée à la même fréquence que les traitements.

Tous les pots ont été placés à l'extérieur à température ambiante (20-25°C). L'expérience est conduite en quintuplé et est suivie pendant 42 jours.

3.3. Détermination des paramètres de croissance

Les plantes ont été sélectionnées au hasard pour la réalisation des diverses analyses. Chaque 14 jours, les plantes ont été soigneusement déracinées et nettoyées à la main pour les débarrasser du résidu de sable.

Les paramètres de croissance tels que le taux de germination, la longueur de la tige, le nombre et la longueur des feuilles, la matière fraîche et la matière sèche ont été mesurés.

La matière sèche a été déterminée par mesure de la masse de 2 plantes de blé, prises au hasard de chaque traitement, débarrassées de leurs racines et séchées à l'étuve pendant 3 jours à 60°C. La matière sèche de la culture témoin a été traitée de la même manière.

3.4. Détermination des teneurs en pigments photosynthétiques

Après l'extraction des pigments de 100 mg de fragments de feuilles fraîches, finement broyées, avec 10 ml d'acétone 80% la teneur en chlorophylle a été déterminée dans trois aliquotes indépendants et exprimées sur une base de poids frais (mg/g). Les teneurs en chlorophylle (a, b et totale) ont été calculées en appliquant les formules suivantes (Arnon, 1949) :

$$\text{Chlorophylle totale (mg/g)} = 20,2 A_{645} + 8,02 A_{663}$$

$$\text{Chlorophylle a (mg/g)} = 12,7 A_{663} - 2,69 A_{645}$$

$$\text{Chlorophylle b (mg/g)} = 22,9 A_{645} - 4,68 A_{663}$$

3.5. Analyse statistique

Tous les tests ont été répétés cinq fois. Toutes les analyses chimiques ont été effectuées en triplicate. Les résultats ont été exprimés en valeurs moyennes \pm écart-types et sont comparés par analyse de variance à un critère (ANOVA). En cas de différences significatives entre les moyennes, le test de **Duncan** est appliqué pour identifier les valeurs hétérogènes (Gomez et Gomez, 1984).

RESULTATS :

1. Caractérisation de l'extrait algal liquide de *Chaetomorpha linum*

Les propriétés physico-chimiques de l'EAL préparé à partir de la *C.linum* avant la préparation des différentes concentrations sont représentées dans le tableau I:

Tableau I : Propriétés physico-chimiques de l'EAL de *C. linum*

Paramètre	Valeur
Couleur	Brun Clair
pH	6,7
Salinité (psu)	19
Azote Kjeldahl (mg N/l)	193,69
Potassium (mg/l)	3135,60
Phosphore total (mg/l)	51,21
Sodium (mg/l)	747,60
Calcium (mg/l)	434,50
Manganèse (mg/l)	2,40
Magnésium (mg/l)	1,51
Aluminium (mg/l)	0,87
Zinc (mg/l)	0,08
Nickel (mg/l)	0,05
Cobalt (mg/l)	0,036
Cadmium (mg/l)	0,005
Chrome (mg/l)	< 0,041
Cuivre (mg/l)	< 0,026
Plomb (mg/l)	< 0,019

D'après le tableau 1, l'EAL de *C. linum* est riche en éléments minéraux. Il renferme particulièrement, des nutriments comme l'Azote, le Potassium, le Phosphore, le Sodium, le Magnésium, le Calcium, le Manganèse et le Zinc.

2. Mise en germination et croissance de la graine de blé dur *in vitro*

2.1. Précocité de germination

Dans les différents traitements à l'EAL (1%, 3%, 5% et 8%), la germination de la graine de blé dur apparaît

significativement plus précoce que celle obtenue dans la culture témoin (0% EAL) (Fig.2).

En effet, les taux de germination les plus élevés (62,5% et 57,5%) relevés dans les traitements 1% et 3% EAL représentent des valeurs environ deux fois plus importantes que celles du témoin (32,7%). Le taux de germination le plus faible (35%) est observé dans le traitement 10% EAL. Toutefois, il n'a pas été observé de différence significative entre le taux de germination dans le traitement (10% EAL) et celui déterminé dans la culture témoin (Fig.2).

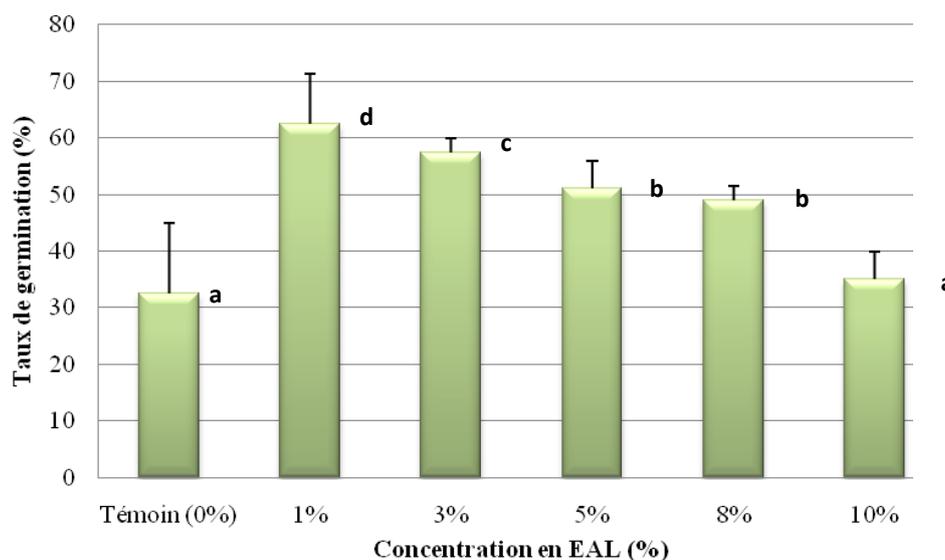


Figure 2 : Effet de l'extrait algal liquide (EAL) à différentes concentrations (0% témoin, 1%,3%,5%,8% et 10%) sur la précocité de la germination de la graine de blé (après 24h). Valeurs portant les mêmes lettres n'ont pas une différence significative au seuil $p < 0,05$.

2.2. Taux de germination

Après 3 jours, le suivi du taux de germination des graines de blé a montré son augmentation sur les différents traitements à l'EAL avec un taux maximal de 80% atteint avec le traitement d'EAL de concentration plus faible (1%) (Fig.3). La culture témoin, traitée à l'eau distillée, présente le pourcentage le plus faible (57,5%). L'extrait algal avec ses différentes concentrations présente encore un effet positif sur la germination. Le taux de

germination le plus faible (67,5%) est noté dans le traitement 10% EAL. Il n'a pas été observé de différence significative entre les taux de germination des graines de blé soumises aux différentes concentrations de 1% à 8% d'EAL. Ils ont varié entre 75% et 80%. Ainsi, le test de germination a montré qu'au cours des 3 premiers jours, environ 80% des graines de blé dur traité à l'EAL avec des concentrations comprises entre 1 et 8% ont germé (Fig.3).

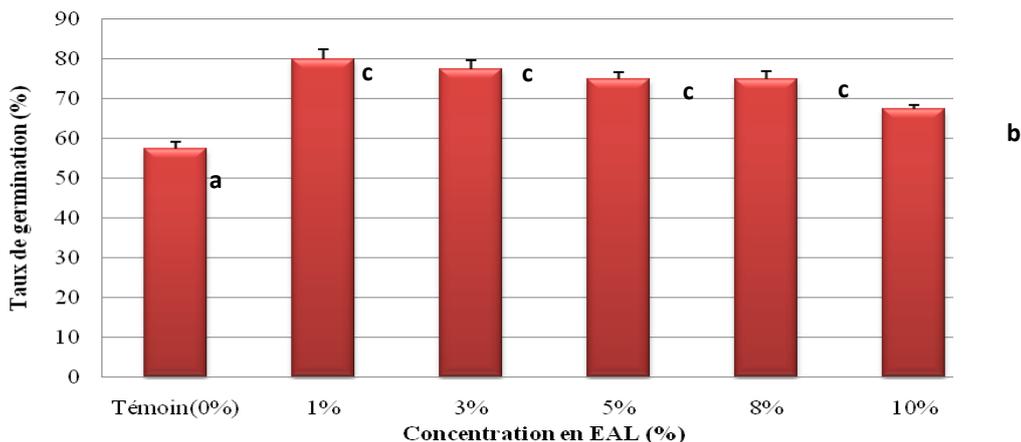


Figure 3 : Taux de germination des graines de blé après 3 jours de traitement avec l'extrait algal liquide (EAL) à différentes concentrations (0% témoin, 1%,3%,5%,8% et 10%). Valeurs portant les mêmes lettres n'ont pas une différence significative au seuil $p < 0,05$.

2.3. Cinétique de germination

Afin de définir la durée et le taux final de la germination dans les différents traitements à l'EAL, un suivi quotidien des graines de blé, jusqu'à la germination totale, a été entrepris. L'expression du taux final de la germination, paramètre

complémentaire à la durée de la germination, permettrait de mieux dissocier les réponses des graines à l'EAL.

La figure 4 met en évidence le facteur temps dans la germination des graines.

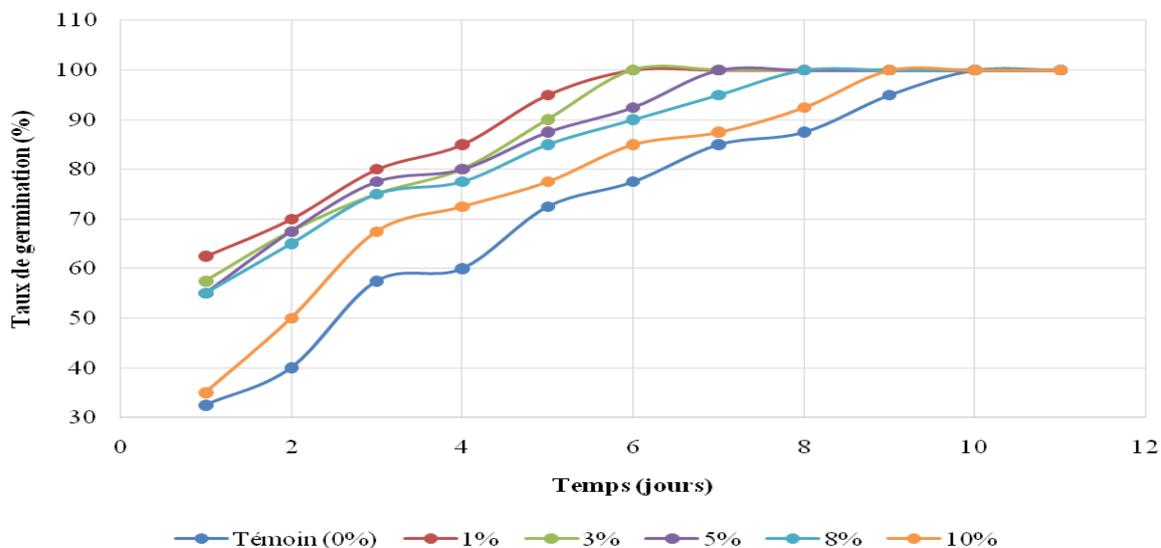


Figure 4 : Cinétique d'évolution de la germination des graines de blé au cours du temps pour les différentes concentrations en EAL (0% témoin, 1%, 3%, 5%, 8% et 10%)

2.4. Croissance de la graine de blé dur *in vitro*

Pour mieux comprendre le comportement des graines par rapport à l'extrait algal, on a mesuré, après 3 jours

de germination, la longueur du coléoptile, le nombre total des racines et leur longueur moyenne. Les résultats sont représentés dans la figure 5.

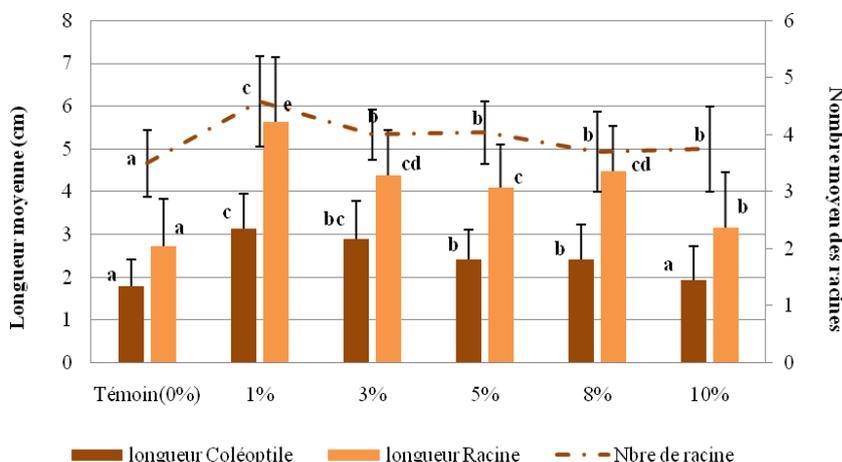


Figure 5 : Variation de la longueur du coléoptile, le nombre et la longueur des racines des graines germées dans les différents traitements en EAL (0% témoin, 1%, 3%, 5%, 8% et 10%). Valeurs portant les mêmes lettres n'ont pas une différence significative au seuil $p < 0,05$.

Les traitements par l'EAL ont montré un effet positif sur les longueurs du coléoptile et des racines ainsi que sur le nombre de racines par rapport au témoin.

Tous les organes des graines de blé étudiées ont montré une croissance significativement plus importante dans les traitements à faible concentration d'EAL (1% et 3%) que celle obtenue dans le témoin. L'effet de l'extrait liquide est très remarquable particulièrement dans le traitement (1% EAL).

La longueur du coléoptile, la longueur moyenne des racines et le nombre moyen des racines mesurés pour le traitement 1% EAL sont respectivement 75%, 107% et 31% supérieures à ceux mesurés dans le témoin (0% EAL). Toutefois, il n'y a pas de différence significative entre les valeurs mesurées dans le traitement (10% EAL) et celles dans le témoin.

3. Mise en culture en sol et suivi de la croissance

L'effet des différentes concentrations d'EAL de *C. linum* sur la croissance des différents organes des

graines de blé semées dans le sol est présenté dans le tableau II. Les paramètres de croissance, tels que les longueurs de la tige (LT) et des feuilles (LF) et le nombre des feuilles (NF), ont été observés chaque 7 jours tout au long de l'expérience (Tableau II).

Ces paramètres de croissance ont significativement augmenté dans les traitements 3% et 5% EAL plus que dans les autres traitements (1%, 8% et 10%). Tandis ce que la culture témoin a donné les valeurs les plus basses (Tableau II).

3.1. Masse sèche des plantes de blé

L'extrait liquide de *C. linum* a montré un effet stimulant de la croissance en masse de la plante de blé. Dans la plupart des cas, les masses sèches des plantes exposées aux différents traitements sont supérieures à celles du témoin, traitées à l'eau distillée. Les meilleurs résultats ont été obtenus pour les plantes traitées avec 1% et 3% ; celles-ci sont, respectivement, 27% et 19% supérieures à celles du témoin (Tableau III).

Tableau II : Effet des différentes concentrations de l'extrait algal liquide (0% témoin, 1%, 3%, 5%, 8% et 10% EAL) de *C. linum* sur les longueurs de la tige (LT) et des feuilles (LF) (en cm) et le nombre des feuilles (NF) du blé dur *Triticum turgidum* L. subsp. *durum*. Valeur moyenne \pm Ecart type ; (n=5) ; Cc : concentration ; Valeurs portant les mêmes lettres n'ont pas une différence significative au seuil $p < 0,05$

Cc EAL	14 jours			28 jours			42 jours		
	LT	NF	LF	LT	NF	LF	LT	NF	LF
0% Témoin	3,30 \pm 0,87 ^b	1,82 \pm 0,23 ^b	7,06 \pm 1,53 ^a	5,57 \pm 0,43 ^b	3,00 \pm 0,02 ^a	12,49 \pm 3,35 ^b	7,55 \pm 0,43 ^b	5,24 \pm 0,04 ^b	13,17 \pm 3,15 ^a
1%	3,01 \pm 1,09 ^a	1,83 \pm 0,15 ^b	7,94 \pm 2,81 ^b	5,33 \pm 0,58 ^a	3,08 \pm 0,36 ^a	11,81 \pm 4,38 ^a	6,96 \pm 0,75 ^a	5,28 \pm 0,28 ^b	13,80 \pm 4,50 ^b
3%	3,59 \pm 1,15 ^c	2,00 \pm 1,02 ^c	8,79 \pm 5,43 ^d	5,87 \pm 0,75 ^c	3,30 \pm 0,28 ^b	13,85 \pm 4,29 ^d	8,53 \pm 0,40 ^d	5,62 \pm 0,13 ^{bc}	15,83 \pm 3,55 ^d
5%	3,71 \pm 0,51 ^d	2,13 \pm 0,50 ^d	8,82 \pm 2,11 ^d	6,54 \pm 0,61 ^d	3,48 \pm 0,19 ^b	14,01 \pm 3,51 ^e	9,60 \pm 0,21 ^e	5,78 \pm 0,07 ^c	16,35 \pm 3,50 ^d
8%	3,46 \pm 1,17 ^{bc}	1,98 \pm 0,51 ^c	8,47 \pm 3,39 ^c	6,45 \pm 0,65 ^d	3,67 \pm 0,09 ^c	13,80 \pm 4,79 ^d	7,43 \pm 0,15 ^b	5,42 \pm 0,26 ^b	14,80 \pm 4,30 ^c
10%	2,19 \pm 0,73 ^a	1,15 \pm 0,07 ^a	7,01 \pm 3,74 ^a	5,57 \pm 0,41 ^b	3,00 \pm 0,03 ^a	13,14 \pm 4,73 ^c	7,82 \pm 1,03 ^c	4,47 \pm 0,18 ^a	14,82 \pm 3,41 ^c

Tableau III : Variation de la masse sèche (g) de la plante de blé après 42 jours de croissance dans les différents traitements à l'EAL (0% témoin, 1%, 3%, 5%, 8% et 10%). Valeur moyenne \pm Ecart type ; (n=5) ; Cc : concentration ; Valeurs portant les mêmes lettres n'ont pas une différence significative au seuil $p < 0,05$.

Cc EAL	Masse moyenne de la matière sèche (g)
0% Témoin	0,062 \pm 0,020 ^b
1%	0,074 \pm 0,004 ^e
3%	0,079 \pm 0,010 ^e
5%	0,066 \pm 0,021 ^{bc}
8%	0,069 \pm 0,001 ^c
10%	0,040 \pm 0,002 ^a

3.2. Teneur en Chlorophylle dans les plantes de blé

Les concentrations en chlorophylle a, b et chlorophylle totale dans les plantes de blé cultivées sont portées dans la figure 6. Dans tous les cas, les concentrations en chlorophylle, avec ses différentes formes, déterminées dans la plante de blé soumises

aux différents traitements sont supérieures à celles obtenues dans le témoin.

La teneur la plus élevée en chlorophylle totale dans les plantes a été enregistrée dans le traitement 1 % EAL (soit 120% plus élevé que pour témoin).

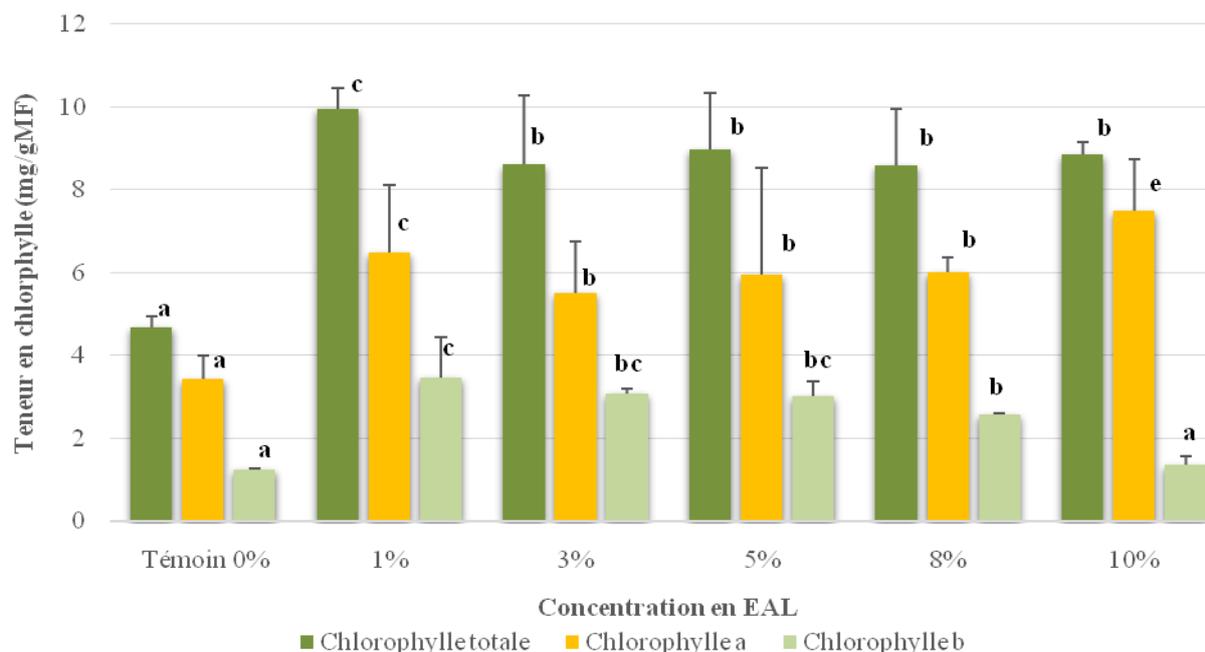


Figure 6: Variation des teneurs en chlorophylle (totale, a et b) dans la pousse de *Triticum turgidum* L. subsp. *durum* après 42 jours de culture en sol dans les différents traitements en EAL (0% témoin, 1%, 3%, 5%, 8% et 10%). Valeurs portant les mêmes lettres n'ont pas une différence significative au seuil $p < 0,05$.

DISCUSSION

Les extraits d'algues marines sont connus pour leur pouvoir de stimulation de la croissance des légumes, des fruits et d'autres cultures étant donné qu'ils contiennent des régulateurs de croissance tels que les auxines, les gibbérellines, les cytokinines, les bêtaïnes et les principaux macro et micronutriments (Blunden et al., 1991). Ainsi, les algues marines sont considérées comme des biofertilisants efficaces en agriculture (Booth, 1965 ; Bokil et al., 1974 ; Godlewska et al., 2016 ; Vijayakumar et al., 2019). Dans la présente étude, les effets de stimulation des graines de blé dur par l'EAL de la macroalgue verte *C. linum* ont été évalués en termes de germination, de croissance et de rendement de la plante. Il a été démontré que l'utilisation de l'EAL de *C. linum* stimule la germination et la croissance de la plante de blé dur *Triticum turgidum*.

Les résultats sont en accord avec les travaux antérieurs sur l'effet de l'EAL d'*Ulva reticulata* et *Chaetomorpha antennina* sur la stimulation de la croissance respectivement de la vigne *Vigna mungo* (Ganapathy et Sivakumar, 2013) et de la tomate *Lycopersicon esculentum* (Chantini et al., 2019). Aussi, la germination, la croissance et la production du blé dur *Triticum durum* ont été stimulées suite l'utilisation de l'extrait liquide de l'algue brune *Sargassum* (Kumar et Sahoo, 2011 ; Latique et al., 2014).

Les résultats ont montré que les plus faibles concentrations d'EAL (1% et 3%) ont engendré les taux de germination les plus élevés (80% et 78%) par rapport au témoin (57%) et aux concentrations d'EAL les plus élevées (5%, 8% et 10%).

Il en est de même pour la durée mise pour atteindre 100% de germination. La durée a été significativement plus courte (6 jours) pour les faibles concentrations par rapport à celle du témoin et des autres concentrations d'EAL les plus élevées (10 jours).

Latique et al (2014) ont démontré que les semences de *Triticum durum* traitées avec l'extrait liquide de *Sargassum vulgare* à la plus faible concentration testée (0,2 %) ont engendré une meilleure réponse au taux de germination associée à un temps de germination moyen plus faible et par conséquent une plus grande vigueur des semis et une plus grande longueur de radicule.

Kalaivanan et Venkatesalum (2012) ont également rapporté que 100% de la germination des pépins de *Vigna mungo* (L.) Hepper a été observée avec ou pour la plus faible concentration d'extrait de *Sargassum myriocystum* (20%). Toutefois, 100% de la germination des pépins de *Vigna mungo* a été réalisée avec une concentration encore plus faible (2,5%) d'extrait d'*Ulva reticulata* (Ganapathy et al., 2013). L'augmentation du pourcentage de germination à de faibles concentrations peut être due à la présence de substances favorisant la croissance telles que des

macro et micro-éléments ainsi que des régulateurs de croissance (Challen et Hemingway, 1965).

La caractérisation physicochimique d'EAL de *C. linum* a permis de constater que les valeurs obtenues sont comparables à celles rapportées pour l'EAL préparé à partir d'*Ulva reticulata* qui présente aussi un pH neutre (Ganapathy et Sivakumar, 2013).

De point de vue qualitatif, plusieurs études se sont intéressées à la composition chimique des extraits algaux afin de les utiliser comme fertilisant pour différentes plantes. Sivasankari et al (2006) ont démontré que les EAL de *Sargassum wightii* et *Caulerpa chemnitzia* des côtes indiennes, ont la même composition en minéraux à des proportions légèrement différentes. Divya et al (2015) ont également confirmé la présence de ces mêmes éléments chimiques dans la composition de l'extrait d'algue *Ulva lactuca* avec des teneurs moins importantes que l'extrait préparé dans la présente étude. La différence observée dans la composition des EAL pourrait être justifiée par le procédé d'extraction de l'EAL ou par la variation de la composition biochimique de l'espèce d'algue à l'origine qui à son tour varie en fonction de plusieurs facteurs biotiques et abiotiques.

Les algues contiennent tous les oligo-éléments et les hormones de croissance dont les plantes ont besoin. Kingman et Moore (1982) ont signalé que le fumier d'algues marines est riche en potassium mais pauvre en azote et en phosphore.

Dans la présente étude, la longueur du coléoptile, la longueur et le nombre des racines, le poids des pousses ont atteint leurs maximums avec les traitements 1 % et 3%, alors que les valeurs les plus faibles ont été enregistrées avec les concentrations de 5 %, 8% et 10% d'EAL. Toutefois, dans la culture en sol, le traitement des graines de blé *Triticum turgidum* avec l'extrait de faible concentration (3% et 5%) stimule mieux la croissance des différents organes que les extraits à plus fortes concentrations (8% et 10%). Nos résultats concordent avec d'autres enregistrés antérieurement. Ainsi, Crouch et Van Staden (1992) ont montré que l'extrait algal liquide d'*Ecklonia maxima* stimule la croissance des racines de tomate à une concentration de 0,4% . Latique et al (2014) ont aussi démontré que l'extrait liquide de *Sargassum vulgare*, à la plus faible concentration testée (0,2 %) a engendré une meilleure croissance de la radicule et des racines de *Triticum durum* traitées. Toutefois, une concentration de 20% de l'extrait algal liquide de *Sargassum wightii* a engendré le meilleur taux de germination, de croissance et de production de *Triticum aestivum* (Kumar et Sahoo, 2011).

Ceci est conforme aussi avec les résultats de Vijayakumar et al., (2019) obtenus suite à l'application de la concentration la plus faible (20%) de l'extrait algal liquide de *Codium decorticatum* qui

a engendré la germination maximale des graines de piment *Capsium annum* ainsi qu'une augmentation significative du poids frais, du poids sec, de la longueur des racines et des pousses, du nombre de branches, de la surface foliaire, du nombre de gousses et des teneurs en chlorophylle totale, chl a et chl b des pousses.

L'amélioration de la croissance végétative peut être liée aux composants de l'algue tels que les macro et micronutriments, les acides aminés, les vitamines, les cytokinines, les auxines, et les substances de croissance abscisiques (ABA) affectant le métabolisme cellulaire des plantes traitées menant à l'amélioration de la croissance et du rendement des cultures (Crouch et van Staden., 1992; Crouch et van Staden., 1993 ; Reitz et Trumble, 1996; Durand et al., 2003 et Stirk et al., 2003).

Dans la présente étude, les concentrations en chlorophylle (totale, a et b) des plantes de *Triticum turgidum* traitée par les différentes concentrations d'EAL ont été significativement plus élevées que dans le témoin. La teneur la plus élevée en chlorophylle a été enregistrée dans le traitement 1 % EAL (120% plus élevé que dans témoin). Michalak et Chojnacka, (2013) ont rapporté qu'une teneur élevée en éléments tels que Mg, Fe et Cu dans les algues de la Baltique et par conséquent dans leurs extraits et également la présence de bêtaïne, qui participe à la production de la chlorophylle dans les feuilles (Whapham et al., 1993), sont liées à l'effet stimulant sur la synthèse de la chlorophylle. Les résultats de cette étude ont montré que l'EAL de *C. linum*, grâce à sa composition riche en minéraux, a stimulé la productivité de la plante tout en augmentant la teneur en chlorophylle.

Les effets négatifs d'une concentration accrue d'extraits d'algues marines sur la croissance végétative des plantes peuvent être attribués à la présence d'hormones régulatrices ou à des niveaux élevés de minéraux. Le stress salin est un facteur défavorable important qui peut réduire la germination des graines et la croissance des semis, ce qui entraîne une réduction de la croissance des plantes (Latique et al., 2014). La sensibilité de la graine de blé à la salinité de l'EAL peut expliquer le retard dans le démarrage de la germination qui se manifeste par ailleurs sur la durée de la germination et la croissance des différents organes de la plante de blé. La réponse des graines ne semble signifier qu'avec l'augmentation de la concentration en sels ; un phénomène d'intoxication apparaît, résultant certainement d'une accumulation de Na⁺ dans l'embryon (Guerrier, 1983) provoquant une inhibition osmotique (Bliss et al., 1986 ; Belkhdja et Soltani, 1992). Toutefois, les différences observées dans la germination résultant vraisemblablement non seulement de l'effet NaCl mais aussi de l'action spécifique du cation Ca⁺⁺. Les sels de calcium sont

connus pour stimuler la germination de la fève *Vicia faba* L. (Belkhdja et Sotani, 1992). En outre, la présence de Ca^{++} réduit la sensibilité des graines au stress salin en augmentant le taux de germination et en empêchant les effets inhibiteurs du NaCl (Marcar, 1986).

CONCLUSION

Les résultats de ce travail ont montré que les plus faibles concentrations de l'extrait liquide de *Chaetomorpha linum* ont engendré les meilleurs taux de germination et la croissance des différents organes du blé dur *Triticum turgidum*. Ces résultats soutiennent le potentiel bio-stimulant d'EAL de *C. linum* qui peut être utilisé comme un bio-fertilisant économique, renouvelable, efficace et écologique, et peut également être considéré comme un catalyseur potentiel pour l'amélioration de la production alimentaire agricole durable. En outre, l'extrait d'algue, avec une teneur élevée en composés biologiquement actifs, peut trouver son application future dans diverses industries.

Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier Mme Soumaya Herry, enseignante à Institut Supérieur des Sciences et Technologies de l'Environnement de Borj-cédria (Tunisie), pour sa collaboration et son soutien technique dans la réalisation de la culture en sol.

BIBLIOGRAPHIE

- Abetz P., 1980. -Seaweed extracts have they a place in Australian Agriculture or Horticulture. *J. Aus. Ins. Agri. Sci.*, 46: 23 - 29.
- Arno D.I., 1949. Copper enzymes in isolated chloroplasts. Polyphenoloxidase in *Beta vulgaris*. *P. Physiol.*, 24(1):1-15.
- Baloch G.N., Tariq S., Ehteshamul-Haque S., Athar M., Sultana V., Ara J., 2013. -Management of root diseases of eggplant and watermelon with the application of asafoetida and seaweeds *J. Appl. Bot. Food Qual.*, 86:138-142
- Belkhdja, M., Soltani, N., 1992. -Réponses de la fève (*Vicia faba* L.) à la salinité : étude de la germination de quelques lignées à croissance déterminée. *Bull. Soc. Bot. de France. Let. Bot.*, 139(4-5), 357-368.
- Bliss R.D., Platt-Aloia K. A., Thomson W.W., 1986. -The inhibitory effect of NaCl on barley germination. *P. Cell. Environ.* 9 (9):727- 733.
- Blunden G., 1991. -Agricultural uses of seaweeds and seaweed extracts. In: Guiry M.D. et Blunden G. (eds) *Seaweed resources in Europe: Uses and potential*. Wiley, Chicester, pp: 65- 81.
- Bokil K.K., Mehta V.C., Datar D.S., 1974. -Seaweeds as manure: II- Pot culture manorial experiments on wheat. *Phykos*, 13:1-5.
- Booth E., 1965. -The manural value of seaweed, *Bot Mar.* 8: 138-143.
- Brimmer T., Boland G.J., 2003. -A review of the non-target effects of fungi used to biologically control plant diseases. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 100, pp. 3-16.
- Challen S.B., Hemingway J.C., 1965. -Growth of higher plants in response to feeding with seaweed extracts. *Proc. Int. Seaweed Symp.*, 5:359-367.
- Chanthini K. M.P., Sengottayan S.N., Vethamonickam S.R., Annamalai Th., Sengodan K., Haridoss S., Narayanan Sh.S., Radhakrishnan P., Ramaiah S., 2019. *Chaetomorpha antennina* (Bory) Kützing derived seaweed liquid fertilizers as prospective bio-stimulant for *Lycopersicon esculentum* (Mill). *Biocatal. Agricul. Biotech.*, (20)1-9.
- Crouch, I.J., Van Staden J., 1992. -Effect of seaweed concentrate on the establishment and yield of greenhouse tomato plants. *J. Appl. Phycol.*, 4(4), 291-296.
- Crouch, I.J., Van Staden J., 1993. -Evidence for the presence of plant growth regulators in commercial seaweed products. *Plant Growth Regulation*, 13(1), 21-29.
- Divya D., Gopinath, L. R., Merlin Christy P., 2015. - A review on current aspects and divers prospects for enhancing biogas production in sustainable means. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 42, 690-699.
- Durand N., Briand X., Meyer C., 2003. -The effect of marine bioactive substances (N PRO) and exogenous cytokinins on nitrate reductase activity in *Arabidopsis thaliana*. *Physiol. Plant*, 119:489-493.
- Galal H.R.M., Salem W.M., Naser El-Deen F., 2011. -Biological control of some pathogenic fungi using Marine Algae Extracts. *Res. J. Microbiol.*, 6, 645-657.
- Galbiattia, J.A., Cavalcantea, I.H.L., Ribeiroa, A.G., Pissarraa, T.C.T., 2007. Nitrate and sodium contents on lettuce and drained water as function of fertilizing and irrigation water quality in Brazil. *Int. J. Plant Prod.* 1, 205-214.
- Ganapathy Selvam G., Sivakumar K., 2013. -Effect of foliar spray from seaweed liquid fertilizer of *Ulva reticulata* (Forsk.) on *Vigna mungo* L. and their elemental composition using SEM-energy dispersive spectroscopic analysis. *Asian Pac. J. Reprod.* 2(2): 119-125.
- Ganapathy Selvam G., Balamurugan M., Thinakaran T., Sivakumar K., 2013. -Developmental changes in the germination, growth and

- chlorophyllase activity of *Vigna mungo* L. using seaweed extract of *Ulva reticulata* Forsskål. *Int. Res. J. Pharma* 4, 252-254.
- Godlewska K., Michalak, I., Tuhy, Ł., Chojnacka K., 2016. Plant Growth Biostimulants Based on Different Methods of Seaweed Extraction with Water. *BioMed Res. Intern.* (4):1-11.
- Gomez K.A., Gomez A.A., 1984. -Statistical procedures for agricultural research (2 ed.). John Wiley and sons, NewYork, 680p.
- Guerrier G., 1983. -Germination de plantes maraichères et oléagineuses en présence de NaCl. *Seed Sci. Technol.*, 11: 281-292.
- Hankins S. D., Hockey H. P., 1990. -The effect of liquid seaweed extract from *Ascophyllum nodosum* (Fucales, Phaeophyta) on the two spotted red spider mite *Tetranychus utricae*. *Hydrobiol.*, 204 (205): 555 – 559.
- Haroun B.M., Sharaf A.M., Ibraheem B., 1995. - Evaluation of natural productions in some common Egyptian marine algae. *J. Union Arab. Biol. B Botany*, 2:137-153.
- Kalaivanan, C., Venkatesalu V., 2012. -Utilization of seaweed *Sargassum myriocystum* extracts as a stimulant of seedlings of *Vigna mungo* (L.) Hepper. *Spanish J. Agricult. Res.*, 10 (2): 446-470.
- Kavipriya, R., Dhanalakshmi P. K., Jayashree S., Tanga Raju N., 2011. -Seaweed extract as a biostimulant for legume crop, green gram. *J. Eco. Biotech.* 2011; 3 (8): 16- 19.
- Kingman A. R., Moore J., 1982. -Isolation, Purification and Quantitation of Several Growth Regulating Substances in *Ascophyllum nodosum* (Phaeophyta). *Bot. Mar.*, 25, (4) :149–154.
- Ksouri J., Ben said R. et Beji O., 1997. -Evaluation des potentialités qualitatives naturelles des gracilaires (Algues rouges) du lac nord de Tunis. *Bull. Inst. Nat. Scien.Tech.Mer*, 24(1): 15-25.
- Kumar G., Sahoo D., 2011. -Effect of seaweed liquid extract on growth and yield of *Triticum aestivum* var. *Pusa Gold*. *J. Appl. Phycol.*, 23(2): 251–255.
- Latique S., Elouaer M. A., Chernane H., Hannachi Ch., Elkaoua M., 2014.- Effect of Seaweed Liquid Extract of *Sargassum vulgare* on Growth of Durum Wheat Seedlings (*Triticum durum* L) under salt stress. *Inter. J. Innov. Appl. Studies* 7 (4):1430-1435
- Marcar N.E., 1986. -Effect of calcium on the salinity tolerance of wimmera ryegrass (*Lolium rigidum* Gaud, CV Wimmera) during germination. *Plant and Soil*, 93:129-132.
- Metha V.C., Trivedi B.S., Bokil K.K., Narayana, M.R., 1967. -Seaweed as manure, studies on nitrification. *Proc. Semi. Sea. Salt and Plants (CSMCR)*. Bhavnagar, pp. 357–365.
- Michalak I., Chojnacka K., 2013. -Use of extract from Baltic seaweeds produced by chemical hydrolysis in plant cultivation. *Przemysł Chemiczny*, 92(6): 1046–1049.
- Michalak I., Chojnacka K., 2015. -Algae as production systems of bioactive compounds. *Engineering in life Sciences* 15(2):160-176.
- Mišurcová L., 2011. -Chemical Composition of Seaweeds. In S-K Kim, ed, Handbook of Marine Macroalgae. John Wiley & Sons, Ltd, 171–192.
- Reitz S. R., Trumble J. T., 1996. -Effects of Cytokinin-Containing Seaweed Extract on *Phaseolus lunatus* L.: Influence of Nutrient Availability and Apex Removal. *Bot. Mar.*, 39:1-6.
- Sivasankari, S., Venkatesalu, V., Ananthara, M., Chandrasekaran, M. 2006- Effect of seaweed extracts on the growth and biochemical constituents of *Vigna sinensis*. *Biores.Technol.*, 97: 1745– 1751.
- Strik W. A., Novak M.S., Van Staden J., 2003. - Cytokinins in macroalgae. *Plt. Growth Regul.* 41: 13 - 24.
- Sylvia S., Baluswami M., Vijaya Parathasarathy M.D., Krishnamurthy V., 2005. -Effect of liquid seaweed fertilizers extracted from *Gracilaria edulis* (Gmel.) Silva, *Sargassum wightii* Greville and *Ulva lactuca* Linn. on the growth and yield of *Abelmoschus esculentus* (L) Moench. *Indian Hydrobiol*, 7: 69-88.
- Thivy F., 1961. -Seaweed manure for perfect soil and soiling Welds. *Salt Res. Indust.* 1, 1-4.
- Vijayakumar S., Durgadevi S., Arulmozhi P., Rajalakshmi S., Gopalakrishnan T., Parameswari N., 2019. -Effect of seaweed liquid fertilizer on yield and quality of *Capsicum annum* L. *Acta Ecol. Sinica* , 39(5):406-410.
- Whapham C.A., Blunden G., Jenkins T., Hankins S.D., 1993. -Significance of betaines in the increased chlorophyll content of plants treated with seaweed extract. *J.Appl. Phycol.*, 5(2):231–234.
- Zhang X., Ervin E. H., 2004. -Cytokinin containing seaweed and humic acid extracts associated with creeping bent grass leaf cytokinins and drought resistance. *Crop Sci.* 44: -10.
- Zhang X., Schmidt R. E., 1997. -The impact of growth regulators on the α – tocopherol status in water – stressed *Poa pratensis* L. *Int. Turfgrass Res. J.*, 8:1364 - 1373.
- Zodape S.T., Mukherjee S., Reddy M.P., Chaudhary D.R., 2009. -Effect of *Kappaphycus alvarezii* extract on grain quality, yield and some yield

- components of wheat (*Triticum aestivum* L.).
Int J Plant Prod,3: 97 - 101.
- Garcia Parrilla T., Chrétien F., Desclaux D., Trouche G., 2016.- La construction d'un bien commun à travers une démarche de sélection participative : le cas du blé dur adapté à l'AB.
Rev. Assoc. Française Agr/Agronomie : Environnement et Société 6(2) pp : 81.
- Song J.I.H., Feng G.U., Changyan T., Fusuo, Z., 2005.- Strategies for adaptation of *Suaeda Physophora*, *Haloxylon ammodendron* and *Haloxylon persicum* to a saline environment during seed-germination stage," *An. Bot.* 96: 399-405