

Vers une culture durable de l'algue rouge *Gracilaria gracilis* en Tunisie

Rafik Ben Said, PhD

Nouha Mathlouthi

Institut National des Sciences et Technologies de la Mer (INSTM)

Laboratoire d'Aquaculture, Tunisie

[Doi:10.19044/esj.2024.v20n36p176](https://doi.org/10.19044/esj.2024.v20n36p176)

Submitted: 24 October 2024
Accepted: 03 December 2024
Published: 31 December 2024

Copyright 2024 Author(s)
Under Creative Commons CC-BY 4.0
OPEN ACCESS

Cite As:

Ben Said R. & Mathlouthi N. (2024). *Vers une culture durable de l'algue rouge Gracilaria gracilis en Tunisie*. European Scientific Journal, ESJ, 20 (36), 176.

<https://doi.org/10.19044/esj.2024.v20n36p176>

Résumé

Objectifs : Ce travail a pour objectifs l'étude de l'effet de l'intensité lumineuse et de la photopériode sur la croissance de l'algue rouge *Gracilaria gracilis* au laboratoire et après transplantation dans la lagune de Bizerte, la détermination du rendement d'agar et l'évaluation de sa qualité.

Méthodologie et résultats : Une culture expérimentale au laboratoire a été réalisée sur des boutures ayant un poids initial d'environ 1 g, sous différentes intensités lumineuses et photopériodes. Après 10 semaines, les boutures ont été transplantées dans la lagune de Bizerte. Au bout de deux mois, l'extraction de l'agar-agar a été effectuée sur les algues cultivées. Les principaux résultats ont montré que la croissance optimale des boutures cultivées au laboratoire a été obtenue sous l'intensité lumineuse 1500 Lux et la photopériode 16 h : 8h (lumière/obscurité) ($4,55 \pm 1,20$ g). Après leur transplantation, le poids des touffes d'algues a varié entre 150 g et 800 g. Le rendement d'extraction d'agar-agar a fluctué entre 14 % et 15 % du poids sec. La force de gel maximale a atteint 190 g cm^{-2} . Le point de gélification et le point de fusion ont varié entre 38°C et 45 °C et 78°C et 97 °C, respectivement.

Conclusion et application des résultats : Les résultats obtenus permettraient l'intensification de la culture des boutures en laboratoire, puis leur transplantation en milieu naturel. Ainsi, les biomasses des algues cultivées peuvent être augmentées, les stocks naturels et la biodiversité y est liée, le tout préservé. En outre, la phycoculture permettrait l'extraction de différents produits d'intérêt, en particulier les

phycocolloïdes, tels que l'agar-agar, les pigments, tels que la R-phycoérythrine et autres métabolites secondaires, etc. De cette façon, une assise d'économie durable à base d'algoculture et qui respecte en même temps l'environnement, pourrait être fondée en Tunisie.

Mots-clés: Algues marines, culture, boutures, croissance, agar-agar

Towards a sustainable cultivation of the red alga *Gracilaria gracilis* in Tunisia

Rafik Ben Said, PhD

Nouha Mathlouthi

Institut National des Sciences et Technologies de la Mer (INSTM)

Laboratoire d'Aquaculture, Tunisie

Abstract

Objectives: This study aims at providing information on the effect of light intensity and photoperiod on the growth of the red alga *Gracilaria gracilis* in the laboratory and after the transplantation in Bizerte lagoon, agar yield, and quality. **Methodology and results:** A cultivation trial was undertaken on cuttings/fragments (1g each) in the laboratory under different light intensities and photoperiods. After 10 weeks of cultivation period, the cuttings have been transplanted in Bizerte lagoon. After the cultivation period, agar was extracted to evaluate its yield and quality. Results showed that the optimal growth in the laboratory was recorded with 1500 Lux and a photoperiod of 16 h: 8h (Light/dark cycle) (4, 55±1,20g). After transplantation of the cuttings, the weight of seaweeds ranged from 150 g to 800 g after 2 months of cultivation. Agar yield ranged from 14 % to 15 % of dry weight. Gel strength reached 190 g.cm⁻². Gelling temperature and melting temperature varied between 38°C and 45°C and 78°C and 97 °C, respectively. **Conclusion and application of results:** Results obtained may allow the intensification of cuttings cultivation in the laboratory and then after the transplantation in a natural medium to increase the biomass of farmed seaweeds, on the one hand, to avoid the breakdown of wild stocks, and to preserve the biodiversity of the ecosystem, on the other hand. Moreover, seaweed cultivation may allow the extraction of several interesting products, especially the phycocolloids, such as agar-agar, pigments, such as the R-phycoerythrine, and other secondary metabolites. Thus, a sustainable eco-friendly economic seating of seaweed farming could be founded in Tunisia.

Keywords: Seaweed, farming, cuttings, growth, agar-agar

Introduction

Les algues sont utilisées à l'échelle mondiale dans différents domaines, tels que l'alimentation humaine et animale, l'agriculture, les industries pharmaceutiques et cosmétiques (Rebours et al. 2014, Ammar et al. 2022). La production totale des algues et autres végétaux marins a atteint 36 millions de tonnes en 2020, dont 35,1 millions de tonnes provenant de l'aquaculture (FAO,2022). L'intérêt porté aux algues et à leur valorisation, par la culture et l'extraction des phycocolloïdes, en particulier l'agar-agar, est connu depuis longtemps dans plusieurs pays. Parmi ces derniers, on peut citer la Chine, le Viêt-Nam, la Corée, les Philippines, l'Indonésie, l'Inde, le Chili, l'Argentine et le Brésil (Gonzalez-Leija et al.2009, Martin et al. 2013, Veeragurunathan et al. 2019). Différentes techniques de culture sont utilisées de par le monde. Elles sont basées essentiellement sur la reproduction végétative, par bouturage pour certains genres, tels que *Kappaphycus*, *Eucheuma* et *Gracilaria* et par voie sexuée pour d'autres, telles que *Laminaria*, *Porphyra* (*Pyropia*) et *Undaria*. La technique de transplantation des plantules d'algues d'un milieu contrôlé en laboratoire ou en « nursery » vers la mer est connu pour plusieurs espèces, après un certain temps de culture à partir de spores, telles que *Laminaria* (*Saccharina*) *japonica*, *Pyropia* *tenear* et *Undaria* *pinnatifida*. Cette technique est bien documentée dans la littérature (Khan et al. 2024). Par ailleurs, des expérimentations fructueuses sur la transplantation de la phanérogame *Posidonia oceanica* (Nieri et al. 1991) et de l'algue brune *Cystoseira* ont été effectuées avec succès pour repeupler et restaurer certaines zones qui ont vu ces algues disparaître, notamment au sud de la France (Trougan et al. 2021). Cependant, la culture de petites boutures -obtenues à partir de thalles mères vivant dans la nature, pendant un certain moment en laboratoire puis leur la transplantation en milieu naturel- n'a été pas, à notre modeste connaissance, pratiquée auparavant. En Tunisie, les algues marines comptent plus de 400 espèces différentes (Ktari et Langar, 2004). Parmi les plus recherchées figurent les algues rouges appartenant au genre *Gracilaria*, dont la production mondiale a atteint plus que 5 millions de tonnes en 2020 (FAO,2022). Cependant, la Tunisie n'en produit que 79 T (D.G.P.A,2019), provenant d'une seule société implantée dans la lagune de Bizerte depuis 2018. Il est important de signaler que les gracilaires sont dotées d'un produit très prisé, qui est l'agar-agar. Ce phycocolloïde est utilisé dans différents domaines, en particulier les industries agro-alimentaires, les laboratoires bactériologiques, pharmaceutiques, cosmétiques, etc. En Tunisie, l'intérêt porté à la culture et la valorisation des végétaux marins, d'une façon générale et aux algues en particulier, a débuté il y a environ vingt-cinq ans (Ksouri et al. 1999, 2000 ; Ben Said et Ksouri,1999). Récemment, d'autres recherches ont été réalisées sur la culture et l'étude de l'agar-agar extrait, en plus de la composition biochimique de *Gracilaria gracilis* (Ben Said et al. 2018 ; Mensi

et al. 2020). Toutefois, la culture des boutures de *Gracilaria* en laboratoire, puis leur transplantation en milieu naturel, n'ont pas fait l'objet de travaux de recherche antérieurs en Tunisie. Pour cette raison, ce travail a pour objectif de cultiver les boutures ayant un faible poids (de l'ordre de 1g) dans des conditions contrôlées, puis les transplanter dans le milieu naturel (la lagune de Bizerte) afin d'avoir des biomasses appréciables qui permettent d'extraire plusieurs produits d'intérêt, notamment l'agar-agar.

Méthodes

Zone de récolte et de culture

La zone de récolte de l'algue rouge *Gracilaria gracilis* (= *G. verrucosa*) est située dans la lagune de Bizerte (37°,22' 66 N ,10°,19' 41" E). La collecte a été effectuée à la main, en Février 2018, entre 0 et 1 mètre de profondeur, en face de Menzel Jemil (Figure 1).



Figure 1 : Site de collecte de *Gracilaria gracilis* (= *G. verrucosa*) : La lagune de Bizerte

Méthodes

Culture au laboratoire

Après leur récolte, les thalles de *Gracilaria gracilis* (Figure 2) ont été transportés vers le laboratoire à INSTM, centre de Kheireddine où ils ont été soigneusement lavés et nettoyés par l'eau de mer pour éliminer les épiphytes, les impuretés, ainsi que les petits animaux qui y adhèrent tels que les vers, les mollusques et les anémones. Au cours de la première étape de culture, les thalles de *Gracilaria* ont été sectionnés et fragmentés en petites boutures ayant un poids initial de 1g. Le pesage a été effectué à l'aide d'une balance électronique de précision de type Bosch. Par la suite, les petites boutures ont été placées dans un erlenmeyer contenant 500 ml de milieu de culture. Ce dernier est celui de Walne (Boulot, 1985), mais légèrement modifié selon Ben Said (1994). Les boutures ont été cultivées sous trois intensités lumineuses

différentes (500, 1000 et 1500 Lux) et trois photopériodes (8h :12h ,12h :12h et 16 h :8h ; lumière/obscurité). La lumière (blanche) est fournie par des tubes néon de type L 18W/10. L'intensité lumineuse a été mesurée à l'aide d'un luxmètre (LT Lutron LX-107 Light Meter) et la photopériode a été réglée à l'aide d'une horloge coupe-circuit. La culture des algues a été réalisée dans une salle climatisée où la température a été fixée entre 20 et 22°C. Cette température est proche de celle qui règne généralement dans la lagune de Bizerte pendant cette période. Les erlenmeyers contenant les boutures sont bien aérées à l'aide de pompes à air d'aquarium afin d'assurer l'agitation de l'eau, apporter le CO₂ et favoriser, par conséquent la bonne croissance des algues. Le suivi de la croissance pondérale des boutures, ainsi que le renouvellement du milieu de culture, ont été effectués d'une façon hebdomadaire. Pour chaque condition de culture, trois réplicas ont été utilisés durant l'expérience.



Figure 2 : Thalle de l'algue rouge *Gracilaria gracilis* (*G. verrucosa*) de la lagune de Bizerte

Transfert des plantules vers le milieu naturel : la lagune de Bizerte

Après avoir passé 10 semaines de culture dans le laboratoire, les petites plantules cultivées ayant un poids allant de 2 à 4 g ont été transplantées dans la lagune de Bizerte, en face de Menzel Jémil, afin de poursuivre leur croissance dans leur milieu naturel d'origine. Les plantules ont été cultivées dans des poches de filets de 1 cm de côté de maille et fixées à une corde tendue entre deux piquets, à une profondeur de 0,5 m à 1 m. La culture a duré deux mois : à partir de 22 mai jusqu'à 20 juillet 2018. Au cours de cette période, le poids des touffes d'algues a été mesuré deux fois successives : le 20 juin et le 20 juillet. Le taux de croissance journalier, aussi bien en laboratoire qu'en milieu naturel, est calculé selon la formule suivante :

TCJ ou TCS (%j⁻¹) = 100* (Ln (P_f/P_i) /T), où P_i : Poids initial, P_f : Poids final et T : durée de culture en jours (Munoz *et al.*,2004).

Extraction de l'agar-agar et étude de la qualité

Les échantillons d'algues de *Gracilaria gracilis*, utilisés pour l'extraction de l'agar-agar, proviennent des cultures des petites boutures qui ont été cultivées au préalable au laboratoire, puis transplantées dans la lagune de Bizerte. L'extraction de l'agar-agar a été réalisée selon la méthode décrite par Ben Said et al. (2018), mais modifiée. Les modifications ont porté essentiellement sur l'ajout du 2-propanol dans le processus afin d'étudier l'effet de la concentration d'alcool sur le rendement et la qualité du produit obtenu, à savoir la force de gel, le point de gélification et le point de fusion. Dans ce cadre, trois concentrations différentes (2%,4% et 8%) ont été testées, en plus du témoin (0%). A cet effet, la procédure décrite par Ben Said et al. (2011) et Ben Said et al. (2018) a été suivie. Trois réplicas ont été utilisés pour l'étude du rendement et de la qualité de l'agar obtenu.

Analyse statistique

Les résultats ont été exprimés en moyennes ± écart-type. L'analyse statistique a été réalisée à l'aide d'un logiciel SPSS version 20.0. Pour l'étude de la croissance pondérale des algues dans les conditions de laboratoire, l'analyse de la variance à deux facteurs (intensité lumineuse et photopériode) a été appliquée pour étudier l'effet de ces facteurs et détecter s'il y a une différence entre les moyennes. La comparaison multiple des moyennes a été réalisée à l'aide de test de Tukey. Pour l'étude de la qualité d'agar-agar, l'analyse de la variance à un facteur (la concentration de 2-propanol) a également été utilisée. Par ailleurs, nous avons cherché s'il existe une corrélation entre les différents paramètres étudiés : rendement d'extraction, force de gel, point de gélification et point de fusion (Corrélation de Pearson). Le seuil de signification retenu est 5%.

Résultats

Culture au laboratoire

- ***Photopériode 8h :16 h (lumière/ obscurité)***

Pour les boutures de *G. gracilis* cultivées sous la photopériode 8 h :16 h (lumière/ obscurité), la valeur maximale du poids à la fin de l'expérience a été enregistrée sous l'intensité lumineuse la plus forte (1500Lux), soit 2,74 ± 0,09 g, tandis que la valeur la plus faible a été obtenue chez les boutures cultivées sous l'intensité lumineuse 1000 Lux, soit 1,62 ± 0,65g. Concernant le taux de croissance journalier, les valeurs maximales de TCJ (Figure 3) ont été enregistrées pendant la première semaine. Par la suite ces valeurs ont

diminué au cours du temps. La valeur la plus élevée a été observée pendant cette période, sous l'intensité lumineuse 1000 Lux ($2,40 \pm 0,09 \% j^{-1}$).

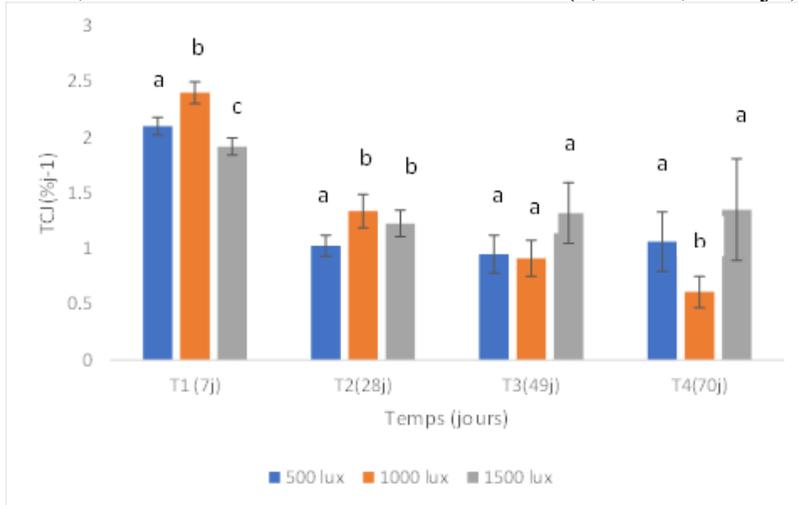


Figure 3 : Taux de croissance journalier des boutures de *Gracilaria gracilis* sous la photopériode 8 : 16 (Les lettres différentes indiquent qu'il y a une différence significative entre les moyennes à un seuil de 5%)

- **Photopériode 12h :12 h (lumière/ obscurité)**

La valeur maximale du poids des boutures de *G. gracilis* a été obtenue après 10 semaines de la culture, sous l'intensité lumineuse 1500 Lux ($4,04 \pm 0,55g$), suivie par l'intensité 500 Lux puis 1000 Lux. Le TCJ maximal a été enregistré à T2 (28j) et sous l'intensité lumineuse 500 Lux ($2,27 \pm 0,33 \% j^{-1}$), puis cette valeur a diminué à T3 (49 j). Sous les autres intensités lumineuses, le TCJ a été faible au début, puis il a augmenté au cours du temps (Figure 4).

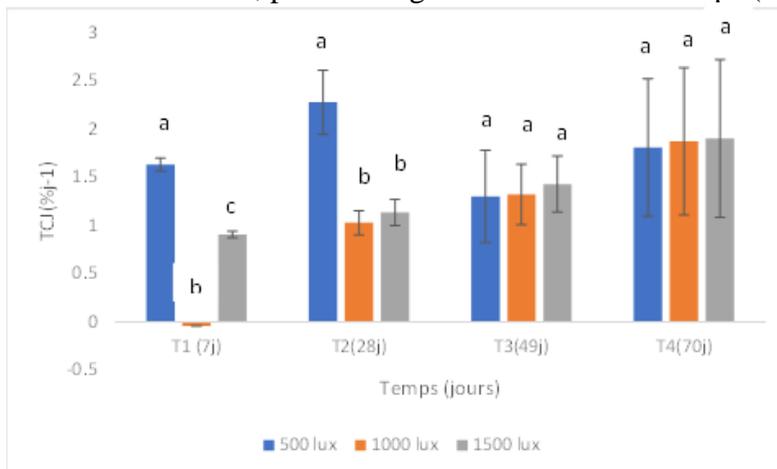


Figure 4 : Taux de croissance journalier des boutures de *Gracilaria gracilis* sous la photopériode 12 : 12 (Les lettres différentes indiquent qu'il y a une différence significative entre les moyennes à un seuil de 5%)

- **Photopériode 16h : 8h (lumière/ obscurité)**

Sous la photopériode 16 : 8, le poids des boutures de *G. gracilis* a augmenté progressivement de la même manière et ce, dès la première semaine de culture jusqu'à la 10^{ème} semaine, sous les trois intensités lumineuses testées. La valeur maximale a été enregistrée chez les boutures cultivées sous l'intensité lumineuse 1500 Lux ($4,55 \pm 1,20g$). Chez celles qui ont été cultivées sous l'intensité lumineuse 1000 Lux, le poids maximal a atteint $3,23 \pm 0,60g$. La valeur la plus faible a été enregistrée chez les boutures cultivées sous la faible intensité lumineuse ($1,95 \pm 0,18g$). La valeur maximale du TCJ ($2,81 \pm 0.12\%$) a été observée pendant la première semaine (T1 : 7 j) et sous l'intensité lumineuse 1500 Lux, puis cette valeur a diminué au cours du temps. La même tendance a été constatée à différents intervalles de temps (Figure 5). L'analyse de la variance à deux facteurs a montré que la photopériode possède un effet significatif sur la croissance pondérale des boutures de *G. gracilis* ($p=0.043 < 0.05$), tandis que l'intensité lumineuse n'a pas d'effet significatif ($p= 0.399 > 0.05$). En revanche, leur interaction présente un effet significatif sur la croissance des algues cultivées ($p=0.002 < 0.05$).

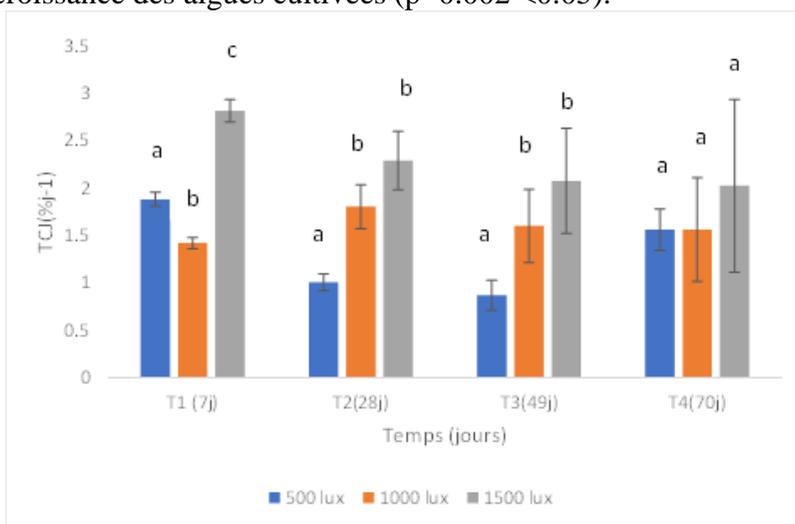


Figure 5 : Taux de croissance journalier des boutures de *Gracilaria gracilis* sous la photopériode 16 : 8 (Les lettres différentes indiquent qu'il y a une différence significative entre les moyennes à un seuil de 5%)

Culture au milieu naturel après transplantation

La transplantation des petites boutures de *G. gracilis* a permis d'avoir une croissance rapide des algues. En effet, les boutures qui avaient à leur sortie du laboratoire un poids initial entre 2 et 4 g ont vu leur poids évoluer d'une façon exponentielle au cours du temps. A la fin de l'expérimentation, le poids des touffes a varié entre 157 g et 800 g après environ 2 mois de culture. Le poids moyen est égal à 385.66 ± 208.96 g. Le facteur d'accroissement du poids

des touffes a varié entre 37.5 et 200. Le taux de croissance journalier a atteint 11.5 % j⁻¹ pendant la première phase (T1) qui a duré 29 jours et 7.75 % j⁻¹ à la fin de la culture : T2 (59 jours).

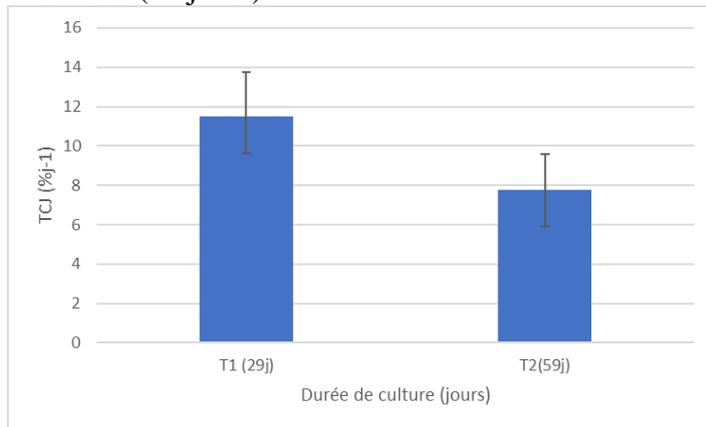


Figure 6 : Taux de croissance journalier des boutures de *Gracilaria gracilis* transplantées dans la lagune de Bizerte

Extraction de l'agar-agar à partir de *Gracilaria gracilis* de culture après transplantation et étude de sa qualité

Rendement d'extraction

Les résultats obtenus à partir de *Gracilaria gracilis* sont représentés sur la Figure 7. Les valeurs maximales du rendement d'extraction ont été obtenues en utilisant la concentration 4 % de 2- propanol (14.75 ± 1,86 %). L'analyse de la variance a montré que la concentration d'alcool n'a pas d'effet significatif sur le rendement d'agar (p=0.502).

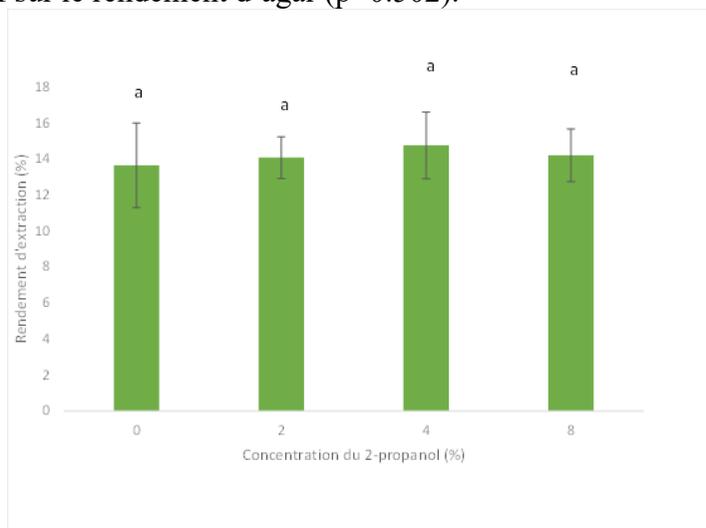


Figure 7 : Variation du rendement d'extraction en agar-agar de *Gracilaria gracilis* (Les lettres différentes indiquent qu'il y a une différence significative entre les moyennes à un seuil de 5%)

Force de gel

La force de gel maximale ($183,33 \pm 47,7 \text{ g.cm}^{-2}$) a été obtenue en utilisant le 2-propanol à une concentration de 8 % (Figure 8). En revanche, la valeur minimale a été enregistrée en faisant l'extraction sans alcool, soit $95 \pm 3,33 \text{ g.cm}^{-2}$. L'analyse de la variance a montré qu'il existe un effet significatif de la concentration en alcool sur la force de gel ($p=0.015$).

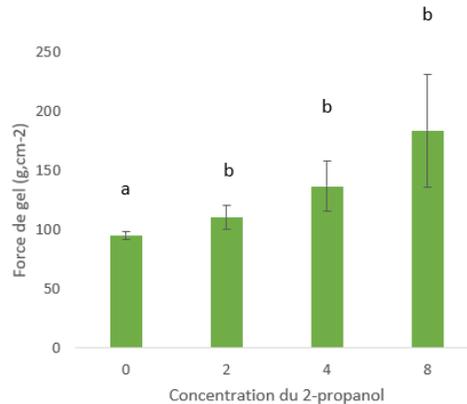


Figure 8 : Variation de la force de gel de l'agar-agar de *Gracilaria gracilis* (Les lettres différentes indiquent qu'il y a une différence significative entre les moyennes à un seuil de 5%)

Point de gélification

La température maximale de gélification a été observée chez les échantillons d'agar issus de l'extraction sans d'alcool ($43 \pm 2,22 \text{ °C}$), tandis que la température minimale de gélification a été observée chez les échantillons d'agar obtenus avec une concentration d'alcool de 8 % ($39,33 \pm 1,33 \text{ °C}$). L'analyse statistique a montré que la concentration en alcool n'a pas d'effet significatif sur le point de gélification ($p=0.098$).

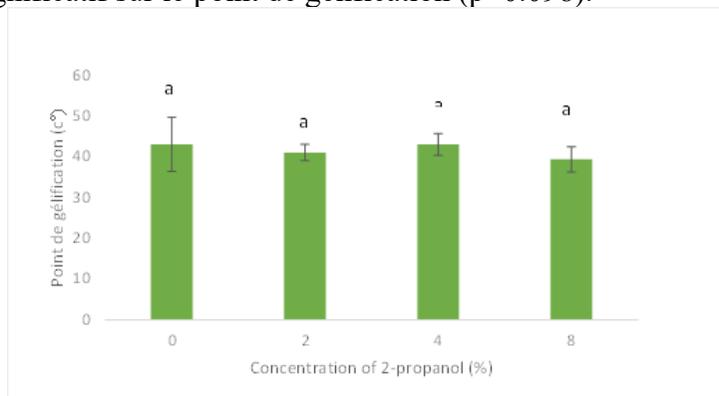


Figure 9 : Variation du point de gélification de l'agar-agar de *Gracilaria gracilis* (Les lettres différentes indiquent qu'il y a une différence significative entre les moyennes à un seuil de 5%)

Point de fusion

La température de fusion maximale (90.66 ± 6.22 °C) a été observée chez les échantillons extraits avec l'alcool à 8%. En revanche, la température minimale de fusion (80.66 ± 2.66 °C) a été enregistrée chez les échantillons extraits sans alcool (Figure 10). L'analyse de la variance a montré qu'il n'existe pas d'effet significatif de la concentration d'alcool sur la température de fusion d'agar-agar extrait ($p = 0.336$). Par ailleurs, nous avons mis en évidence une corrélation positive entre la force de gel et le point de fusion ($r = + 0,587$).

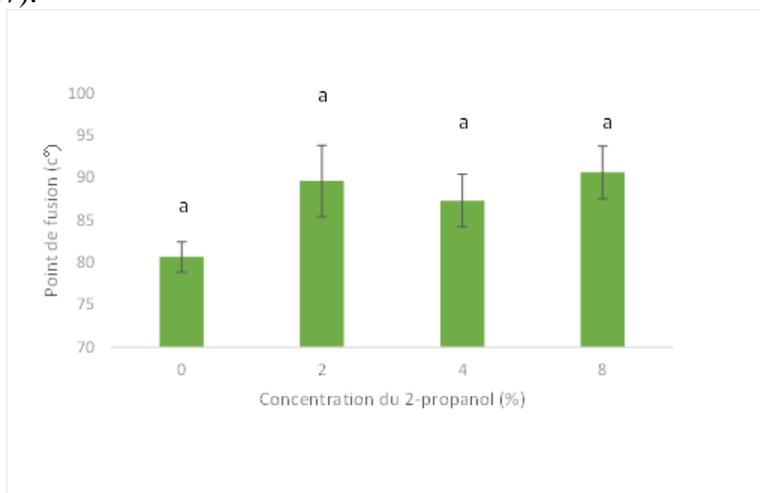


Figure 10 : Variation du point de fusion de l'agar-agar de *Gracilaria gracilis* (Les lettres différentes indiquent qu'il y a une différence significative entre les moyennes à un seuil de 5%)

Discussion

En ce qui concerne la culture *G.gracilis* au laboratoire, les résultats ont montré que la croissance pondérale maximale a été enregistrée sous la photopériode 16 : 8 et l'intensité 1500 Lux. Ainsi, le poids est passé d'environ 1g à $4,55 \pm 1,20$ g, après 10 semaines de culture. Le TCJ optimal a été enregistré sous les mêmes conditions ($2,81 \pm 0.12\% j^{-1}$). Cette augmentation assez lente du poids peut être expliquée par l'adaptation progressive des algues face aux nouvelles conditions de culture, vu qu'elles ont déjà vécu pendant un certain temps dans le milieu naturel où régnaient plusieurs facteurs environnementaux, tels que la température, la salinité, l'oxygène dissous, le pH et la lumière. Cette dernière a évidemment des aspects différents de ceux liés à la lumière artificielle fournie par les tubes néon, aussi bien de point de vue intensité lumineuse que de point de vue spectral. Par conséquent, il a fallu attendre quelques semaines pour que les petites boutures ont pu reprendre leur croissance, après le sectionnement et la fragmentation de leurs thalles mères. Ceci traduit aussi, en particulier l'exigence de l'algue en lumière de point de

vue intensité et photopériode. Dans ce cadre, c'est l'intensité la plus forte et la durée d'éclairement la plus longue (à l'instar de la photopériode naturelle pendant cette période de culture, qui est de l'ordre de 14 à 16 h de jour contre 8 à 10 h d'obscurité) qui ont induit la meilleure croissance des boutures cultivées au laboratoire, comme il a été mentionné ci-dessus. Après leur transfert vers le milieu naturel, les petites plantules ont manifesté une croissance très rapide. Cette croissance peut être expliquée par la présence dans le milieu naturel (la lagune de Bizerte) de quantités importantes des nutriments, en particulier l'azote et le phosphore, sous différentes formes, de telle façon qu'ils ne constituent pas des facteurs limitants pour les algues cultivées. En plus, l'élévation relative de la température pendant cette période (printemps – été), l'agitation de l'eau, ainsi que la disponibilité de la lumière, sont considérés comme des facteurs importants pour la croissance et le développement des algues (Lobban et Harison, 1997 ; Hurd et al. 2014). Il est important de signaler que les résultats obtenus dans cette étude concernant le TCJ sont supérieurs à ceux enregistrés par Mensi et al. (2009) et Ben Said et al. (2018). En effet, ces auteurs ont utilisé des poids initiaux des touffes de *Gracilaira*, supérieurs au poids initial testé dans ce travail. Ils ont varié entre 5 et 200 g, selon les différentes expérimentations effectuées. Au cours de ces travaux, il est également important de signaler que les touffes d'algues n'ont, auparavant, pas été cultivées au laboratoire, mais elles ont été mises directement en culture dans le milieu naturel après leur collecte. Ceci montre bien que la culture de *Gracilaria* avec des boutures ayant un faible poids initial entraîne une croissance très rapide des algues, notamment pendant les premiers jours de culture.

Concernant l'extraction de l'agar-agar, les résultats ont permis de montrer que le rendement a varié entre 14 et 15 % du poids sec. Les valeurs optimales ont été obtenues avec une concentration en alcool de 4 %. Concernant la force de gel, la valeur maximale a été obtenue en faisant l'extraction avec l'alcool à 8 %. Les résultats obtenus concernant le rendement et la force de gel sont inférieurs à ceux obtenus par Ben Said et al. (1999). Cela peut être dû à différents facteurs, tels que l'origine des algues et la période de la collecte qui a été faite au cours de ce travail entre juin et juillet. Le rendement maximal obtenu par Ben Said et al. (1999) a été enregistré en avril (37.92 ± 4.89 %). Ensuite, il a diminué pendant les mois suivants, avec une valeur de $19,89 \pm 5,82$ % en juillet. En ce qui concerne la force de gel, la valeur maximale a été obtenue en mai (410 g.cm^{-2}), puis cette valeur a diminué durant les mois d'après, avec une valeur de 240 g.cm^{-2} en juillet. Les valeurs maximales du point de gélification ont été obtenues chez les échantillons non traités avec l'alcool. Pour les points de gélification et de fusion, les résultats enregistrés par Ben Said et al. (1999) ont été variables selon les saisons. Ceci montre bien l'influence de différents facteurs, aussi bien sur la croissance de

G. gracilis que sur le rendement de l'agar et sa qualité. Dans ce cadre, Rebello et al. (1996) rapportent que *G. gracilis* présente de hautes valeurs de rendement d'extraction d'agar et de force de gel, notamment au printemps et au début de l'été. Ceci est en conformité avec les résultats de Martin et al. (2013). Ce phénomène est lié essentiellement aux facteurs hydro-biologiques, tels que la température, la salinité, l'oxygène dissous, le pH, les sels minéraux, l'agitation de l'eau, etc. Tous ces facteurs peuvent changer, évidemment d'une année à l'autre et d'une saison à l'autre. Par ailleurs, la transparence de l'eau et la disponibilité de la lumière pour les algues cultivées ont une influence très nette sur leur développement et la synthèse de plusieurs molécules. Cette synthèse est, tantôt le résultat d'une action synergique entre différents facteurs physico-chimiques, tantôt sous l'effet inhibiteur de quelques facteurs vis-à-vis d'autres (Ben Said et al. 2018). Ceci a également été observé par plusieurs auteurs (Freile-Peleguin, 1996, Arano et al. 2000) qui ont montré que plusieurs algues appartenant au genre *Gracilaria* présentent une force de gel élevée de l'agar extrait chez les plantes cultivées sous une faible lumière, avec un enrichissement élevé en azote. Toutefois, ce résultat est en contradiction avec d'autres résultats rapportés par Bird et Ryther (1990), Penniman et Mathieson (1985). Ces résultats controversés peuvent être expliqués par les différences des zones géographiques où les algues ont été étudiées. En plus, les différences des conditions expérimentales de conservation des échantillons, de traitement et d'extraction des phycocolloïdes ont une influence indiscutable sur les résultats escomptés.

Conclusion

En conclusion, on peut dire que la culture de *Gracillaria gracilis* représente une voie de valorisation pour cette espèce d'algues rouges vivant dans la lagune de Bizerte (Tunisie), en vue d'augmenter les biomasses dans ce plan d'eau. Cette augmentation à travers la culture des boutures au laboratoire dans une première phase, permettrait d'obtenir de petites touffes transplantables vers le milieu naturel. Cette expérimentation est, à notre modeste connaissance, la première en Tunisie à être réalisée, comme il a été mentionné plus haut. Elle permettrait d'ouvrir l'horizon à la culture de l'espèce à grande échelle, tout en préservant au maximum les stocks d'algues sauvages et en parallèle la durabilité de l'activité d'algoculture qui a démarré en Tunisie, il y a quelques années dans la lagune de Bizerte. En effet, le transfert du savoir-faire acquis au cours de cette expérimentation permettrait à la société d'algoculture implantée actuellement dans la lagune de Bizerte et à d'autres investisseurs potentiels, l'intensification de la culture des petites boutures dans les conditions optimales confirmées dans cette expérience, avant leur transplantation dans la lagune. Par conséquent, l'obtention de biomasses algales appréciables issues de culture pourraient dépasser très

largement les algues sauvages, ce qui permettrait l'extraction des phycolloïdes (agar-agar) à l'échelle industrielle. En plus, cette activité peut aider à limiter les importations tunisiennes en agar-agar, dans une première étape et exporter ce produit vers d'autres pays, dans une deuxième étape. En outre, l'algoculture à grande échelle permettrait l'extraction d'autres produits d'intérêt tels que les pigments, en particulier la R-phyco-érythrine et d'autres métabolites secondaires qui sont utilisés dans différents domaines. Toutes ces activités permettraient de créer plusieurs postes d'emploi à différents niveaux et par conséquent une dynamique économique durable et un échange à l'échelle internationale, à l'instar de plusieurs autres pays tels que la Chine, l'Indonésie, la Malaisie, etc.

Conflit d'intérêts : Les auteurs n'ont signalé aucun conflit d'intérêts.

Disponibilité des données : Toutes les données sont incluses dans le contenu de l'article.

Déclaration de financement : Les auteurs n'ont obtenu aucun financement pour cette recherche.

References:

1. Ammar, EE., Aioub, AAA, Elesawy, AE, Karkour, AM, Mouhamed, MS, Amer, AA et Elshershaby, NA. (2022). Algae as bio-fertilizers : between current situation and future prospective. *Saudi Journal of Biological Sciences*, (29), 3083-3096.
2. Arano, KG, Trono, Jr GC, Montano, NE, Hurtado, AQ et Villanueva, RD. (2000). Growth, agar yield and quality of selected agarophyte & species from Philippines. *Bot Mar*, (3), 517-524.
3. Ben Said, R. (1994). Culture du phytoplancton en petits volumes. *Bull. INSTOP*, 21 :30-40.
4. Ben Said, R et Ksouri, J. (1999). La rhodophycée *Gracilaria verrucosa* du lac de Bizerte (Tunisie) : Variations mensuelles de la biomasse, du rendement d'extraction et de la qualité de l'agar. *Bull. INSTM*, (26),127-136.
5. Ben Said, R., Romdhane, MS, El Abed, A et M'rabet, R. (2011). Temporal variation of some biometric parameters, agar-agar and quality of *Gelidium spinosum* (S.G. Gmelin) P.C. Silva (Rhodophyta, Rhodophyceae, Gelidiales) from Monastir coasts (Tunisia). *Cahiers de Biologie Marine*, 52(1),71-78.
1. 6. Ben Said, R., Mensi, F, Majdoub, H, Ben Said, A, Ben Said, B et Bouraoui A. (2018). Effects of depth and initial fragment weights of

- Gracilaria gracilis* on the growth, agar yield, quality and biochemical composition. *Journal of Applied Phycology*, 30 (4), 2499-2512.
6. Bird, KT et Ryther, JH. (1990). Cultivation of *Gracilaria verrucosa* (Gracilariales, Rhodophyta) Strain G-16 for agar. *Hydrobiologia*, (204/205), 347-351.
 7. Boulot, A. (1985). La phycoculture : techniques, intérêts, perspectives. Doctorat d'Etat de pharmacie. Université de Caen. France.178p.
 8. D.G.P.A. (Direction Générale de la Pêche et de l'Aquaculture (Ministère de l'Agriculture, des Ressources Hydrauliques et de la Pêche, Tunisie) (2020). Statistiques de la pêche.
 9. F.A.O. (2022). The state of world fisheries and aquaculture. Towards blue transformation. Rome. 236 p.
 10. Freile-Pelegri, Y., Robledo, D et Armisen, R. (1996). Seasonal changes in agar characteristics of two populations of *Pterocladia capillacea* in Gran Canaria, Spain. *J Appl Phycol*, (8)239-246.
 11. Gonzalez-Leija, JA., Hernandez-Garibay, E, Pacheco-Ruiz, I, Gardado-Puentes, J, Apinoza-Arolos, J, Lopez-Vivas, JM et Batista-Alcantar, J. (2009). Optimization of the yield and quality of agar from *Gracilariopsis lemaeiformis* (Gracilariales) from the Gulf of California using an alkaline treatment. *J. Appl. Phycol*, (21), 321-326.
 12. Hurd, CL, Harisson, PJ, Bischof, K et Lobban, CS. (2014). Seaweed Ecology and Physiology. Second edition ; Cambridge University Press, 551p.
 13. Khan, N., Sudhakar, K et Mamat, R. (2024). Macro algae farming for sustainable future : navigating opportunities and driving innovation. *Heliyon*, 10(7). <http://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.E28208>.
 14. Ksouri, J., Ben Said, R et Pellegrini, M. (1999). Résultats des cultures expérimentales de la rhodophycée *Gracilaria verrucosa* dans le lac de Bizerte. Tunisie Septentrionale. *Bull. INSTM*, (26),113-125.
 15. Ksouri, J., Mensi, F et Ben Said, R. (2000). Ajustement de certains paramètres de culture par bouturage de *Gracilaria verrucosa* (algue rouge), dans le lac de Bizerte. *Bull. INSTM*, (27), 69-74.
 16. Ktari, L. et Langar, H. (2004). Mise en place d'une base de données informatisée sur les macro algues de Tunisie. *Bull. INSTM*, (31),107-111.
 17. Lobban, CS et Harison, PJ. (1997). Seaweed Ecology and Physiology. Cambridge University Press, 366p.
 18. Marino, M., Breckwoldt, A, Teichberg, M, Kase, A et Ruter, H. (2019). Livelihood aspects of seaweed farming in Rote Island, Indonesia. *Marine Policy*. 107(2019), 103600.
 19. Martin, LA., Rodriguez, MC., Matulewicz, MC, Fissore, EN., Gerschenson, LN et Leonardi, PI. (2013). Seasonal variation in agar

- composition and properties from *Gracilaria gracilis* (Gracilariales, Rhodophyta) of the Patgonian coast of Argentina. *Phycol Res*, (61),163-171.
20. Mensi, F., Ksouri, J, Hammami, W et Romdhane, MS. (2009). L'algue rouge *Gracilaria verrucosa* (Hudson) papenfuss de la lagune de Bizerte (Tunisie septentrionale) : Essai de culture en mode suspendu et composition biochimique. *Bull. INSTM*, (36), 125-137.
 21. Mensi, F., Nasraoui, S, Bougerra, S, Ben Ghedifa, A et Chalhaf, M. (2020). Effect of lagoon and sea water depth on *Gracilaria gracilis* growth and biochemical composition in the Northeast of Tunisia. *Scientific Reports*, (10), 10014.
 22. Munoz, J., Freile-Pelegrin, Y et Robledo, D. (2004). Mariculture of *Kappaphycus alvarezii* (Rhodophyta, Solieriaceae) color strains in tropical waters of Yucatan, Mexico. *Aquaculture*, (239), 161-177.
 23. Nieri, M.et Meinesz, A. (1991). Réimplantation de la phanérogame *Posidonia oceanica* dans le golfe de Marseille (Bouches-du-Rhône. Transplantation et état initial. *SOMICA et GIS Posidonie pub.*, Marseille, Fr., 1-35.
 24. Penniman, CA.et Mathieson, AC. (1985). Photosynthesis in *Gracilaria tickvahiae* Mc Lachlan (Gigartinales, Rhodophyta) from the Great Bay Estuary, New Hampshire. *Bot Mar*. (28),427-435.
 25. Rebello, J., Ohnon, M, Critchley, AT et Sawamura, M. (1996). Growth rates and agar quality of *Gracilaria gracilis* (Stackhouse) Steentoft from Namibia, Southern Africa. *Bot Mar*, (39),273-279.
 26. Rebours, C., Marinho-Soriano, E, Zertuche-Gonzalez, JA., Ayashi, L, Vasquez, JA., Kradolfer, P, Soriano, G, Ugarte R, Abreu, MH, Bay-Larsen, I, Hovelsrud, G, Rodven, R et Robledo, D. (2014). Seaweeds: an opportunity for wealth and sustainable livelihood for coastal communities. *J Appl. Phycol*, (26), 1939-1951.
 27. Trougan, M., Gilante, H et Juillet, E. (2021). Restauration de ceintures de cystoseires (*Cystoseira mediterranea* et *Cystoseira barbata*) par transplantation. Centre de ressources. Génie écologique. www.genieecologique.fr
 28. Veeragurunathan, V., Prasad K, Malarvishi, J, Singh, N, Meena, R et Mantri, V.A. (2019). *Gracilaria debilis* cultivation, agar characterization and economics: bringin new species in the ambit of commercial farming in India. *J. Appl. Phycol*, (31),2609-2621.