

Faculté des sciences

Comparaison de la capacité de 5 biostimulants à induire chez *Solanum lycopersicum* une résistance au stress hydrique

Auteure : Mathilde Hebert

Promotrice : Muriel Quinet

Lecteurs : André Lejeune, Grégory Sempo, Bertrand Vandoorne

Année académique 2022-2023

Remerciements

Je voudrais tout d'abord remercier ma promotrice Muriel Quinet pour sa patience et sa disponibilité tout au long de ce travail.

Je remercie également les membres du laboratoire avec qui il a été agréable de travailler et qui m'ont épaulé durant ma culture et mes manipulations en laboratoire, ainsi que Adrien sans qui on n'aurait pas eu des graphiques aussi propres.

Je n'oublie pas mes lecteurs monsieur André Lejeune ainsi messieurs Gregory Sempo et Bertrand Vandoorne sans qui cette étude n'aurait jamais eu lieu.

Resume

The effects of climate change are increasingly evident in changing water regimes and increasing droughts threatening and affecting crop productivity. Like many other plants that are consumed, the cultivated tomato *Solanum lycopersicon* is sensitive to water stress. As droughts intensify, the water demand of plants will increase. However, irrigation systems are limited by the availability of water resources. It is therefore of interest to find ways to improve plant tolerance and productivity under drought conditions.

This study compares five biostimulants, four based on different algae *A.nodosum* (asco), *E.maxima* (eckl), *Laminaria* (nsf), *C.soli* (soli) and 1 based on vermicompost tea (pur) on their ability to improve the resistance of *Solanum lycopersicon* to water stress. Under control conditions we compared asco, eckl and pur, while under stress conditions we compared them with the two additional biostimulants, nsf and soli. Stress was applied by decreasing the number of waterings and the amount of water supplied. Morphological and physiological measurements such as growth monitoring, water status, photosynthetic parameters or malondialdehyde content were taken. An analysis of the harvested fruit was also carried out.

It was found that the applied biostimulants could improve growth, certain parameters associated with water status and induce the production of antioxidants and osmolytes in the absence of stress. At the fruit level, they improved the weight and quality of what was analysed.

The water stress allowed us to determine the physiological mechanisms on which the products acted and to compare the effectiveness of each in improving the various parameters affected by this stress.

In conclusion, all products seemed to improve one or more parameters associated with water stress. Asco and pur are the two products that stand out for their synergistic effect and

efficiency. In terms of fruit production, we did not observe an improvement in the weight of the fruits from the stressed plants but an increase in their sugar content.

Résumé

On constate de plus en plus les effets du changement climatique par l'évolution des régimes hydriques et l'augmentation des sécheresses menaçant et affectant la productivité des récoltes. Comme de nombreuses autres plantes que l'on consomme, la tomate cultivée *Solanum lycopersicon* est sensible au stress hydrique. Avec l'intensification des sécheresses, la demande en eau des plantes va augmenter. Cependant, les systèmes d'irrigations sont limités par la disponibilité de la ressource hydrique. Il est donc intéressant de trouver des moyens d'améliorer la tolérance et la productivité des plantes face aux conditions de sécheresse.

Cette étude compare cinq biostimulants, quatre à base de différentes algues *A.nodosum* (asco), *E.maxima* (eckl), *Laminaria* (nsf), *C.soli* (soli) et 1 à base de thé de vermicompost (pur) sur leur capacité à améliorer la résistance de *Solanum lycopersicon* au stress hydrique. En condition contrôle, nous avons comparé asco, eckl et pur, tandis qu'en conditions de stress nous les avons comparés avec les deux biostimulants supplémentaires, nsf et soli. Le stress a été appliqué par une diminution du nombre d'arrosages et de la quantité d'eau apportée. Des mesures morphologiques et physiologiques telles que le suivi de la croissance, le statut hydrique, les paramètres photosynthétiques ou le contenu en malondialdéhyde ont été prises. Une analyse sur les fruits récoltés a également été réalisée.

On a constaté que les biostimulants appliqués pouvaient améliorer en l'absence de stress la croissance, certains paramètres associés au statut hydrique et induire la production d'antioxydants et d'osmolytes. Au niveau des fruits, ils ont permis d'améliorer le poids et la qualité de ce qui a été analysé.

Le stress hydrique nous a permis de déterminer les mécanismes physiologiques sur lesquels les produits agissaient ainsi que de comparer l'efficacité de chacun à améliorer les différents paramètres impactés lors de ce stress.

En conclusion, l'ensemble des produits ont semblé améliorer un ou plusieurs paramètres associés au stress hydrique. Asco et pur sont les deux produits ressortant particulièrement pour leur effet synergétique et leur efficacité. En termes de production de fruits, nous n'avons pas observé d'amélioration du poids des fruits issus des plantes stressées mais une augmentation de leur teneur en sucres.

Table des matières

Liste des figure	8
Liste des tableaux.....	10
Liste des abréviations.....	11
1. Introduction	13
2. Etat de l’art	15
2.1 Le monde face aux changements climatiques	15
2.1.1 Evolution de la perception du climat.....	15
2.1.2 Agriculture et changements climatiques	16
2.2 Changements climatiques et plantes	18
2.2.1 La plante à l’interface du sol et de l’air.....	18
2.2.2 Stress et sécheresse, définition	19
2.2.3 La plante face au stress hydrique	20
2.3 Biostimulants	23
2.3.1 Généralités et définition	23
2.3.2 Extraits d’algues macroscopiques (EAM).....	25
2.3.3 Vermicompost et thé de vermicompost (TVC)	28
2.4 Tomates	31
2.4.1 Intérêt économique	31
2.4.2 Caractéristiques du sous-genre <i>Lycopersicon</i>	32
2.4.3 Tomate cultivée	33
2.4.4 Variété moneymaker	33
3. Objectifs	35
4. Matériel et méthode.....	38

4.1	Caractérisation des biostimulants	38
4.1.1	Présentation des produits.....	38
4.1.2	Analyse des paramètres généraux des biostimulants	38
4.1.3	Dosage de la composition minérale des biostimulants	39
4.1.4	Dosage du rapport C/N	40
4.2	Impact des biostimulants sur la résistance des plantes au stress hydrique	40
4.2.1	Matériel végétal et condition de culture	40
4.2.2	Design expérimental	41
4.2.3	Concentrations appliquées	42
4.3	Etude du matériel végétal	43
4.3.1	Mesures morphologiques	43
4.3.2	Mesures physiologiques	45
4.5	Statistiques	49
5.	Résultats.....	50
5.1	Comparaison physico-chimique des biostimulants.....	50
5.2	Effets des biostimulants sur la résistance à la sécheresse de la tomate.....	52
5.2.1	Croissance végétative	52
5.3	Croissance reproductrice.....	54
5.3.1	Production d'inflorescences	54
5.3.2	Développement des premières inflorescences	55
5.3.3	Production des fruits.....	57
5.4	Paramètres physiologiques	59
5.4.1	PNA/DUA.....	59
5.4.2	Paramètres associés à la photosynthèse	60
5.4.3	Paramètres associés au statut hydrique.....	62
5.4.4	Potentiel hydrique	62

5.4.5	Concentrations en malondialdehyde (MDA) et en sucres solubles totaux	64
5.4.6	Concentration des feuilles en minéraux	65
5.5	Analyse en composante principale (ACP)	66
6.	Discussion.....	68
6.1	Paramètres physiologiques	68
6.1.1	Croissance	68
6.1.2	Statut hydrique	70
6.1.3	Activité photosynthétique	71
6.1.4	MDA et réponses aux dommages cellulaires	73
6.2	Reproduction et production	75
6.3	Nutrition minérale	77
7.	Conclusion et perspectives	79
8.	Bibliographie	83
	Annexes	96

Liste des figure

Figure 1 Positionnement des différents traitements dans la serre. Les points verts correspondent aux plantes qui ont été traitée et les points orange aux plantes supplémentaires. Pour chaque code, la dernière lettre correspond au traitement hydrique : arrosé (E) ou en stress (S), le reste du code correspond au produit pulvérisé (cf. Tableau 1) et aux contrôles (C).

Figure 2 : Effet des biostimulants sur l'évolution du nombre de feuilles sur l'axe principal aux différentes dates de mesures en conditions de stress hydrique (S) ou non (C), n=10 (03/29-04/29) et n=4 (05/16)

Figure 3 : Effet des différents biostimulants sur le taux de croissance mesurée entre le 29/03 et le 20/04 chez les plantes témoins (C) et en stress hydrique (S). n=10 Les valeurs avec des lettres différentes sont statistiquement différentes (p-value < 0,05).

Figure 4 : Effet des biostimulants sur le poids sec des feuilles (**A**) et des tiges (**B**) chez les plantes témoins (C) et en stress hydrique (S) 27 jours après l'application du stress. n=3 Les valeurs avec des lettres différentes sont statistiquement différentes (p-value < 0,05).

Figure 5 : Effet des biostimulants sur (**A**) le nombre d'inflorescences et (**B**) le nombre de feuilles entre les deux premières inflorescences chez des plantes témoins (C) et en stress hydrique (S), En A : n=10 (19/04,29/04) n=4 (16/05) ; en B : n=10 Les valeurs avec des lettres différentes sont statistiquement différentes (p-value < 0,05).

Figure 6 : Effet des biostimulants sur (**A**) le nombre de fleurs dans la 1^e inflorescence et (**B**) l'évolution du pourcentage de fleurs en anthèse par inflorescence chez des plantes témoins (C) et en stress hydrique (S), En **A** : n=10, en **B** : n=4: Les valeurs avec des lettres différentes sont statistiquement différentes (p-value < 0,05) pour un même paramètre

Figure 7 : Effet des biostimulants sur la sucrosité des fruits en fonction des contrôle (C) et des stress (S). Les valeurs avec des lettres différentes sont statistiquement différentes (p-value<0.05).

Figure 8 : Effet des biostimulants sur (A) la teneur en chlorophylle et (B) en azote des feuilles 24 jours après l'application du stress hydrique, (C) la teneur en chlorophylle et (D) en azote présentes des feuilles 43 jours après l'application du stress hydrique. L'ensemble de ces données sont présentées en fonction des traitements contrôles (C) et stress (S). n=3 (A,B) n=10 (C,D) Les valeurs avec des lettres différentes sont statistiquement différentes (p-value < 0.05).

Figure 9 : Effet de biostimulants sur (A) la teneur en flavonols et (B) en anthocyanes contenues dans les feuilles mesurée 43 jours après l'application du stress hydrique en fonction des traitements contrôles (C) et stress (S). n=10 Les valeurs avec des lettres différentes sont statistiquement différentes (p-value < 0.05).

Figure 10 Effet des biostimulants sur (A) la conductances stomatiques mesurées 24 jours et (B) 43 jours après l'application du stress, sur (C) le rendement quantique de la fluorescence du PS2 (Φ PS2) 43 JAS et (D) l'efficacité du transport des électrons (ETR) 43 JAS en fonction des traitements contrôles (C) et stress (S). (C) est seulement présenté en fonction des biostimulants. n=3 (A) n=4-15 (B,C,D) Les valeurs avec des lettres différentes diffèrent statistiquement (p-value < 0,05).

Figure 11 : Effet des biostimulants sur le contenu en eau (A) des feuilles et (B) des tiges après 24 Jours de stress en fonction des conditions contrôles (C) et stress (S). n=3 Les lettres différentes sont significatives (p-value < 0.05).

significatives (p-value < 0.05).

Figure 12 : Effet des biostimulants sur le potentiel hydrique 24 jours après la mise en place du stress hydrique en fonction des traitements contrôles (C) et stress (S). n=3 Les valeurs avec des lettres différentes sont statistiquement différentes (p-value < 0.05).

Figure 13 : A Effet des biostimulants sur (A) la MDA mesurée et (B) les sucres totaux solubles 24 jours après la mise en place du stress hydrique présenté en fonction des traitements contrôles (C) et stress (S). n=3 Les valeurs avec des lettres différentes sont statistiquement différentes (p-value < 0.05).

Liste des tableaux

Tableau 1 : Liste des biostimulants utilisés et des organismes dont sont issu les produits

Tableau 2 : Caractéristiques physico-chimiques des biostimulants aux concentrations appliquées, n=3

Tableau 3 : Caractérisation ionique des biostimulants aux concentrations appliquées, n=2 pour les minéraux et n=3 pour le rapport C/N sauf pour le traitement eckl où n=1

Tableau 4 : Viabilité pollinique et réceptivité stigmatique des fleurs récoltées

Tableau 5 : Effet des biostimulants sur les données du poids de la circonférence et du pH des fruits mesurés. Les valeurs avec des lettres différentes sont statistiquement différentes (p-value < 0,05).

Tableau 6 : Concentrations des minéraux présents dans les feuilles 24 JAS, n=3

Liste des abréviations

•O⁻² : superoxydes
AM : algues macroscopiques
ATP : Adénosine triphosphate
Ca : calcium
CAM : Crassulacean Acid Metabolism
CAT : catalase
Cd : cadmium
CFE : contenu faible en eau
Cu : cuivre
DUA : Dualex
EAM : Extraits d'algues macroscopiques
ERO : espèces réactives de l'oxygène
Fe : fer
GABA : acide γ-aminobutyrique
GES : gazs à effet de serre
H₂O₂ : peroxyde d'hydrogène
IPCC : Intergovernmental Panel on Climate Change
JAS : jours après l'application du stress
K : potassium
MDA : Malondialdehyde
Mg :magnésium
Na : sodium
NADPH : Nicotinamide adénine dinucléotide phosphate
ΦPS2 : rendement quantique du photosystème 2
POD : peroxydase
PS2 : photosystème 2

RuBP : Ribulose-1,5-bisphosphate

SOD : superoxyde dismutase

TVC : thé de vermicompost

VC : vermicompost

Zn : zinc

1.Introduction

Le changement climatique est une réalité de plus en plus présente au cœur de notre société. On le remarque physiquement à travers l'élévation des températures induites par l'accumulation de gaz à effets de serre dans l'atmosphère. Par rapport à l'ère préindustrielle, la température a déjà augmenté de $1,2^{\circ}\text{C}^1$ et le phénomène ne semble pas encore stabilisé du fait que l'IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) projette que d'ici 2040 on puisse atteindre les $1,5^{\circ}\text{C}^2$. Cette augmentation des température cause de nombreux effets néfastes sur les organismes et les écosystèmes qui subissent des changement dans régimes de précipitation et doivent faire face à l'augmentation du nombre, de l'intensité et de la durée des sécheresses ³.

La sécheresse impacte beaucoup les systèmes agricoles car le manque d'eau est le facteur limitant le plus la productivité des cultures. Elle a pour effet de réduire la croissance des plantes et de perturber leur utilisation et leur accès à l'eau ⁴ avec pour conséquences, une diminution des rendements et de la qualité nutritive des récoltes⁵. On estime que depuis 1961, nous avons déjà subi une réduction de 21% sur la productivité agricole totale⁵. Comme on estime également que la hausse des température pourrait accentuer les besoins en eau des plantes irriguées d'au moins 5 à 20% d'ici 2070/2080⁶, il est probable que l'on continue à perdre en productivité dans les années à venir.

La tomate cultivée (*Solanum lycopersicum* L.) est la culture maraichère la plus consommé au monde après la pomme de terre. En 2020, sa production était estimée à 186,8 millions de tonnes⁷ ce qui en fait un produit d'intérêt économique majeur. Cependant, comme de nombreuses plantes cultivées, *S.lycopersium* est sensibles aux stress abiotiques dont le stress hydrique⁸⁻¹⁰.

Les biostimulants sont un type de produits qui a beaucoup éveillé l'intérêt ces dernières années⁷¹. Ce sont des produits liquides qui peuvent être fabriqués à partir de nombreuses sources biologiques telles que les algues ou les déjections de vers de terres (vermicompost) et inorganiques. Dans leur composition on retrouve de nombreux éléments bénéfiques aux plantes tels que des minéraux, des acides-humiques, des antioxydants, des phytohormones et/ou des microorganismes bénéfiques à la croissance des plantes. Plusieurs études ont déjà démontré l'intérêt de ces produits sur l'amélioration de la croissance et de la production en conditions de stress hydrique avec un seul biostimulant^{11,12}. Quelques études ont aussi déjà comparé deux formulations issus du même matériel biologique¹³, mais peu d'études comparants des biostimulants issus de différentes sources ont été réalisées.

L'objectif de cette étude est de comparer la capacité d'induire une résistance au stress hydrique de 5 biostimulants (4 à base d'algues et 1 thé de vermicompost) d'origines et de compositions diverses sur *S.lycopersicum*. Les paramètres morphologique, physiologiques et biochimiques impliqués dans la réponse au stress hydrique vont être étudiés dans les parties aériennes des plantes tout au long de leur cycle de vie. Des paramètres associées à la production et à la qualité des fruits seront également analysés.

2. Etat de l'art

2.1 Le monde face aux changements climatiques

2.1.1 Evolution de la perception du climat

Les termes de changements climatiques ne sont pas nouveaux si on les observe à l'échelle géologique. Notre planète est en effet déjà passée par une succession d'ères glacières et de réchauffements depuis des millions d'années^{14,15}. A travers ses activités, l'Homme a cependant bouleversé l'ordre naturel, à tel point qu'en 2016, il a été accepté que nous sommes géologiquement passés à l'ère de l'Anthropocène¹⁶. Ce terme désigne l'impact sans précédent que l'humain a sur la Terre ; il marque définitivement les cycles bio-géo-physiques en modifiant des équilibres existants et provoque ainsi l'accélération du réchauffement de l'atmosphère¹⁷.

Si, auparavant aux yeux des populations, les termes de réchauffement ou de dérèglement climatique pouvaient sembler des élucubrations de scientifiques déconnectés de leur réalité, aujourd'hui il n'est plus possible de nier l'évidence. En effet le dérèglement climatique se fait aujourd'hui sentir partout.

Entre sécheresses importantes et températures moyennes record, on observe, dans les zones tempérées en Europe, des phénomènes tels que l'assèchement grave des sols¹⁸ et une extrême diminution du niveau des cours d'eau¹⁹ mettant en péril faune, flore et humains.

A l'inverse, dans des zones de faible pluviométrie, des fortes pluies peuvent se produire, comme par exemple dans la vallée de la mort en Californie, zone réputée la plus sèche du monde, où des précipitations record se sont produites²⁰. L'origine du dérèglement climatique actuel est clairement liée à l'accumulation de gaz à effet de serre (GES) à longue durée de vie dans l'atmosphère. Ces derniers ont été produits par l'Homme en masse à partir de la fin du XXe siècle avec une hausse observée de 70 % entre 1970 et 2004^{21,22}. Ces gaz induisent une hausse globale de la température des océans et de l'atmosphère. Depuis l'ère pré-industrielle, la température a déjà augmenté d'environ 1.2 °C¹. On prête beaucoup d'attention à ces perturbations car elles influent fortement sur l'ensemble des cycles naturels. En effet, l'océan étant une partie importante du cycle du carbone, il absorbe une partie de l'excédent de CO₂ rejeté, ce qui mène au phénomène d'acidification du pH de l'eau que l'on observe

actuellement²³. Les températures augmentant, les glaciers et le pergélifrost se sont mis à fondre, élevant le niveau des océans²³. De plus, du fait de leur réchauffement en surface, il est probable que dans le siècle à venir une diminution de la concentration d'oxygène dissous s'observe²⁴.

La configuration des vents et des précipitations évolue également, amenant des événements météorologiques plus extrêmes²⁵. On constatera la recrudescence de vagues de fortes chaleurs, l'intensification des sécheresses, des précipitations et de la fréquence d'événements climatiques extrêmes^{3,26}.

Par conséquent, la fragilisation des écosystèmes se trouve accentuée. Par exemple, de nombreuses espèces vont se retrouver soumises à des températures supérieures à leurs limites historiques, ce qui va d'une part, induire une redistribution des espèces mobiles et d'une autre part, une pression environnementale pour les espèces dont la dispersion est faible ou impossible.

Cet affaiblissement des écosystèmes nous mène, dans le meilleur des cas (scénario de réchauffement climatique à 1.5°C de l'Intergovernmental Panel on Climate Change ou IPCC), à une proportion d'espèces menacées d'extinction allant de 3 à 14% pour la biodiversité terrestre^{2,27}.

L'ensemble de ces éléments ont de sérieuses conséquences sur les sociétés humaines^{28,29}. En effet, les coûts liés aux événements climatiques extrêmes vont très probablement s'accroître^{30,31} et de nouveaux questionnements tels que la sécurité hydrologique et alimentaire vont émerger^{25,32}.

2.1.2 Agriculture et changements climatiques

Depuis le siècle précédent, le système agricole a accompli son plus grand défi, celui d'avoir la capacité de produire assez de ressources pour nourrir l'ensemble d'une population. Cette croissance a été possible grâce à la mécanisation, l'apparition de produits de gestion des cultures, que l'on connaît plus communément sous les termes de pesticides et fertilisants chimiques, de l'irrigation et de la sélection semencière^{33,34}. Cependant, aujourd'hui, une partie

de ce système commence à être remis en question à cause des coûts environnementaux qu'il engendre, tels que la perte de la biodiversité, la perturbation des cycles biogéochimiques, la qualité des sols et la dépendance aux énergies fossiles. Parallèlement, les consommateurs commencent également à prêter plus attention à la qualité des aliments qu'ils consomment³³⁻³⁶.

De plus, aujourd'hui il est assez clair que le phénomène climatique impacte notre système de production alimentaire²⁴ à cause de notre dépendance à l'eau. L'agriculture est en effet l'activité la plus consommatrice d'eau à hauteur de 85% de la consommation humaine totale³⁷. L'eau étant un facteur critique dans le développement des cultures (principalement lors des phases de germination et de fructification¹⁷)³⁸, il est nécessaire de prendre en compte le changement dans les régimes hydriques. Cette nécessité découle du fait que la majorité des cultures (environ 1.1 milliard d'hectares soit 80% des terres cultivées qui génèrent 60% de l'alimentation mondiale^{6,28}) dépend des précipitations dont la répartition évolue fortement ces dernières années.

De même, le fonctionnement des systèmes agricoles dépendants de l'irrigation est également mis en danger par l'accentuation des sécheresses, qui rend le niveau des cours d'eau extrêmement bas, voir les laissant asséchés (environ 70% de l'eau puisée dans les rivières sont utilisées pour l'irrigation¹⁸).

Outre les problèmes d'irrigation, le réchauffement climatique aurait comme autre effet d'augmenter l'évapotranspiration des cultures³⁹, indicateur couramment utilisé pour mesurer la demande en eau de la plante³⁸. On estime ainsi que la demande d'irrigation des plantes pourrait augmenter d'au moins 5 à 20% d'ici 2070/2080⁶, accentuant le stress hydrique dans les zones déjà touchées et créant des pénuries d'eau au printemps et en été³⁹.

Globalement, des diminutions du rendement agricole sont à prévoir, comme le montrent Zhao et al, qui projettent une diminution de 3.1 à 7.4 % de rendement global du blé, du maïs, du riz et du soja⁴⁰.

L'importance de ces pertes est cependant inégale entre les différentes régions du monde. Des continents comme l'Afrique^{41,42} ou l'Europe⁴¹ sont projetés comme allant subir plus de pertes, tandis que pour d'autres, les pertes resteront plus mitigées⁴¹.

Bien évidemment, il existe tout autant de disparités de rendement à l'échelle intra-régionale^{31,43} et au niveau du type de cultures⁴⁴.

Pour limiter l'impact du changement climatique sur nos cultures, il est tout d'abord nécessaire d'améliorer l'efficacité de l'irrigation. L'évapotranspiration est un indicateur qui ne reflète pas la quantité d'eau réellement utilisée par la plante⁴⁵. D'après certaines estimations, moins de 65% de l'eau appliquée est utilisée par la plante⁴⁶, ce qui signifie qu'il est possible d'améliorer la productivité de la plante vis-à-vis de la quantité d'eau appliquée. Des changements dans la manière d'apporter l'eau (goutte-à-goutte^{46,47}) ou de contrôler le moment et la quantité apportée^{46,47} permettraient déjà d'améliorer l'efficacité de l'utilisation de l'eau et de limiter la quantité d'eau utilisée inutilement dans cette tâche. Dans les zones en déficit hydrique, des solutions telles que le recyclage des eaux usées ou la recharge artificielle des eaux souterraines sont étudiées pour permettre un accès à l'irrigation⁴⁸.

D'autre part, il est assez clair que notre système cultural doit évoluer vers des pratiques plus durables comme diminuer le travail du sol, intégrer la perception de la parcelle dans son contexte paysager et/ou utiliser des produits plus durables dans la protection et la stimulation des plantes, tels que les biostimulants.

2.2 Changements climatiques et plantes

2.2.1 La plante à l'interface du sol et de l'air

L'eau est essentielle à vie et à la croissance de la plante. Elle constitue en effet 90 à 95 % du poids frais des tissus⁴⁹. Ainsi, à travers l'absorption de l'eau provenant du sol, les plantes constituent une passerelle privilégiée dans le cycle de l'eau⁵⁰. En effet, la transpiration ou évapotranspiration qui en résulte compterait pour 39% des précipitations terrestres⁵⁰.

Ce rejet d'eau important est réalisable grâce à la différence de potentiel hydrique qui existe entre le sol et l'atmosphère. Des racines aux feuilles, il existe ainsi un gradient de potentiel qui permet de mettre sous tension les vaisseaux de xylème⁴⁹. L'aspiration de la sève contenant l'eau et les minéraux absorbés par les racines est ainsi créée et transporte les nutriments

jusqu'à l'apex. Au niveau physiologique, l'intensité de l'évapotranspiration est contrôlée au niveau des feuilles sous l'action des stomates⁵¹.

Cependant, le moteur principal reste l'intensité des radiations solaires, qui apportent l'énergie nécessaire à la vaporisation de l'eau. L'effet des rayons lumineux sur les plantes est modulé par d'autres facteurs, tels que la couverture nuageuse, la température de l'air ou encore l'humidité présente dans le sol et l'atmosphère^{49,51-53}.

Ainsi, la régulation de l'ouverture des stomates se produit en réponse aux facteurs climatiques pour maintenir un statut hydrique suffisant au sein la plante.

L'eau a aussi beaucoup d'importance dans divers autres processus physiologiques. Par exemple, elle joue un rôle dans le maintien du port de la plante⁴⁹, dans l'élongation cellulaire⁴⁹ et dans la régulation de la température au niveau des feuilles.

2.2.2 Stress et sécheresse, définition

Il est possible de définir le stress comme « une condition causée par des facteurs qui ont tendance à altérer un équilibre »⁵⁴.

Il existe principalement deux type de stress : les stress biotiques, appliqués par un organisme vivant et les stress abiotiques, causés par une modification des conditions du milieu⁵⁴. Pour chacune de ces perturbations, on considère deux niveaux de stress : les stress à court terme, que les plantes peuvent surpasser par des adaptations et les stress à long terme, qui imposent des dommages irréversibles à ces organismes⁵⁴.

Une contrainte abiotique va affecter la croissance, la reproduction ou la vie de la plante, soit au niveau environnemental, soit au niveau nutritionnel⁵⁴. Les facteurs principaux sont la salinité, les contraintes thermiques et hydriques⁵⁵. Ensemble, ces facteurs sont responsables de la répartition des espèces à travers le monde. Le facteur le plus limitant pour les plantes reste cependant l'accès à l'eau^{56,57}.

La sécheresse est ainsi définie par le quatrième rapport de l'IPCC comme « l'absence prolongée ou marquée de précipitations » ou une « période de météo anormalement sèche

suffisamment prolongée pour que le manque de précipitations cause un sérieux déséquilibre hydrologique»⁵⁸ Ce phénomène affecte autant les eaux de surface que les eaux souterraines³⁸.

Cette problématique influence également beaucoup la capacité de production du système agricole⁵⁵.

2.2.3 La plante face au stress hydrique

2.2.3-1 Impacts sur le développement

Le stress hydrique entraîne des répercussions sur tous les stades de développement de la plante.

Au niveau des graines, on constate que les taux de germination diminuent et que la durée de levée de semence augmente chez de nombreuses plantes⁵⁹⁻⁶¹. En fonction des variétés, de l'origine des graines ou de leur taille, les réponses de germination seront plus ou moins importantes⁶⁰⁻⁶².

Au niveau de la croissance végétative, on observera une réduction de la taille des plantes due à leur croissance ralentie, voir inhibée en fonction de l'intensité du stress⁵⁶.

Au niveau reproduction, les floraisons auront tendance à être plus stériles, modifiant, entre autres, la réceptivité stigmatique et la viabilité pollinique^{56,63}.

L'ensemble de ces perturbations physiologiques impacte fortement les rendements dans un contexte agricole^{56,60-62}.

2.2.3-2 Impacts au niveau physiologique

Physiologiquement, un déficit hydrique correspond à un excès dans la perte d'eau par rapport à l'absorption racinaire⁴⁹. Cela exerce un effet négatif sur le contenu relatif en eau de la plante⁶⁴.

Le stress hydrique se traduit ainsi par un contenu faible en eau (CFE) au niveau des cellules⁶⁵.

En réaction à ce déséquilibre, la fermeture des stomates s'opère pour limiter la perte d'eau⁶⁶. Cela a pour effet d'accentuer le différentiel de gradient au sein de la plante⁴⁹. Cette dernière

redirige ainsi l'eau vers les organes les plus jeunes⁴⁹. Les parois cellulaires diminuent également leur conductance, ce qui permet de diminuer la diffusion de l'eau à travers les parois^{49,66}.

2.2.3-2a Mécanismes directement dépendants du contenu en eau

Globalement, les mécanismes de réduction des pertes d'eau affectent la nutrition de la plante. Effectivement, avec la réduction de la transpiration, on peut observer un changement dans la perméabilité des cellules. En conséquence, le transport des nutriments se trouve être moins actif et la traversée des parois cellulaires se trouve être moins aisée⁶⁷.

Le manque d'eau va également impacter l'activité métabolique. Un CFE influe sur l'hydratation du protoplaste (usuellement composé de 75-80% d'eau⁴⁹) et la turgescence de la cellule^{49,66}, ce qui induit un changement de résistance du liquide cellulaire et serait la cause du ralentissement des processus physiologiques⁴⁹.

On constate en effet que des processus essentiels, tels que la synthèse protéique et de cellulose, sont moins importants.

La diminution du contenu protéique serait liée à la perturbation de la réaction de synthèse des acides aminés et à une destruction des acides nucléiques plus importante^{49,66} pour augmenter la quantité d'acides aminés libres et les rediriger dans d'autres voies métaboliques⁶⁸. La synthèse de cellulose, pour sa part, importante dans l'élongation des cellules, par sa perturbation ralentit la croissance cellulaire⁴⁹.

Tous les mécanismes ne sont cependant pas déréglés par de la sous-régulation. En effet, certains mécanismes comme la transformation de l'amidon en sucre (liée à l'augmentation de la respiration cellulaire) et la production d'enzymes et d'antioxydants sont augmentés pour répondre aux besoins plus importants de la plante⁴⁹.

2.2.3-2b Impact sur la photosynthèse

Le déficit hydrique induit une diminution de la photosynthèse par la réduction de la surface foliaire et du taux de photosynthèse par unité de feuille. Ce phénomène est une conséquence

de la fermeture des stomates et de l'abaissement de la conductance du mésophylle. La régulation de l'évapotranspiration permet de maintenir le statut hydrique des feuilles mais réduit également l'absorption du CO₂^{69,70}.

La diminution de la concentration de CO₂ intracellulaire, associée à la stimulation normale des photosystèmes, peuvent amener à des dérèglements métaboliques⁶⁹. En l'absence de renouvellement de la RuBP, enzyme essentielle pour fixer le carbone, l'activité du cycle de Calvin va diminuer avec la redirection du NADPH et de l'ATP vers d'autres voies métaboliques.

L'effet sur les photosystèmes va se définir par une sur-production d'énergie⁷¹ et une accumulation d'électrons, qui vont déclencher des voies de dissipation telles que la production de chaleur, la photorespiration chez les plantes en C3 ou la réaction de Mehler (réduction de l'O₂ directement par les composants de la chaîne de transport d'électrons⁷¹). Ces réactions génèrent des espèces réactives de l'oxygène (ERO), telles que des superoxydes ($\text{O}_2^{\cdot-}$), du peroxyde d'hydrogène (H₂O₂), etc. En fortes quantités, ces molécules abiment les membranes cellulaires et les organites photosynthétiques. Afin de minimiser ces effets délétères sur ces derniers, des mécanismes se mettent en place, tels que la diminution de la fluorescence, de la chlorophylle ou le flétrissement des feuilles permettant de diminuer le flux de protons captés⁷²⁻⁷⁴.

2.2.3-3 Stratégies de réponse

Pour répondre au stress hydrique, les plantes ont une stratégie de résistance commune : se protéger des dommages cellulaires et maintenir au mieux les processus cellulaires^{54,75}.

Pour cela, il s'opère un réarrangement dans les voies métaboliques, favorisant celles qui permettent de faire face au problème. Dans un premier temps, on peut observer une augmentation d'hormones associées aux réponses aux stress comme l'éthylène, les jasmonates, l'acide abscissique et l'acide γ -aminobutyrique (GABA)^{76,77}.

Par la suite, divers événements métaboliques se mettent en place, comme la redirection des acides aminés vers des voies de synthèse, dirigées vers la survie de la plante et l'ajustement osmotique⁶⁸.

Résultant de ce remaniement métabolique, on peut constater une augmentation d'osmolites tels que la proline, des sucres et des enzymes antioxydantes comme la superoxyde dismutase (SOD), la catalase (CAT) ou la peroxydase (POD). L'ensemble de ces molécules sont impliquées dans la protection cellulaire et membranaire (régulation de l'excès d'ERO), l'ajustement osmotique et l'adaptation aux conditions stressantes^{65,68,75}.

Ces mécanismes de résistance ne fonctionnent cependant pas indéfiniment. Ils sont effectivement limités aux capacités de tolérance de la plante face à la durée et à l'intensité du stress. Ainsi, quand l'exposition excède les capacités de résistance au stress de la plante, cette dernière entre en phase d'exhaustion, qui peut la mener à la mort⁵⁴.

Pour pallier à ce genre de problématique dans les milieux extrêmement secs, les plantes indigènes ont développé diverses adaptations phénologiques⁴⁹, physiologiques (métabolisme de type Crassulacean Acid Metabolism (CAM)⁷⁸) et structurelles (stockage d'eau dans des tissus spécialisés⁷⁹) pour supporter ces milieux rares en eau.

2.3 Biostimulants

2.3.1 Généralités et définition

Les biostimulants sont un sujet de recherche apparu dans les années 80, qui a vu sa popularité exploser dans les années 2015 avec une réelle intensification des publications durant ces dernières années⁸⁰. Cette tendance se traduit économiquement aussi avec une appropriation progressive du marché. Le marché du biostimulant représentait globalement 1.45 milliard d'euros en 2016⁸¹, environ 3 milliards en 2021⁸² et est estimé à environ 6.7 milliards d'ici 2028⁸². Dans ce contexte, l'Europe semble se placer actuellement en leader avec une occupation d'environ la moitié du marché global^{83,84}.

Plus concrètement, les biostimulants n'ont pas encore un statut bien défini. Initialement considérés comme un sous-groupe des régulateurs de croissance des plantes⁸⁵, des définitions plus ou moins claires comme "Matériel qui n'est ni un fertilisant, ni un pesticide, mais qui, quand il est appliqué à une plante, va améliorer sa santé, croissance et protection" de Banks and Percival (2012)⁸⁵, ou « classe de produits "borderline" » de Torre et al.(2013)⁸⁵

démontrent la difficulté à caractériser ce type de produits. Dans ce document, nous nous baserons sur la définition émise par le conseil européen de l'industrie du biostimulant. En 2012, il a désigné les biostimulants comme des produits "contenant une ou plusieurs substances et/ou des micro-organismes dont la fonction, lorsqu'ils sont appliqués aux plantes ou à la rhizosphère, est de stimuler les processus naturels pour améliorer l'absorption des nutriments, leur efficacité, la tolérance au stress abiotique et la qualité des cultures"⁸⁶.

En comparaison avec les fertilisants chimiques, qui ne fournissent que les nutriments nécessaires à la croissance des plantes³⁴, les biostimulants agissent uniquement sur le métabolisme et ne sont pas considérés comme supplémentant la plante en nutriments, du fait qu'ils sont efficaces à faibles concentrations⁸⁷. Il est également important de mentionner, que par rapport à la catégorie des régulateurs de croissance, les biostimulants peuvent également contenir des traces d'hormones végétales. Ces hormones proviennent uniquement de l'activité physiologique du matériel dont elles sont issues⁸⁸. Ainsi, leurs actions ne doivent pas être attribuées à un effet précis que l'on observe sur la plante, sinon l'appellation « biostimulant » n'est pas possible⁸⁵. Ces produits n'agissant pas non plus directement sur les organismes ravageurs, ils ne peuvent être classifiés et réglementés comme des pesticides⁸⁸.

Les biostimulants sont issus d'une large diversité de sources biologiques et inorganiques⁸⁶, dont les plus courantes sont les extraits d'algues, les matériaux organiques complexes, les composants similaires aux hormones de plantes, les acides aminés et les acides humiques⁸⁹.

Ces produits sont classifiés actuellement sur la base de l'origine de leur ingrédient actif mais le nombre de catégories et leur contenu évolue toujours. Certains chercheurs proposeraient ainsi une classification basée sur l'effet du produit ou sur la réponse physiologique de la plante. Pour le moment, il semblerait que la classification en 8 catégories (acides humiques, matériel organique complexe, éléments chimiques bénéfiques, sels inorganiques, extraits d'algues, chitine et dérivés, antitranspirants, acides aminés libres et autres substances contenant de l'azote) de Dujardin (2012) soit la plus utilisée malgré des propositions plus récentes. Cependant il n'est pas imaginable d'affirmer que ces questionnements seront amenés à évoluer dans les années à venir. Il est également difficile de déterminer avec précision la composition de ces produits car ils sont souvent constitués de différents

composants qu'on ne peut pas bien quantifier et identifier. La compréhension du fonctionnement de ce type de produits est difficile car l'efficacité d'un biostimulant n'est pas forcément liée à une seule molécule active, mais peut être le résultat d'une synergie entre plusieurs composants du produit⁸⁵.

Malgré les difficultés à définir les biostimulants, la littérature s'accorde cependant sur leurs effets. Ces derniers agissent soit directement au travers des voies de signalisation de la plante en sur-exprimant ou sous-exprimant certains gènes ou par la stimulation du microbiome dans son environnement direct⁸⁶. Ils sont performants sur un ou plusieurs des points suivants : amélioration de l'utilisation des éléments nutritifs présents dans l'environnement, meilleure résistance aux stress biotiques/abiotiques et/ou amélioration de la qualité de la production⁸⁸.

Dans la partie suivante, il sera développé plus particulièrement les biostimulants en lien avec ce mémoire et leurs effets sur les stress abiotiques bien que des effets sur les stress biotiques aient été démontrés.

2.3.2 Extraits d'algues macroscopiques (EAM)

Les algues sont un produit utilisé depuis l'ère préhistorique que ce soit pour l'alimentation, la médecine ou par la suite la fertilisation⁸³. Aujourd'hui, le marché global de la production d'algues est estimé à 8.45 milliards de dollars (2018) et est amené à prendre de plus en plus de place dans les années à venir⁹⁰. A l'échelle globale, cette production est fortement dominée par l'Asie et issue de l'aquaculture. Dans d'autres parties du monde comme au Chili ou en Norvège, la récolte d'algues se fait essentiellement en milieu sauvage. A l'image de la Norvège, leader européen dans le domaine, 99% de la biomasse produite en Europe est issue de la récolte d'algues en milieu naturel⁹⁰. Sachant que les biostimulants sont un pôle dynamique du marché européen, que le marché des algues paraît en expansion tous secteurs confondus⁹⁰ et que les biostimulants conçus à partir d'EAM prennent environ 95 % du marché des biostimulants à base d'extraits de plantes⁸³, si l'activité n'est pas correctement régulée, d'importants dommages sur la structure des écosystèmes pourraient être réalisés, impactant les vertébrés dépendants des équilibres actuels^{90,91}.

Les algues macroscopiques (AM) sont des végétaux simplifiés qui poussent essentiellement le long de nos côtes. Elles sont classifiées en 3 groupes distincts basés sur leur photo-pigments: les algues rouges, les algues vertes et les algues brunes⁹². L'ensemble de ces trois lignées est étudié dans le cadre de la production de biostimulants. Cependant, la plupart des produits commercialisés sont issus d'algues brunes comme *Ascophyllum nodosum*, *Ecklonia maxima*, *Fucus serratus*, *Laminaria*, *Macrocystis pyrifera*, *Sargassum*, ou *Turbinaria spp*^{87,92}. En Europe, les plus courantes sont *Laminaria spp.* et *A nodosum*⁹⁰ car ces dernières requièrent des eaux assez froides pour se développer.

En comparaison avec les végétaux terrestres, les algues (plus spécifiquement les algues brunes et rouges) contiennent des polysaccharides complexes qui n'existent pas ailleurs⁹³.

En plus d'être hautement nutritifs, les extraits d'algues sont riches en polysaccharides (alginates, fucoïdanes, laminarines), en lipides utiles (stérols), en enzymes et autres molécules bioactives (bétaïnes, auxines, cytokinines) qui les rendent hautement intéressantes pour remplacer les pesticides et fertilisants classiques⁹²⁻⁹⁴.

Une nouvelle branche dans le domaine pourrait se développer dans les années à venir au travers de l'utilisation des microalgues qui semblent également donner des résultats intéressants⁹⁵.

2.3.2-1 Effet des biostimulants à base d'EAM

2.3.2-1a Fertilité des sols (plantes)

L'application de ces produits permet d'améliorer la structure du sol grâce aux caractéristiques de l'alginate et de stimuler le développement de microorganismes bénéfiques à la croissance des plantes^{92,93}.

Au niveau des plantes, les analyses démontrent une augmentation du ratio de masse sèche racines/feuilles, un développement du système racinaire, plus de feuilles, une meilleure photosynthèse et une précocité obtenue grâce aux biostimulants à base d'EAM. Les composés actifs agissent en synergie, permettant une amélioration de la productivité. En effet, l'auxine stimule la croissance racinaire, la bêtaïne agit comme un osmoprotectant au niveau du

photosystème et les cytokinines⁹² améliorent la mobilisation des nutriments. Cela permet ainsi une meilleure absorption de l'eau et des nutriments, une meilleure production d'énergie associée à une utilisation plus efficace des ressources obtenues^{93,96}.

De manière générale, les études montrent une stimulation de la croissance et de la productivité des cultures^{97,98}.

2.3.2-1b Mitigation du stress hydrique

Les biostimulants à base d'algues contiennent des molécules qui protègent les cellules, comme les bêtaïnes qui jouent un rôle d'osmoprotectant et d'autres, qui vont stimuler les défenses de la plante, comme les laminines. Ainsi, ce type de produit induit la surexpression de certains gènes impliqués dans la signalisation des stress, comme la synthèse d'ABA et d'antioxydants, le métabolisme de l'azote et le maintien de la photosynthèse^{94,99}. L'activation de ces voies métaboliques va permettre une meilleure activité physiologique sous stress^{99,100}.

Biochimiquement, on peut observer sur les plantes traitées des quantités plus importantes de proline, de phénols, de flavonoïdes et une augmentation de l'activité enzymatique (CAT, SOD, POD) permettant un contrôle des dommages cellulaires. L'ensemble des modifications physiologiques, appliquées par ces produits, va permettre une meilleure mitigation du stress oxydatif et une meilleure efficacité de l'utilisation de l'eau (conductance stomatique plus importante et une meilleure activité photosynthétique)^{94,100,101}.

En résultat, on obtiendra une amélioration des capacités de croissance de la plante par des régulations positives et négatives des voies de réponse au stress, de régulation de l'activité cellulaire et de la senescence⁹³.

2.3.2-2 Limite des produits

Bien que de nombreux produits soient commercialisés, les biostimulants à base d'extraits d'algues ne sont pas une catégorie homogène. En effet, des facteurs tels que les conditions de cultures de l'algue, le type d'algue et la méthode de production des produits vont faire varier les résultats^{13,102,103}.

2.3.3 Vermicompost et thé de vermicompost (TVC)

2.3.3-1 Définition

Le vermicompostage est une pratique qui a été développée par la biologiste Mary Appelhof dans les années 70¹⁰⁴. Ce processus a pour but d'utiliser des vers de terre afin de dégrader les déchets organiques (fumier et autres déchets agricoles, restes alimentaires, déchets verts, déchets industriels ou encore des restes d'animaux¹⁰⁵⁻¹⁰⁷) transformés en un terreau fertile que l'on appelle du vermicompost¹⁰⁵.

2.3.3-2 Caractérisation du vermicompost par rapport au compost

Le compostage et le vermicompostage sont deux techniques équivalentes quand il s'agit de répondre au besoin de disposer de tonnes de déchets organiques d'une manière durable¹⁰⁸.

Le compost est un processus aérobie qui dépend de microorganismes comme les bactéries, les champignons et les actinomycètes pour transformer des déchets organiques en un produit stable et exempté de pathogènes. Pendant le processus, le produit est dans un premier temps chauffé autour de 45-70 °C par les microorganismes (phase thermophile) puis, lors de la phase mésophile (ou de maturation), les composés organiques plus complexes restants finiront d'être dégradés plus lentement. Cette méthode requiert une intervention humaine pour le bon maintien du processus car une aération et une humidification régulières du substrat est importante pour le bon déroulé de la réaction^{109,110}.

Le vermicompostage est un processus similaire non-thermophile, qui implique des vers de terre et des microorganismes. Les vers de terre ont pour rôle de fragmenter le substrat en l'absorbant, en le digérant avant de le rejeter partiellement minéralisé. Dans le processus, ils absorbent une faible portion de ce qu'ils ingèrent (2-6% chez *Millsonia anomala*)¹¹¹. La surface de contact étant plus importante, les microorganismes se développent plus abondamment et décomposent plus aisément la matière restante. Le produit est ainsi dégradé plus rapidement et mieux structuré car les vers s'occupent de l'aération, du drainage et du mixage du substrat^{109,110}. Le maintien de conditions environnementales stables^{105,112} est important pour le processus parce que les vers requièrent certaines contraintes comme par exemple le maintien d'une humidité forte (au moins 60-70% d'humidité, jamais en dessous de 50%¹¹²).

2.3.3-3 Intérêt des produits finis

Bien que le compost et le vermicompost servent tous deux à amender les sols, stimuler la croissance des plantes^{113,114} et apporter des microorganismes bénéfiques dans les sols^{115,116}, ils présentent des différences.

La particularité du vermicompost réside dans la présence de phytohormones et autres régulateurs de croissance que l'on ne retrouve pas dans le compost. L'usage effectué par les vers est sans équivoque : le taux d'humification et de minéralisation est plus important, permettant une biodisponibilité de macronutriments (N,P,K,Mg) et de micronutriments (Mg, Na, Zn, Fe, Cu and Mn) plus conséquente ainsi qu'une stimulation de la communauté de microorganismes^{107,117-120}. En comparaison, le compost est considéré comme moins riche.

L'efficacité du vermicompost a été maintes fois prouvée sur de nombreuses plantes^{120,121}, la qualité du produit reste tout de même dépendante du type de matière première¹²², de l'espèce de vers utilisée¹²³ ainsi que de la méthode de production¹²⁴.

2.3.3-4 Vermicompost liquide

A partir du vermicompost il est possible de produire un vermicompost liquide que l'on nomme « thé de vermicompost ». Pour cela, il est nécessaire d'utiliser du vermicompost mûr que l'on brasse un certain temps avant de le filtrer. Le filtrat contiendra, comme la matière solide, des microorganismes, de l'humus, des nutriments, des hormones végétales et autres composants actifs. Ce phénomène de transfert est réalisable car les nutriments insolubles sont solubilisés par les microorganismes et ces nutriments, à leur tour, favorisent le développement de microorganismes^{121,125}. Il existe deux méthodes de production, en anaérobie ou en aérobie. Les deux types de produits ne seront pas utilisés pour les mêmes objectifs culturels¹²¹.

En comparaison avec le vermicompost solide, avec une faible concentration de produit¹², le thé de vermicompost présenterait des réponses végétales similaires à son homologue solide

en termes de stimulation de la croissance^{12,126–128} et de résistance aux stress abiotiques¹²⁸ et biotiques¹²⁷.

Dans certaines études comparant les deux formes du produit, il a même été démontré que le thé de vermicompost pouvait avoir une meilleure efficacité sur le contrôle des organismes pathogènes. Etant assez simple à appliquer, il est envisagé comme une solution durable pour remplacer l'utilisation de certains fongicides¹²¹.

2.3.3-5 Les applications du vermicompost et du thé de vermicompost

2.3.3-5a Fertilité des sols et croissance des plantes

L'apport de matière organique par du compost ou du vermicompost permet d'améliorer la structure du sol en agrégeant les particules, ce qui permet d'améliorer l'infiltration de l'air, le drainage et la capacité de rétention de l'eau et des nutriments.

Grâce à la taille des particules produites par les vers, le vermicompost améliore plus fortement ces trois points et, en particulier, la rétention des nutriments.

Cette caractéristique permet l'apport d'une bonne source de nourriture pour les microbes du sol, ce qui va aider à amplifier les populations et la diversité des microorganismes. Cet accroissement microbien va améliorer le recyclage de la matière et accentuer la biodisponibilité de certains nutriments pour les plantes grâce à l'augmentation de la production d'enzymes extracellulaires microbiennes¹⁰⁷.

A long terme, l'application répétée de vermicompost a ainsi le potentiel d'améliorer la fertilité des sols. ^{111,119,120}

Les racines de plantes évoluent dans un sol moins compacté, avec des nutriments comme l'azote, beaucoup plus disponibles, améliorant ainsi leur elongation et la qualité de la nutrition.

Au niveau végétatif, cela s'observera par une croissance plus rapide, une biomasse et une teneur en chlorophylle plus importante^{111,119,120,126,127}.

Les analyses biochimiques montrent également une plus grande quantité de minéraux dans les feuilles (N, P, K, Mg, Ca) et la présence d'hormones et d'autres médiateurs induits par la diversité microbienne présente^{12,126}.

A travers l'amélioration de divers aspects de la physiologie des plantes, le vermicompost et son homologue liquide auraient un impact positif sur la qualité des récoltes^{119,120}.

2.3.3-5b Résistance aux stress abiotiques

Les stress abiotiques, comme le manque d'eau, les températures fortes ou la salinité, altèrent les capacités des plantes à se développer correctement. L'application de vermicompost permet globalement d'améliorer les conditions de croissance¹²⁹ en situation de stress, qu'il soit utilisé en priming¹³⁰ ou sur des plantes à divers stades de croissance¹³¹.

La première constatation est souvent une augmentation de la taille des plants par rapport à leur contrôle¹²⁹. Cela serait associé à la concentration de nutriments et à l'activité des microorganismes comme des stabilisateurs d'azote ou la symbiose mycorhizienne qui compensent l'indisponibilité générée dans le sol et améliorent les capacités d'assimilation de la plante¹³²⁻¹³⁴.

Les phytohormones et autres éléments phytochimiques jouent aussi un rôle essentiel au niveau de la régulation des voies de biosynthèse.

On observe également une capacité de réponse au stress plus efficace^{126,134}. La tolérance et l'ajustement osmotique des plantes sont améliorés avec plus de protéines solubles et une concentration de la proline plus importante. L'augmentation de la concentration d'antioxydants dans les feuilles diminue aussi les risques de dommages liés aux ERO et permet un meilleur maintien de la photosynthèse. Au final, cela permet d'obtenir un meilleur rendement^{120,134-138,139}.

2.4 Tomates

2.4.1 Intérêt économique

Originnaire d'Amérique du sud¹⁴⁰, la tomate a été importée en Europe au XVIe siècle^{140,141} et est devenue depuis le XXe siècle¹⁴² un des aliments les plus importants à travers le monde¹⁴³.

En 2000, sa production mondiale était estimée à 109 millions de tonnes et, en 2020, on l'estime à environ 186,8 millions de tonnes⁷. En l'espace de 20 ans, la production a doublé, à tel point qu'aujourd'hui, la tomate est la deuxième culture maraichère la plus consommée après la pomme de terre^{143,144}. Il est donc assez clair que la tomate est un objet d'intérêt économique majeur.

Bien que cette dernière soit produite dans de nombreux pays, les producteurs les plus importants sont la Chine, suivie de l'Inde, la Turquie et les Etats-Unis (2020)⁷. A eux seuls, ils représentent à peu près de 60% de la production mondiale de cette année-là.

2.4.2 Caractéristiques du sous-genre *Lycopersicon*

La tomate cultivée (*Solanum lycopersicum* L.) fait partie de la grande famille des solanacées¹⁴⁰. *Solanum* est le plus grand genre de cette famille avec 1250 à 1700 espèces présentes à travers les continents¹⁴⁰. De ce fait, ce genre contient des individus provenant d'une grande variété d'habitats et de climats et qui présentent une grande diversité d'adaptations et de morphologies^{140,145,146}. En plus de la tomate cultivée, il contient d'autres plantes de grand intérêt économique, comme la pomme de terre (*S. tuberosum* L.) ou l'aubergine (*S. melongena* L.).

Le sous-genre *Lycopersicon* qui regroupe *Solanum lycopersicum* et 12 autres espèces sauvages sympatriques (ex : *S. pennellii*), est considéré comme le groupe d'espèces principal chez les tomates.¹⁴⁷ Il existe deux autres sous-groupes partiellement sympatriques, *Lycopersicoides* et *Juglandifolia*, qui se rattachent à ce dernier¹⁴⁷. Ces groupes partagent des caractéristiques facilement distinguables des autres genres de *Solanum* :

- Des fleurs bien jaunes, dont la forme reste semblable au genre *Solanum*
- Des feuilles pennatifides et dépourvues d'épines¹⁴⁸

La plupart de ces espèces poussent comme des herbacées pérennes à courte durée de vie dans leur environnement naturel. Leur croissance est normalement indéterminée avec une répétition d'unités comportant au moins deux feuilles et une inflorescence. Généralement, on peut observer un nombre de feuilles constant entre les différentes inflorescences d'une plante (2-3 pour le sous-groupe *Lycopersicon*)¹⁴⁸.

Par-delà les similitudes morphologiques, la majorité des espèces de tomates sont également des individus diploïdes avec un nombre ($2n=24$) et une structure des chromosomes fortement conservés^{148,149}. Cela permet la mise en place de certains croisements au sein du clade *Lycopersicon* mais pas avec les sous-groupes associés¹⁴⁷. La capacité de croisement est dépendante de la modalité de reproduction des espèces. Elles peuvent en effet être allogames auto-incompatibles, auto-compatibles mais peuvent faire de l'allogamie ou totalement être autogames et auto-compatibles^{150,151}.

2.4.3 Tomate cultivée

La tomate cultivée (*S.lycopersicum*) est une plante qui requiert une température entre 18 et 25 °C pour une croissance et une production optimales. De ce fait, dans l'hémisphère nord, il est courant de les cultiver en serres ou uniquement sur la période estivale¹⁵². On les considère généralement comme des plantes annuelles dans les zones tempérées¹⁵³.

C'est une plante assez facile à cultiver car cette espèce est autogame. Elle a la particularité, vis-à-vis de ses homologues sauvages, d'avoir une plus faible diversité génétique. Cette dernière a été renforcée par sélection artificielle⁴⁵. Les manipulations ont permis d'obtenir des fruits plus gros et l'apparition d'une large variété de formes et de couleurs^{152,154}. L'affaiblissement génétique a cependant pour conséquences d'avoir créé une plante sensible à de nombreux stress biotiques et abiotiques^{154–156}.

Les défis de la science sont aujourd'hui de créer des plantes qui répondent à nos besoins et qui sont capables de résister aux différents stress qu'elles rencontrent⁵¹.

2.4.4 Variété moneymaker

La tomate money maker est une variété issue de *S.lycopersicum*. Cette plante à croissance indéterminée¹⁵² peut atteindre 2 mètres de hauteur^{157,158}. Cultivée à l'origine en serre¹⁵⁹, elle se comporte bien en terrain découvert¹⁵⁹. Elle est facile à cultiver^{158,159}, supporte les milieux humides¹⁶⁰ et est considérée comme ayant une assez bonne résistance aux maladies^{157,158,160}.

Elle a un cycle court avec l'apparition des premiers fruits au bout d'environ 90 jours¹⁵⁸ et est très productive¹⁵⁷⁻¹⁵⁹, pouvant former jusqu'à 7 grappes¹⁵⁸ portant de 6 à 12 fruits^{157,159}. Les fruits pèsent en moyenne 100 à 180 grammes¹⁵⁹.

3.Objectifs

La littérature a démontré que le terme biostimulant regroupait une large diversité de produits autant par leur origine que par leurs effets. Ces produits ayant démontré pour certains une mitigation des stress abiotiques sont d'un intérêt agronomique certain. Cependant, cet intérêt se limite assez régulièrement au rendement obtenu sans comprendre les mécanismes sous-jacents, ainsi des questions comme l'impact sur la physiologie de la plante ou la composition des produits sont des sujets moins régulièrement abordés.

L'objectif général de ce mémoire était de comparer 5 biostimulants de composition et de provenances diverses sur une espèce d'intérêt agronomique, la tomate cultivée (*Solanum lycopersicon*), afin de voir si ces biostimulants améliorent sa résistance au stress hydrique.

Plus spécifiquement, nous avons cherché à :

- 1) comparer les paramètres physico-chimiques et la composition minérale de ces biostimulants.
- 2) comparer l'impact de ces biostimulants sur la croissance et la reproduction de la tomate en présence et absence de stress hydrique.
- 3) comparer l'impact de ces biostimulants sur la physiologie (statut hydrique, photosynthèse, nutrition minérale) de la tomate en présence et absence de stress hydrique.
- 4) comparer l'impact de ces biostimulants sur la production et la qualité des fruits de la tomate en présence et absence de stress hydrique.

Au cours de ce travail, nous avons utilisé un produit à base de de vermicompost (thé de vermicompost) et quatre à base de différentes algues :

- Green Booster (PurVer)
- Bio-F20 (Bio-Atlantis)
- Kelpak (Omex)
- Seamelpur (Olmix)
- Biostimulant produit par North Sea Farmer

Deux de ces biostimulants à base d'algues ont montré par le passé des résultats intéressants pour le maintien du rendement chez la tomate sous stress hydrique et deux sont considérés comme étant moins intéressants¹⁶¹. Des essais avec le vermicompost PurVer chez *Atriplex atacamensis* en réponse au stress à l'arsenic a précédemment montré une amélioration de la tolérance de la plante aux métaux lourds¹⁶².

Dans un premier temps, nous avons analysé plusieurs paramètres physico-chimiques des produits dans le but de les caractériser et de faire des liens avec ce que nous observons sur le matériel végétal. Nous avons également analysé la stabilité du produit à base de thé de vermicompost issu de la compagnie PUR VER® en comparaison de données précédentes.

Dans un second temps, nous avons appliqué ces produits par pulvérisation sur des plantes de tomate en stress hydrique ou non et nous avons suivi plusieurs paramètres du cycle de vie de la plante et de sa physiologie (croissance végétative, paramètres de floraison et de reproduction, production de fruits, gestion du stress, ...) afin de comprendre comment ces produits amélioraient la résistance de la tomate au stress hydrique.

Nos hypothèses de travail sont que :

- Un ou plusieurs de ces produits améliorent la résistance de la tomate au stress hydrique en stimulant la physiologie de la plante et ainsi sa croissance et son développement.

- Un ou plusieurs de ces produits améliorent les paramètres liés à la production des fruits.
- Les caractéristiques minérales des produits vont influencer la composition minérale des plantes.

4. Matériel et méthode

4.1 Caractérisation des biostimulants

4.1.1 Présentation des produits

Dans cette expérience, il a été utilisé 4 biostimulants à base d'algues fournis par monsieur B.Vandoorne et un biostimulant à base de thé de vermicompost fourni par monsieur G.Sempo.

Tableau 1 Liste des biostimulants utilisés et des organismes dont sont issu les produits

Code d'expérience	Organisme d'origine	Distributeur	Nom commercial
asco	<i>Ascophyllum nodosum</i>	Bio-Atlantis	Bio-F20
eckl	<i>Ecklonia maxima</i>	Omex	Kelpak
soli	<i>Solieria chordali</i>	Olmix	Seamel pure
nsf	<i>Laminaria sp.</i>	North Sea Farmer	/
pur	<i>Eisenia fetida</i>	PurVer	Green Booster

4.1.2 Analyse des paramètres généraux des biostimulants

Les paramètres suivants ont été mesurés sur l'ensemble des biostimulants dans les concentrations pulvérisées sur les plantes :

- le pH (pH mètre Mettler Toledo (FE20/EL20))
- la conductivité électrique (conductimètre (WTW LF92 avec sonde Tetracon 96))
- la pression osmotique (VAPRO® Model 5600 osmomètre du groupe ELITech)

Dans la continuité d'un précédent mémoire¹⁶², ces mêmes paramètres ainsi que les résidus secs ont été mesurés sur le produit PurVer non dilué.

Pour chaque mesure 3 répliques ont été réalisées.

Pour la mesure par le pH-mètre et le conductimètre le produit a été homogénéisé, puis versé dans un bécher dans un volume suffisant pour que les sondes mesurent correctement les valeurs. La mesure a été répétée sur le même échantillon.

La pression osmotique a été mesurée à partir d'1ml de produit homogénéisé. Après la calibration de la machine, l'échantillon a été homogénéisé puis 10µL ont été prélevés pour réaliser la mesure.

Les résidus secs ont été déterminés à partir d'1ml de produit homogénéisé, puis asséchés dans un incubateur à 70°C pendant 48h.

4.1.3 Dosage de la composition minérale des biostimulants

Afin de comparer les produits, les éléments suivants ont été quantifiés : Ca, Mg, K, Na, Zn, Cd, Fe et Cu.

Il a été réalisé deux répliques de chaque produit, dilués aux concentrations et au volume déterminées pour pulvériser une plante (cf. partie Concentrations appliquées), puis le volume de la solution a été ajusté à 10 ml avec de l'eau distillée.

On a prélevé 1ml de cette dernière que l'on a associé à 4ml d'acide nitrique concentré pour digérer la matière organique présente avant de faire évaporer le liquide sur un bain de sable.

Dans un second temps, les résidus obtenus sont dissous à l'aide de 2ml d'eau régale composée d'un mélange de HCL et de HNO₃ concentrés (3 :1, V/V). La solution obtenue retourne quelques minutes sur le bain de sable et est finalement portée à 10ml avec de l'eau déminéralisée et filtrée.

Le dosage se fait ensuite avec un spectrophotomètre à absorption atomique (S Series, ThermoScientific).

La concentration des éléments est calculée à partir de l'équation suivante :

$$Cc (mg.L^{-1}) = \frac{C * V}{Vi * fd}$$

Où C correspond à la concentration mesurée dans l'échantillon (mg/L), V le volume d'échantillon (L) Vi le volume prélevé dans la solution de biostimulant (L) et fd le facteur de dilution.

4.1.4 Dosage du rapport C/N

Le rapport C/N a été mesuré par la technique de combustion catalytique à l'aide d'un analyseur C,N,S sur les différents biostimulants en tripliquas.

Premièrement, les résidus secs ont été déterminés à partir de 3 réplicas d'1ml de biostimulant préalablement homogénéisé. Le biostimulant eckl a subi un seul réplica de 500µl dû au manque de produit. Ceci nous a permis de déterminer la quantité de biostimulant à utiliser pour le dosage C/N.

Pour le dosage proprement dit, des cupules en aluminium ont été placées 24h dans un dessiccateur puis pesées à l'aide d'une balance de précision. 3 réplicas de 200µl de produit sont ensuite déposés pour les biostimulants asco, soli et nsf, 3 réplicas de 1ml pour pur (plus forte dilution du produit par rapport aux autres) et 1 réplica de 200µl pour eckl. Les cupules sont ensuite placées 48h dans une étuve à 40°C. Les cupules sont par après pliées soigneusement pour évacuer l'air présent, redéposées 24h dans un dessiccateur avant d'être pesées et analysées.

4.2 Impact des biostimulants sur la résistance des plantes au stress hydrique

4.2.1 Matériel végétal et condition de culture

La plante utilisée est la tomate cultivée *Solanum lycopersicum* cv. Moneymaker. Les graines ont initialement été obtenues du TGRC (Tomato Genetic Resource Center, UC Davis, USA, accession LA2706) avant multiplication au laboratoire.

150 graines ont été plantées dans des bacs de germination remplis de terreau (substrat d'argile n°9 eleve DCM) et placés sous conditions contrôlées en serre. Une fois le terreau humidifié, une plaque de verre a été déposée par-dessus chaque bac pour maintenir l'humidité à l'intérieur et favoriser la germination. La plaque est retirée dès que les semis ont besoin de plus d'espace pour croître. L'arrosage des semis se fait trois fois par semaines à partir de cet événement.

Les semis sont repiqués en terreau dans des pots de 7 cm de diamètre 2 semaines après le semis avant un 2^e repiquage deux semaines plus tard dans des pots de 1,5L. Les plantes ont été cultivées en serres tempérées avec une photopériode de 16h, une température moyenne de 25,26°C ($\pm 3,18$), une humidité relative de 58.55 % ($\pm 9,44$), intensité lumineuse minimale de 120 $\mu\text{mol.m}^{-2} \text{ s}$ grâce à un éclairage d'appoint (LumiGrow Pro Series LED Lighting Systems)

Un stress hydrique a été appliqué à la moitié des plantes par arrêt d'arrosage à partir de 33 jours après le semis. Les plantes témoins ont été arrosées 3 fois par semaines afin de maintenir une teneur en eau du sol de 40 % et les plantes stressées ont été arrosées 2 fois par semaine afin de maintenir une teneur en eau du sol de 20 %. La teneur en eau du sol a été mesurée 1 fois par semaine le vendredi avant l'arrosage à l'aide d'une sonde ProCheck (DECAGON DEVICE) pour ajuster les quantités d'eau apportées. Cinq biostimulants ont été appliqués de sorte qu'il y avait 10 plantes par condition de stress et biostimulant. Les pulvérisations ont débuté en même temps que la mise en place du stress hydrique. A part pour le produit asco, l'ensemble des produits sont pulvérisés foliairement tous les quinze jours. Le produit asco n'a été pulvérisé que 2 fois (lors de la première pulvérisation et en milieu de culture, avant l'apparition des fruits, le 21/04) selon les recommandations d'utilisation reçues.

De l'engrais organique légumes et plantes aromatiques de la marque DCM a été ajouté le 29/04 pour tenter d'aider nutritionnellement les plantes, puis un rempotage a été effectué dans la semaine suivante. Des traitements phytosanitaires également ont été appliqués à la suite d'une infection de chenilles (*Tuta absoluta* Meyrick) et de thrip.

4.2.2 Design expérimental

Dans cette expérience les plantes ont été réparties en trois blocs principaux : les contrôles sans traitements, les plantes arrosées avec traitement et les plantes stressées hydriquement avec traitement. Au sein de ces blocs la répartition des traitements était aléatoire (Figure 1) .

Des plantes supplémentaires ont été ajoutées entre la plupart des traitements pour limiter la contamination des traitements voisins par le produit pulvérisé.

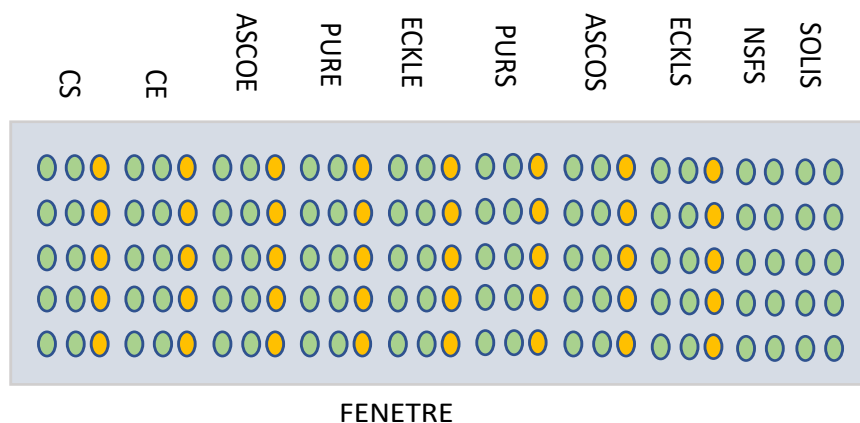


Figure 1 Positionnement des différents traitements dans la serre. Les points verts correspondent aux plantes qui ont été traitées et les points orange aux plantes supplémentaires. Pour chaque code, la dernière lettre correspond au traitement hydrique : arrosé (E) ou en stress (S), le reste du code correspond au produit pulvérisé (cf. Tableau 1) et aux contrôles (C).

4.2.3 Concentrations appliquées

La concentration appliquée sur les plantes est basée sur les concentrations appliquées dans le rapport d'essais fourni par B.Vandoorne¹⁶³ pour les biostimulants à base d'algues. ASCO, NSF et ECKL étant exprimées en litres par hectares, la densité en plantes de cette expérience a été ramenée à l'hectare pour déterminer la quantité de produit appliquée à une plante. SOLI étant exprimé en ml par litres a été calculé différemment. Cela nous mène à une quantité de 0.13 ml par plante pour ASCO, 0.1 ml pour NSF, de 0.18 ml pour ECKL et de 0.053 ml pour SOLI.

Pour le thé de vermicompost, une quantité de 0.4 ml par plante est appliquée.

Afin de faciliter l'application, ces quantités ont été diluées dans une quantité d'eau distillée égale à 5 ml par plante. Ce volume a évolué en fonction de la croissance des plantes pour garder une couverture de pulvérisation sur l'ensemble de la plante.

4.3 Etude du matériel végétal

4.3.1 Mesures morphologiques

Un suivi de croissance a été effectué tous les quinze jours du 29 mars au 16 mai sur l'ensemble des plantes par condition. Les mesures ont débuté 33 jours après le semi. Les paramètres mesurés étaient :

-Le nombre de feuilles. Le nombre de feuilles vivantes, mortes et attaquées par *Tuta absoluta* Meyricka été comptabilisé sur l'axe principal de chaque plante.

- Le nombre d'axes secondaires.

Il a été considéré comme axe secondaire les bourgeons axillaires se formant à l'aisselle des feuilles mesurant plus de 2cm de long.

-La taille des plantes.

La taille a été mesurée une première fois lors de la première application de biostimulants, puis un mois après. La longueur mesurée s'est étendue de la surface du terreau au-dessous de l'apex.

Le taux de croissance a été calculé comme suit :

$$\text{taux de croissance}(\%) = \frac{\text{taille 2} - \text{taille 1}}{\text{taille 1}} * 100$$

- Le nombre d'inflorescences produites sur l'axe principal

- Le nombre d'ébauches florales par inflorescence.

Le nombre de boutons floraux, de fleur en anthèse et d'ébauches de fruits ainsi que le nombre d'avortements a été compté pour chaque inflorescence de la tige principale.

- Le temps de floraison.

Le nombre de feuilles entre chaque inflorescence a été quantifié entre la première et la deuxième inflorescence.

4.3.1-1 Poids frais, poids sec et teneur en eau

62 jours après le semi, 3 plantes ont aléatoirement été récoltées. Les inflorescences, tiges et feuilles ont été séparées et pesées directement. Pour obtenir le poids sec, les éléments ont

ensuite été mis à sécher 3 jours à 70 °C avant d'être pesé à nouveau. Avec ces deux valeurs on calcule le contenu en eau à l'aide de la formule suivante :

$$\text{contenu en eau (\%)} = \frac{\text{poids frais} - \text{poids sec}}{\text{poids frais}} * 100$$

4.3.1-2 Mesure de la fertilité des fleurs

4.3.1-2a Mesure de la viabilité pollinique

Des fleurs en anthèse ont été prélevées le 28/03 (entre 1 et 7 en fonction de la condition) et analysées dans les 48h (conservation au frigidaire).

Deux étamines sont prélevées et déposées individuellement sur des lames avant que l'on y ajoute une goutte du colorant d'Alexander (1969). Les étamines sont soigneusement écrasées pour faire sortir le pollen dans le colorant. Une lamelle est déposée et on laisse agir le colorant 15 minutes avant d'analyser sous microscope les grains viables (colorés en rouge-mauve avec un contenu granuleux et dense) et non-viables (non colorés, d'apparence vide). Un minimum de 200 grains de pollen est analysé par fleur récoltée.

Pour la préparation du colorant d'Alexander (1969) on doit ajouter dans l'ordre suivant : de l'alcool à 95% 1:10 (V/V), du vert de malachite 1:10 (m/V), de l'eau distillée 1:2 (V/V), du glycérol 1:4 (V /V), du phénol 1:20 (m/V), du chloral hydraté 1:20 (m/V), de l'acide fuschine 1:2 (m/V), du orange G 1:20 (m/V) et de l'acide acétique glacial 1:50 (V/V). Mélanger les produits ensemble puis conserver dans un flacon opaque.

Les mesures sont données par rapport au volume final de la solution.

4.3.1-2b Mesure de la réceptivité stigmatique

Les fleurs en anthèse prélevées pour viabilité pollinique ont également été utilisées pour mesurer la viabilité stigmatique. Les styles ont été prélevés le jour même et placés séparément dans un pilulier. Ces derniers ont été trempés 5 minutes dans une solution contenant en base 25 ml de tampon acétate auquel on ajoute 16.5 mg de CaCl₂, 12,5 mg de 3-amino-9-ethylcarbazole préalablement diluée dans 1 ml de N-N-diméthylformamide et 0.125 ml de H₂O₂ à 3% (v/v).

Les parties réceptives se colorent en rouge/noir, plus la réceptivité diminue moins les styles sont réceptifs. Entre 1 et 7 pistils ont été analysés par condition.

4.3.1-3 Récolte des fruits

La récolte s'est déroulée sur une période d'environ 4 semaines à partir du 24/05 où un maximum de 10 fruits a été récolté pour chaque traitement.

4 mesures ont été prises sur ces fruits :

- Le poids des fruits à l'aide d'une balance de précision à 4 chiffres
- La circonférence a été mesurée à l'endroit où le fruit était le plus gros à l'aide d'un pied à coulisse
- La sucrosité à l'aide d'un réfractomètre (Eclipse Handheld Refractometer, modèle Brix 50 Low Volumes)
- Le pH à l'aide de bandelettes pH colorimétriques (Dosatex, bande allant de 3.6 à 6.1)

4.3.2 Mesures physiologiques

4.3.2-1 Chlorophylle et contenu en azote

A l'aide du Plant nutritional analyzer (TYS-3N/4N), le contenu en azote (mg.g^{-1}) la teneur en chlorophylle au temps de la mesure (SPAD) et la température ($^{\circ}\text{C}$) des feuilles a été mesurée le 21/04.

3 répétitions ont été réalisées sur 3 plantes par condition sélectionnées au hasard. La première feuille bien verte et bien développée en partant du haut de la plante a été choisie pour prendre la mesure.

4.3.2-2 Potentiel hydrique

Le potentiel hydrique a été mesuré à l'aide d'une bombe à pression de Schölander sur 3 plantes par conditions le matin du 22/04. Une feuille complètement formée et verte est placée dans la chambre avec le pétiole dépassant à l'extérieur de la machine. On calibre la machine

au diamètre du pétiole pour que l'air ne puisse pas s'échapper, avant de pressuriser la chambre. Dès qu'une bulle d'eau se forme sur l'extrémité du pétiole on note la mesure obtenue.

4.3.2-3 Conductivité stomatique

La conductivité stomatique a été mesurée avec un poromètre (Ltd., Cambridge) sur la première feuille bien verte et bien développée de 3 plantes au sein de chaque condition. Le capteur dans la pince doit complètement être recouvert par le matériel et la luminosité doit être suffisante pour que la mesure de la machine soit stable.

4.3.2-4 Chlorophylle, statut azoté, flavonols et anthocyanes

A l'aide de l'analyseur de feuilles DUALEX®, la teneur en chlorophylle ($\mu\text{g}.\text{cm}^{-2}$), le statut azoté (NBI = Nitrogen Balance Index), la teneur en flavonols et anthocyanes épidermiques (unité relative d'absorbance) ont été mesurés le 10/05.

10 répliques ont été réalisées pour chaque condition. Des feuilles bien vertes et bien développées en partant du haut de la plante ont été choisies pour prendre la mesure.

4.3.2-5 Conductance stomatique, fluorescence et taux de transport d'électrons

La conductance stomatique ($\text{mol}.\text{m}^{-2}.\text{s}^{-1}$), la fluorescence de la chlorophylle et le taux de transport d'électrons ($\mu\text{mol}.\text{m}^{-2}.\text{s}^{-1}$) ont été mesurés à l'aide du Poromètre/Fluorimètre LI-600 (LI-COR) le 10/05.

Entre 4 et 15 répliques ont été réalisées en fonction des traitements. Des feuilles bien vertes et bien développées en partant du haut de la plante ont été choisies pour prendre la mesure.

4.3.2-6 Malondialdehyde (MDA)

La méthode utilisée est tirée de Heat & Packer (1968). La mesure a été réalisée à partir de 250 mg du pool broyé dans de l'azote liquide des feuilles de chaque plante pour 3 plantes par condition

Cette poudre est suspendue et homogénéisée dans 5ml d'acide trichloroacétique (TCA) contenant 1,25% de glycérol. L'homogénat est ensuite centrifugé 10 minutes à 12 000 g (4°C), puis filtré et le surnageant est récupéré. On prélève 2 ml de surnageant auquel on ajoute 2 ml d'acide thiobarbiturique (0,67 %) que l'on homogénéise ensuite.

L'ensemble des échantillons ont été déposés 30 minutes dans un bain-marie à 100 °C, puis refroidis sur glace avant d'être à nouveau centrifugé 1 min à 12000 g.

On mesure l'absorbance des solutions à 532 et 600 nm. Pour retirer l'absorbance non-spécifique, on soustrait à l'absorbance à 532 nm l'absorbance à 600 nm au spectrophotomètre (Shimadzu UV-1800).

La concentration de MDA dans la solution est déterminée comme suit :

$$Cc \text{ (mmol. L}^{-1}\text{)} = \frac{A}{\varepsilon}$$

Avec A l'absorbance corrigée et ε le coefficient d'extinction molaire.

La concentration de MDA dans le matériel végétal est déterminée comme suit :

$$C \text{ (mmol. g}^{-1}\text{)} = \frac{Cc * fd * V}{m}$$

Avec fd le facteur de dilution, V le volume initial (L) et m la masse de matière végétale utilisée (g).

4.3.2-7 Dosage des sucres solubles totaux

La méthode est tirée de Yemm and Willis (1954).

Le dosage a été réalisée à partir de 250 mg de matière fraîche du pool broyé dans de l'azote liquide des feuilles de chaque plante pour 3 plantes par condition.

Pour l'extraction, la matière broyée a été versée dans un falcon contenant 4 ml d'éthanol à 70 % (V:V), déposée sur glace 5 minutes puis centrifugées à 8000 rpm (4°C) pendant 10 minutes.

Le surnageant est filtré et le culot récupéré dans 2ml d'éthanol à 70% et homogénéisé avant d'être redéposé sur glace et centrifugé à nouveau 10 minutes (8000 rpm à 4°C). Le surnageant obtenu est additionné au surnageant de l'étape précédente.

On réitère cette manipulation une troisième fois, puis on porte le volume de surnageant à 7ml avec de l'éthanol à 70 %.

Pour le dosage, une solution d'Anthrone composée d'eau distillée, d'H₂SO₄ (1:20, V/V) et d'anthrone (2:1, m/V par rapport au H₂SO₄) et une solution de glucose (éthanol à 70 % comme solvant) ont été préparées pour construire la gamme étalon et analyser les échantillons.

On prélève 200 µl d'échantillon auquel on ajoute 1 ml d'Anthrone. Après homogénéisation, les solutions sont incubées 10 minutes dans un bain-marie à 100°C avant d'être déposées sur glace pour stopper la réaction.

La mesure est lue au spectrophotomètre (Shimadzu UV-1800) à 625 nm.

La concentration en sucres solubles totaux dans l'échantillon de départ est calculée comme suit :

$$C(\text{mg. g}^{-1} \text{ MF}) = \frac{C_c * V}{m}$$

Avec C_c la concentration dans la solution (mg.L⁻¹), V le volume de départ (L) et m la masse de matière fraîche (g)

4.3.2-8 *Éléments minéraux (NA, K, Ca, Mg, Fe, Zn, Cu)*

Le dosage des éléments minéraux a été réalisé à partir du pool broyé des feuilles de chaque plante (matière sèche). Pour chaque condition, 3 répliques contenant 50 à 100 mg de broyat ont été analysés. Le processus de minéralisation et d'analyse est similaire à ce qui a été décrit pour la minéralisation des biostimulants.

Le cadmium n'a pas été dosé à la suite de son absence lors de l'analyse des biostimulants.

La quantité de minéraux dans les feuilles a été calculée avec la formule suivante :

$$Q \text{ (mg.g}^{-1}\text{)} = \frac{C * V}{m}$$

Où C correspond à la concentration mesurée dans la solution (mg/L), V le volume initial (L) et m la masse pesée du matériel végétal (g).

4.5 Statistiques

Les analyses et les graphiques ont été réalisés sur la version 4.0.4 du logiciel Rstudio.

L'ensemble des données ont été soumises à un test de Shapiro-Wilky pour vérifier la normalité et un test de Breusch-Pagan a été utilisé pour vérifier l'homoscedasticité. Si les deux conditions étaient respectées un modèle linéaire a été mis en place pour analyser les données à l'aide d'Anova 1 et 2. Un test de Tuckey a été utilisé en post-hoc.

Si les conditions ne sont pas respectées, un test de Kruskal-Wallis associé à un test de Dunn et de Wilcox ont été utilisés.

Une analyse en composante principale et des analyses de corrélations ont également été faites sur certaines données. Les corrélations ont été réalisées à l'aide d'un test de Spearman.

5. Résultats

5.1 Comparaison physico-chimique des biostimulants

Cinq biostimulants ont été comparés au niveau physico-chimique en utilisant les concentrations appliquées aux plantes (tableau 1) : Bio-F20 fabriqué à partir d'*Ascophyllum nodosum* (Asco), Kelpak fabriqué à partir d'*Ecklonia maxima* (Eckl), un produit de North Sea Farmer fabriqué à partir de *Laminaria sp* (NSF), Green Booster issu de *Eisenia fetida* (Pur), Seamelpure fabriqué à partir de *Solieria chordali* (Soli). Tous sont à base d'extrait d'algues à l'exception de Pur qui est à base de thé de vermicompost, Les paramètres physico-chimiques du produit Pur non dilué sont disponibles en annexe 1.

Les biostimulants variaient par leur pH dont les valeurs étaient entre 5,29 chez Eckl et 7,56 chez NSF, à l'exception de Soli qui présentait un pH fortement acide (<3) (tableau 2). La conductivité électrique différait aussi entre biostimulants (Tableau 2) : elle était particulièrement faible chez Pur, intermédiaire chez Eckl et Soli et plus élevée chez NSF et Asco. Concernant le potentiel osmotique, les valeurs variaient d'un facteur 50 selon les produits, allant de -0,013 MPa chez Pur à -0,724 MPa chez Soli (tableau 2). Les valeurs de potentiel osmotique n'étaient pas spécialement corrélées à celles de conductivité électrique, même pas 1% de la variation du potentiel osmotique ne pouvant être expliquée par ces données ($R^2 = 0.000674$, $p\text{-val} = 0.927$).

Tableau 2 : Caractéristiques physico-chimiques des biostimulants aux concentrations appliquées, $n=3$

	Asco	Eckl	NSF	Pur	Soli
pH	5,71 ± 0,01 c	5,29 ± 0,006 b	7,56 ± 0,006 e	6,65 ± 0,006 d	2,88 ± 0,006 a
Conductivité (mS.cm ⁻¹)	5,55 ± 0,699 a	1,87 ± 0,011 b	3,90 ± 1,718 a	0,14 ± 0 c	1,87 ± 0,006 b
Potentiel osmotique (MPa)	-0,182 ± 0,014 b	-0,025 ± 0,005 c	-0,130 ± 0,009 b	-0,013 ± 0,008 c	-0,724 ± 0,056 a

Les valeurs suivies par une même lettre pour un même paramètre ne sont pas significativement différentes à un seuil 5%

La composition minérale variait entre biostimulants quel que soit le composé (tableau 3). Le point commun de ces produits était leur forte teneur en K. La concentration en Mg était supérieure au Ca chez les biostimulants à base d'algues (rapport Mg/Ca allant de 6 à 102) en comparaison de pur où la concentration des deux était similaire. La concentration en Na était également de 50 à 70 fois plus élevée chez les biostimulants à base d'algues que chez pur. Les métaux étaient présents en faibles quantités dans la majorité des produits à l'exception de Soli pour le Zn et le Cu et de Asco pour le Cu. Le rapport C/N était faible (<10) chez tous les produits à l'exception de Asco qui a présenté un rapport assez élevé (55).

Tableau 3 : Caractérisation ionique des biostimulants aux concentrations appliquées, $n=2$ pour les minéraux et $n=3$ pour le rapport C/N sauf pour le traitement eckl où $n=1$

	Asco	Eckl	NSF	Pur	Soli
Ca (mg.L ⁻¹)	4,83 ± 0,29 d	0,10 ± 0,05 a	3,23 ± 0,18 c	1,07 ± 0,30 b	0,74 ± 0,005 ab
Mg (mg.L ⁻¹)	29,01 ± 2,56 d	5,13 ± 0,08 b	331,3 ± 18,17 e	1,40 ± 0,14 a	14,81 ± 0,09 C
K (g.L ⁻¹)	1,02 ± 0,17 b	0,17 ± 0,04 a	0,18 ± 0,05 a	0,122 ± 0,07 a	0,250 ± 0,0005 a
Na (mg.L ⁻¹)	162,42 ± 15,6 d	21,78 ± 0,79 b	26,99 ± 2,43 b	2,39 ± 0,15 a	67,78 ± 1,92 c
Fe (µg.L ⁻¹)	298,2 ± 57,3 b	671,5 ± 91,2 a	924,0 ± 4,2 a	942 ± 83,4 a	344,3 ± 70,8 b
Zn (µg.L ⁻¹)	496,1 ± 86,9 b	84,6 ± 13,4 a	60,6 ± 21,1 a	51,5 ± 1,1 a	39 954 ± 631,7 c
Cu (µg.L ⁻¹)	4 087,9 ± 429,4 b	14,7 ± 6,6 a	7,65 ± 4,3 a	12,3 ± 3,4 a	4 752,2 ± 3,9 b
C/N	55,57 ± 0,27 c	1,01 ± NA a	0,69 ± 0,0058 a	6,96 ± 0,15 b	7,25 ± 0,045 b

Les valeurs suivies par une même lettre pour un même paramètre ne sont pas significativement différentes à un seuil 5%

5.2 Effets des biostimulants sur la résistance à la sécheresse de la tomate

5.2.1 Croissance végétative

5.2.1-1 Production de feuilles

La production de feuilles a diminué avec le stress hydrique à partir du 19/4 mais l'effet était peu important vu qu'en fin de culture, il n'y avait pas de différence marquée entre les traitements contrôles et stress pour la production de feuilles (17,25-18 vs, 15,50-16,75 feuilles en moyenne, figure 2, annexe 3). Les biostimulants n'ont également pas affecté la production foliaire avec un effet non significatif le 1/4, 29/4 et 16/5 (annexe 3). Le 19/4, les traitements asco et eckl sur les plantes stressées ont présenté le nombre de feuilles le plus faible, ce qui ne s'est plus marqué par la suite. En fin de culture, les plantes traitées par asco présentaient le nombre de feuilles le plus important dans chaque conditions et les traitements avec le moins de feuilles se trouvaient dans la condition stress et ont été pulvérisées par nsf et pur.

Des feuilles sont tombées à partir du 19/04 et des problèmes phytosanitaires ont également atteint les feuilles. Ces données sont présentées en annexe 5 et 6, Le nombre de feuilles mortes variait en fonction du biostimulant et du stress (annexe 6).

5.2.2-2 Taux de croissance

Le stress hydrique a diminué le taux de croissance entre le 29/03 et le 20/04 (figure 3, annexe 3). Les biostimulants ont également impacté le taux de croissance, surtout en stress hydrique (figure 3, annexe 3). En condition témoin, les plantes traitées avec asco et eckl présentaient les tailles les plus importantes, bien que la différence ne fût pas significative. Chez les plantes stressées, celles traitées avec soli ont présenté la croissance la plus faible et celles traitées avec asco et pur ont présenté la croissance la plus importante.

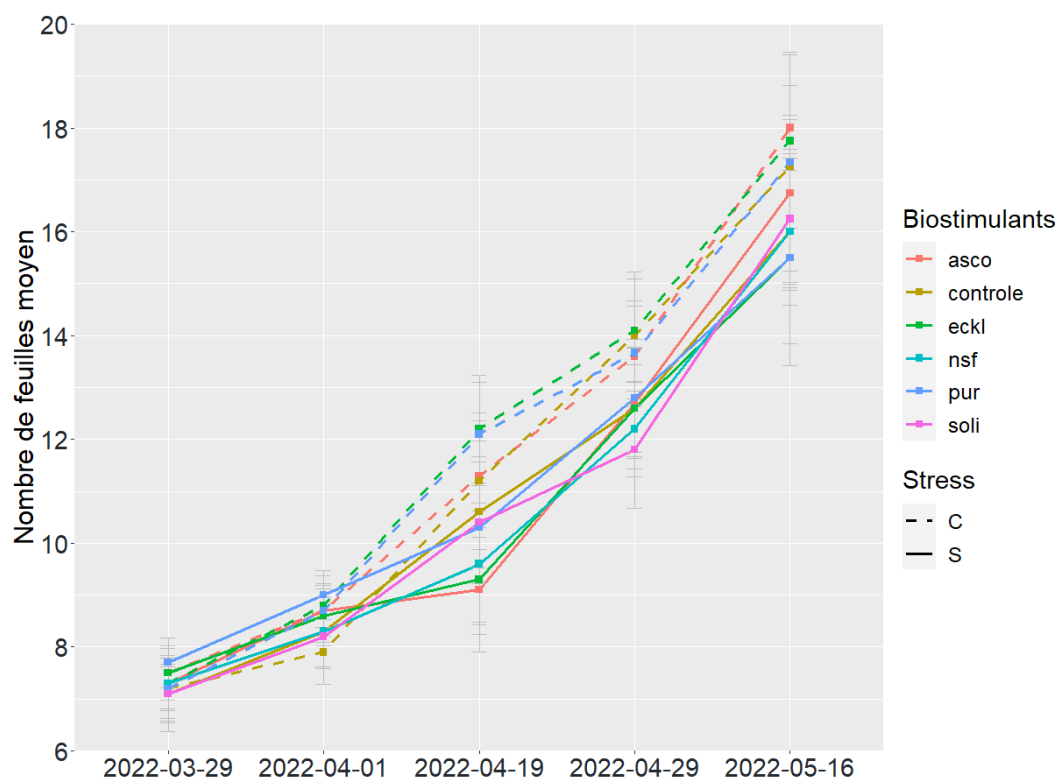


Figure 2 : Effet des biostimulants sur l'évolution du nombre de feuilles sur l'axe principal aux différentes dates de mesures en conditions de stress hydrique (S) ou non (C), n=10 (03/29-04/29) et n=4 (05/16)

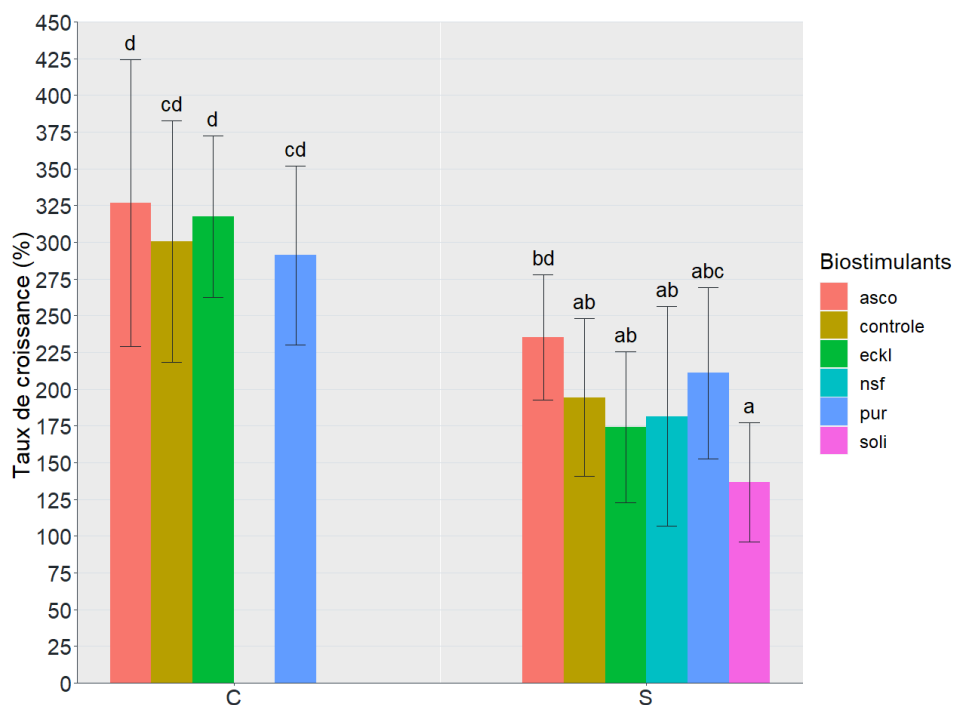


Figure 3 : Effet des différents biostimulants sur le taux de croissance mesurée entre le 29/03 et le 20/04 chez les plantes témoins (C) et en stress hydrique (S). n=10 Les valeurs avec des lettres différentes sont statistiquement différentes (p-value < 0,05).

5.2.2-3 Poids sec des organes végétatifs

Ni le stress hydrique, ni les biostimulants n'ont affecté le poids sec des feuilles (figure 4A, annexe 3). La valeur de poids la plus haute a été observée pour les plantes témoins traitées avec pur et la plus faible pour les plantes stressées traitées avec nsf. Au contraire des feuilles, le stress hydrique a diminué le poids sec des tiges mais l'effet des biostimulants n'était pas significatif (figure 4B, annexe 3). Comme pour le poids des feuilles, la valeur la plus élevée a été observée chez les plantes témoins traitées avec pur tandis que la valeur la plus faible correspondait aux plantes stressées sans biostimulants.

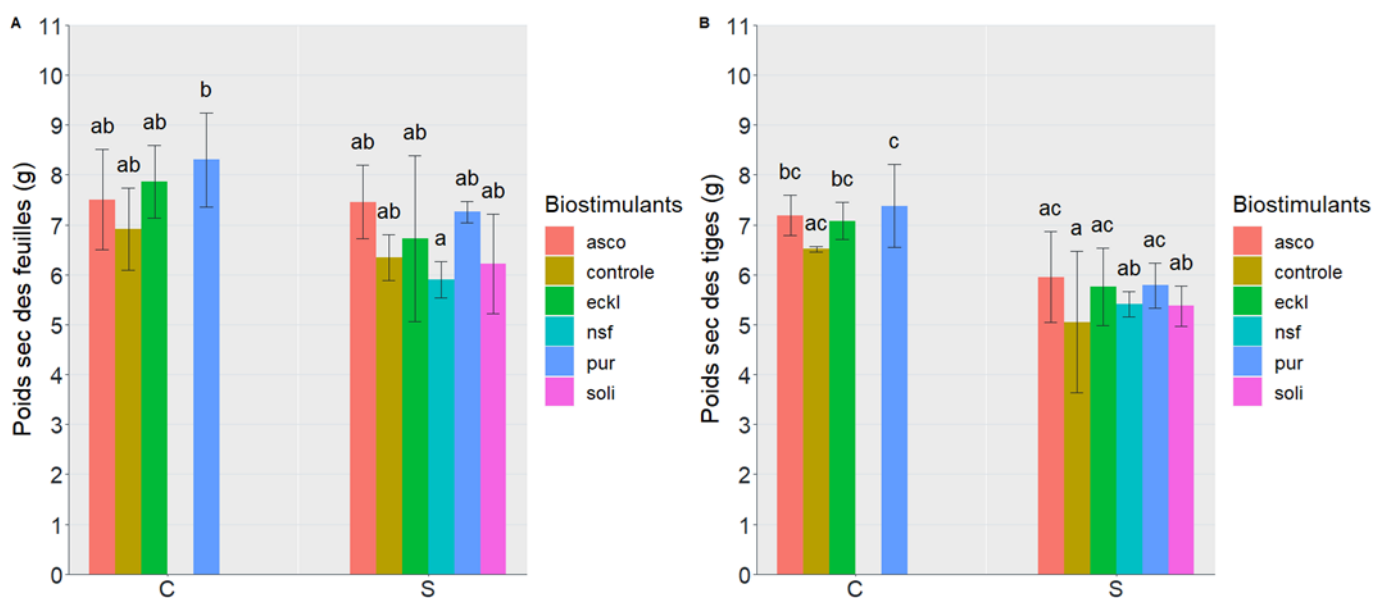


Figure 4 : Effet des biostimulants sur le poids sec des feuilles (A) et des tiges (B) chez les plantes témoins (C) et en stress hydrique (S) 27 jours après l'application du stress. $n=3$ Les valeurs avec des lettres différentes sont statistiquement différentes ($p\text{-value} < 0,05$).

5.3 Croissance reproductrice

5.3.1 Production d'inflorescences

Le stress hydrique a affecté le nombre d'inflorescences en début de floraison (19/4) mais n'a plus eu d'effet significatif par la suite (figure 5A, annexe 3) montrant que les inflorescences se sont développées plus tardivement chez les plantes en stress hydrique que chez les témoins. Cependant, le temps de floraison des segments sympodiaux (nombre de feuilles entre les

inflorescences) a été accéléré par le stress hydrique (figure 5B, annexe 3), expliquant qu'il n'y avait plus de différence dans la production d'inflorescences en fin de culture. Au contraire du stress hydrique, les biostimulants n'ont eu aucun effet ni sur la production d'inflorescences ni sur le nombre de feuilles entre inflorescences (figure 4A et 4B, annexe 3). En fin de culture, la production d'inflorescences était la plus élevée pour les plantes témoins traitées avec asco et la plus faible pour les plantes stressées traitées avec soli, bien que la différence ne fût pas significative étant donné la grande variabilité au sein de chaque traitement (figure 5A). Le nombre de feuilles entre inflorescences variait également fortement au sein d'un même traitement et les valeurs les plus faibles ont été observées chez les plantes stressées traitées avec nsf et soli.

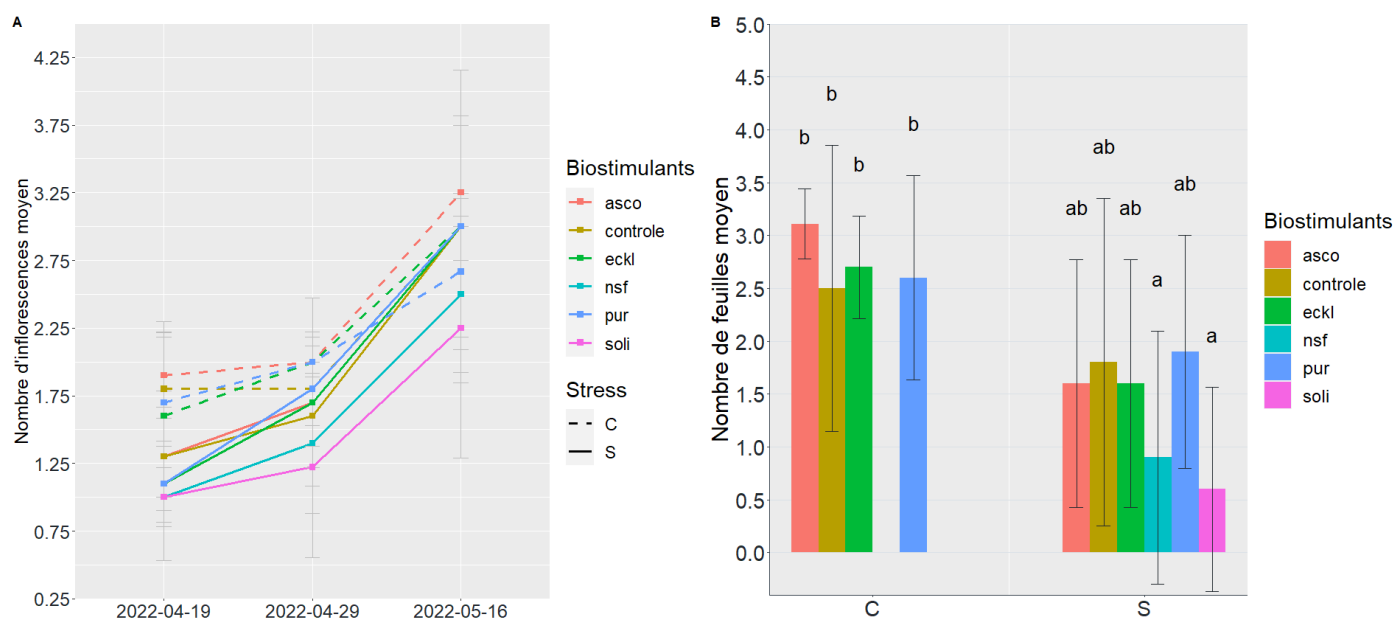


Figure 5 Effet des biostimulants sur (A) le nombre d'inflorescences et (B) le nombre de feuilles entre les deux premières inflorescences chez des plantes témoins (C) et en stress hydrique (S), En A : n=10 (19/04,29/04) n=4 (16/05) ; en B : n=10 Les valeurs avec des lettres différentes sont statistiquement différentes (p-value < 0,05).

5.3.2 Développement des premières inflorescences

Concernant le nombre de fleurs par inflorescence, le stress a eu un impact mais pas les biostimulants en fin de culture (figure 6A, annexe 3). Le pourcentage de fleurs passées en anthèse variait avec le stress et avec le type de biostimulants (figure 6B, Annexe 3). Le stress hydrique a diminué le pourcentage d'anthèse. Au niveau des biostimulants, en fin de culture

les plantes arrosées traitées avec eckl avaient un pourcentage de fleurs en anthèse plus élevé et les plantes stressées avec soli avaient le pourcentage le plus faible .

Concernant la fertilité des fleurs, le stress hydrique n'a pas eu d'effet significatif sur la réceptivité stigmatique tandis que celle-ci a varié avec les biostimulants (tableau 4, annexe 3). Les traitements soli, eckl et pur en condition de stress ont été écarté pour manque de fleurs en anthèse lors de la récolte.

Les fleurs des plantes contrôle et pur arrosées ainsi que les fleurs du contrôle stress avaient une réceptivité stigmatique moyenne inférieure (17% et 30%) aux autre plantes (100%). La viabilité pollinique était de l'ordre de 80% et n'a été impactée ni par le stress hydrique, ni par les biostimulants (tableau 4, annexe 3).

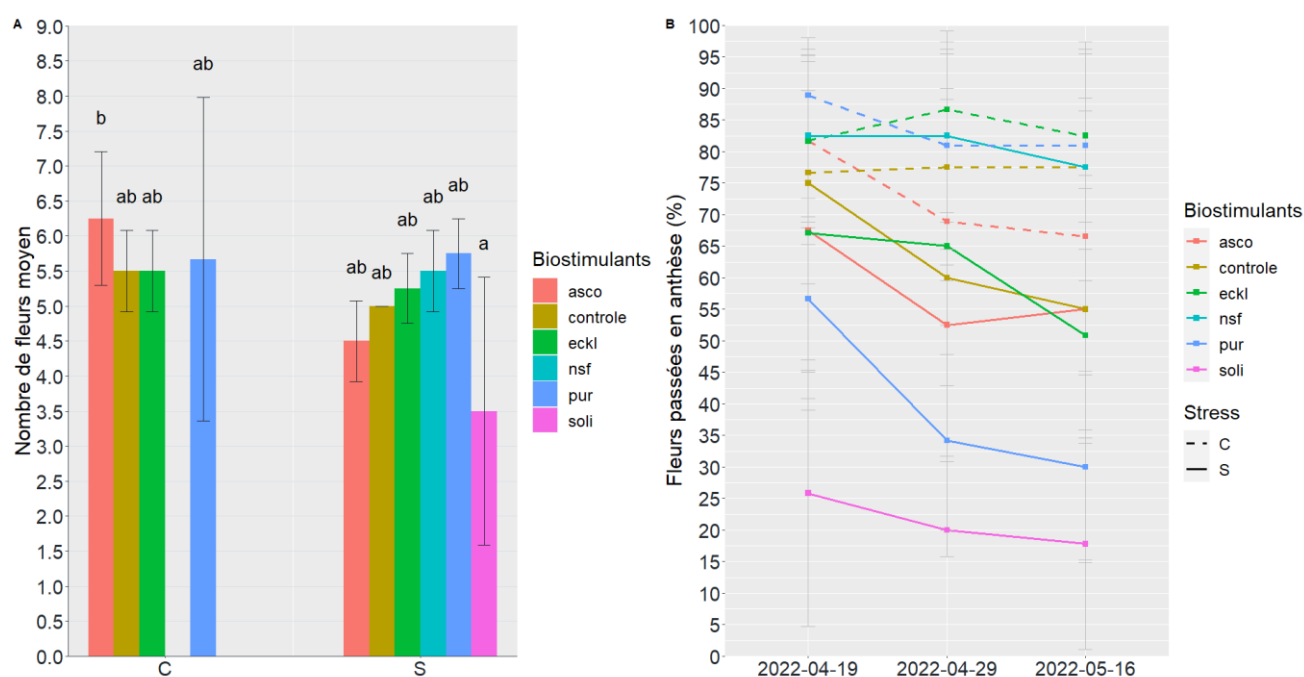


Figure 6 : Effet des biostimulants sur (A) le nombre de fleurs dans la 1^e inflorescence et (B) l'évolution du pourcentage de fleurs en anthèse par inflorescence chez des plantes témoins (C) et en stress hydrique (S), En A : n=10, en B : n=4: Les valeurs avec des lettres différentes sont statistiquement différentes (p-value < 0,05) pour un même paramètre

Tableau 4 : Viabilité pollinique et réceptivité stigmatique des fleurs récoltées

Biostimulant	Arrosage	Réceptivité stigmatique	Viabilité pollinique (%)
Asco n=4	C	1 a	87,7 ± 16,03 a
Asco n=2	S	1 a	94,7 ± 1,5 a
Controle n=8	C	0,83 ± 0,24 a	90,7 ± 9,5 a
Controle n=3	S	0,7 ± 0,27 a	92,0 ± 2,3 a
Eckl n=5	C	1 a	82,7 ± 15,4 a
Nsf n=2	S	1 a	98,9 ± 0,3 a
Pur n=3	C	0,83 ± 0,26 a	96,7 ± 3,0 a

Les valeurs avec des lettres différentes sont statistiquement différentes (p-value < 0,05) pour un même paramètre.

5.3.3 Production des fruits

La circonférence et le poids des fruits étaient extrêmement corrélés ($R^2 = 0.927$ p-val = $<2e-16$). Les deux paramètres étaient impactés par le stress et par les biostimulants (tableau 5, annexe 3). De façon globale, le stress hydrique a diminué la taille et le poids des fruits, bien que les différences n'étaient pas significatives en comparant chaque biostimulant séparément (tableau 5). Les différents biostimulants ont donné des résultats similaires sur le poids et la taille des fruits, à l'exception de soli. Les plantes ayant donné les fruits les plus gros et les plus lourds étaient les plantes témoins traitées avec pur et asco. A l'inverse le traitement eckl S a donné les fruits les plus petits. Il n'existait pas de différence significative entre les autres traitements.

Concernant la qualité des fruits, la teneur en sucres était globalement plus élevée chez les plantes stressées par rapport aux plantes témoins et l'impact des biostimulants n'était pas significatif (figure 7, annexe 3) tandis que le pH des fruits était affecté par les biostimulants mais pas par le stress (tableau 5, annexe 3). Les données sur la teneur en sucres (° Brix) ont montré que les fruits des plantes témoins non traitées étaient les moins sucrés et les plus sucrés étaient les fruits des plantes stressées traitées avec pur et asco. Les fruits des plantes stressées traités avec nsf et eckl avaient la même teneur en sucres que les fruits des plantes stressées non traitées. Il est intéressant d'observer que même si les données n'étaient pas significatives, les plantes traitées avec soli ont donné les fruits avec le taux de sucre le plus faible parmi les plantes stressées. Les fruits avec le pH le plus élevé ont été observés chez les

plantes stressées traitées avec soli et ceux avec le pH le plus bas chez les plantes stressées traitées avec Eckl.

Tableau 5 : Effet des biostimulants sur les données du poids de la circonférence et du pH des fruits mesurés.

	Asco E n= 10	Asco S n=8	C E n=10	C S n=5	Eckl E n=10	Eckl S n= 9	NSF S n=10	Pur E n=10	Pur S n=6	Soli S n=2
Poids (g)	21,30 ±5,92 b	13,80 ±6,45 ab	18,18 ±4,19 ab	15,38 ±3,08 ab	20,29 ±5,88 ab	11,79 ±6,54 a	16,87 ±5,90 ab	22,51 ±6,21 b	16,25 ±8,76 ab	26,94 ±2,08 ab
Circonférence (cm)	33,68 ±3,20 b	28,33 ±4,45 ab	31,77 ±3,02 ab	31,62 ±4,36 ab	32,55 ±3,21 ab	26,75 ±4,32 a	30,85 ± 4,14 ab	34,30 ±3,74 b	30,19 ±6,81 ab	37,40 ±1,50 b
pH *	4,30± 0,15	4,21 ±0,15	4,19 ±0,14	4,16 ±0,13	4,1 6±0,13	4,14 ±0,10	4,31 ±0,14	4,19 ±0,14	4,22 ±0,16	4,4 ±0,00

Les valeurs avec des lettres différentes sont statistiquement différentes (p -value < 0,05). *Il n'y a pas de significativité affichée pour les données de pH du fait de l'incapacité du test de Tuckey de refléter les résultats de l'Anova 2.

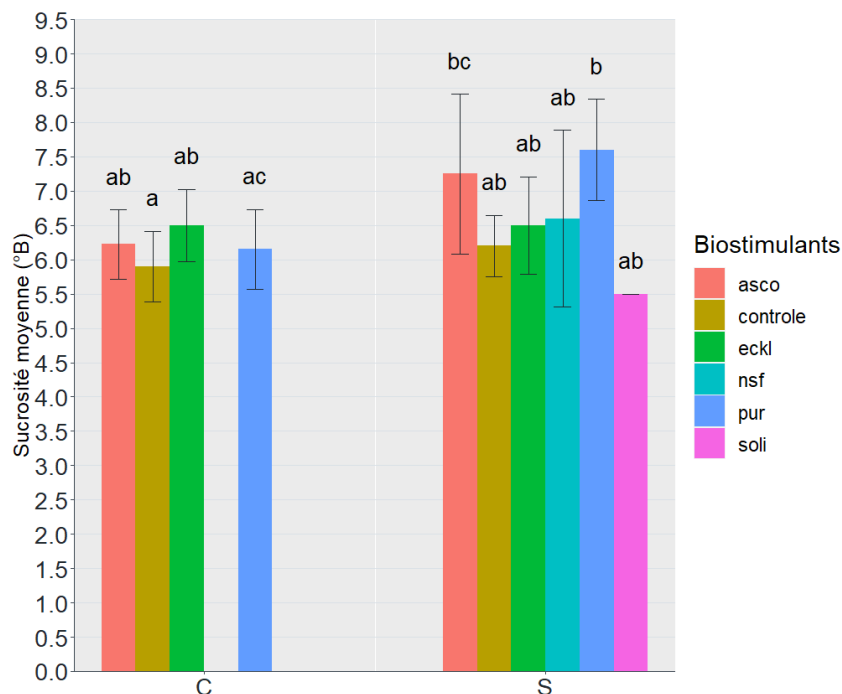


Figure 7 Effet des biostimulants sur la sucrosité des fruits en fonction des contrôle (C) et des stress (S). Les valeurs avec des lettres différentes sont statistiquement différentes (p -value<0.05).

5.4 Paramètres physiologiques

5.4.1 PNA/DUA

Deux dosages ont été réalisés pour estimer les teneurs en chlorophylles et en azote. Les mesures avec le PNA ont été réalisées le 24 jours après l'application du stress (JAS) tandis que celles avec le DUA ont été réalisées 43 JAS. Les teneurs mesurées avec le PNA variaient avec les biostimulants et le stress hydrique (figure 8 A-C, annexe 4) tandis qu'avec DUA elles variaient avec les biostimulants mais pas avec le stress hydrique (figure 8 B-D, annexe 4). Les teneurs en chlorophylles et en azote les plus élevées ont été mesurées sur les plantes stressées traitées avec asco, eckl et pur tandis que les plus faibles ont été mesurées sur les plantes témoins traitées avec pur (figure 8, A-C).

Avec DUA, les données ont montré une plus grande variabilité. Les teneurs en azote et en chlorophylles les plus élevées ont été mesurées sur les plantes stressées soli et contrôle (figure 8, B-D) tandis que les plus faibles ont été mesurés sur les plantes traitées par eckl pour l'azote (figure 8, D) et seulement sur les plantes stressées pour la chlorophylle (figure 8, B).

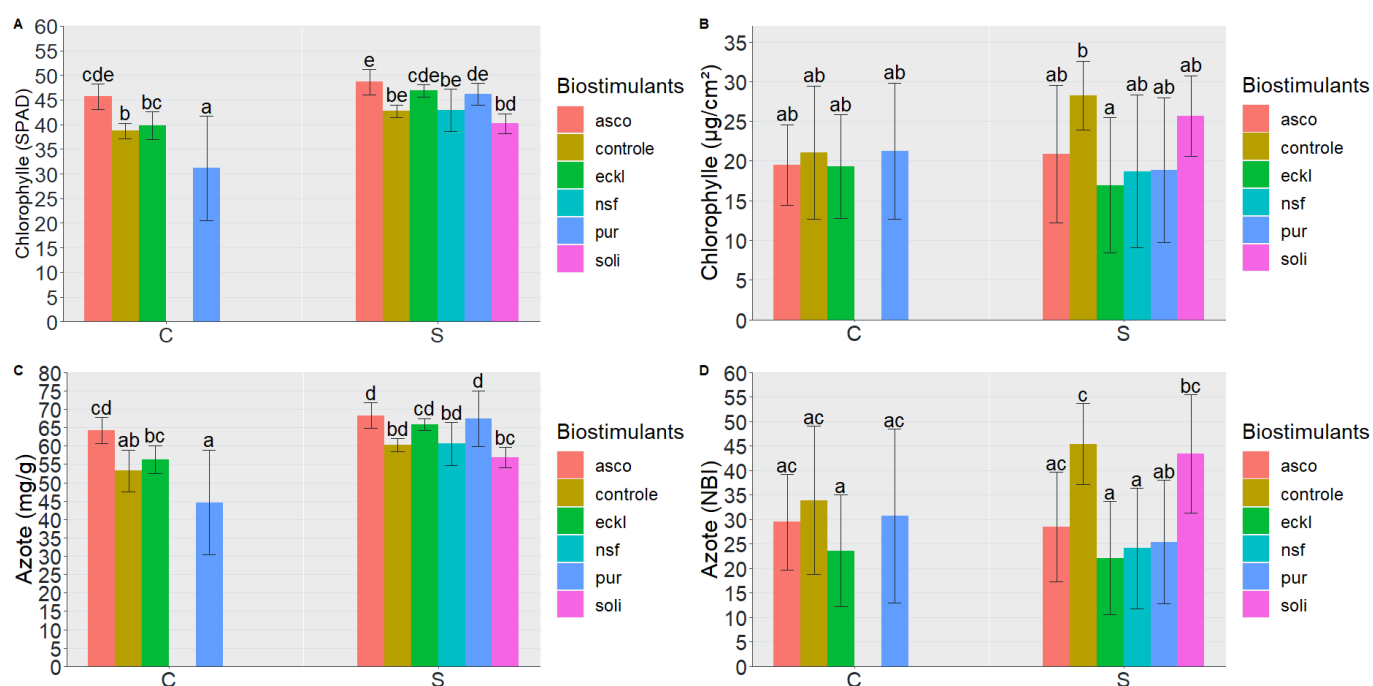


Figure 8 : Effet des biostimulants sur(A) la teneur en chlorophylle et (B) en azote des feuilles 24 jours après l'application du stress hydrique, (C) la teneur en chlorophylle et (D) en azote présentes des feuilles 43 jours après l'application du stress hydrique. L'ensemble de ces

données sont présentées en fonction des traitements contrôles (C) et stress (S). $n=3$ (A,B) $n=10$ (C,D) Les valeurs avec des lettres différentes sont statistiquement différentes ($p\text{-value} < 0.05$).

Les concentrations en flavonols des feuilles mesurées avec le DUALEX ont varié entre biostimulants mais pas avec le stress hydrique tandis que les teneurs en anthocyanes différaient entre biostimulants et ont aussi diminué avec le stress hydrique (figure 9 A-B, annexe 4). Pour les deux composés, les teneurs les plus importantes ont été obtenues chez les plantes témoins traitées avec eckl et les plus faibles chez les plantes stressées traitées avec soli. Chez les plantes stressées, les plantes traitées par nsf avaient les valeurs les plus hautes (figure 9 A-B).

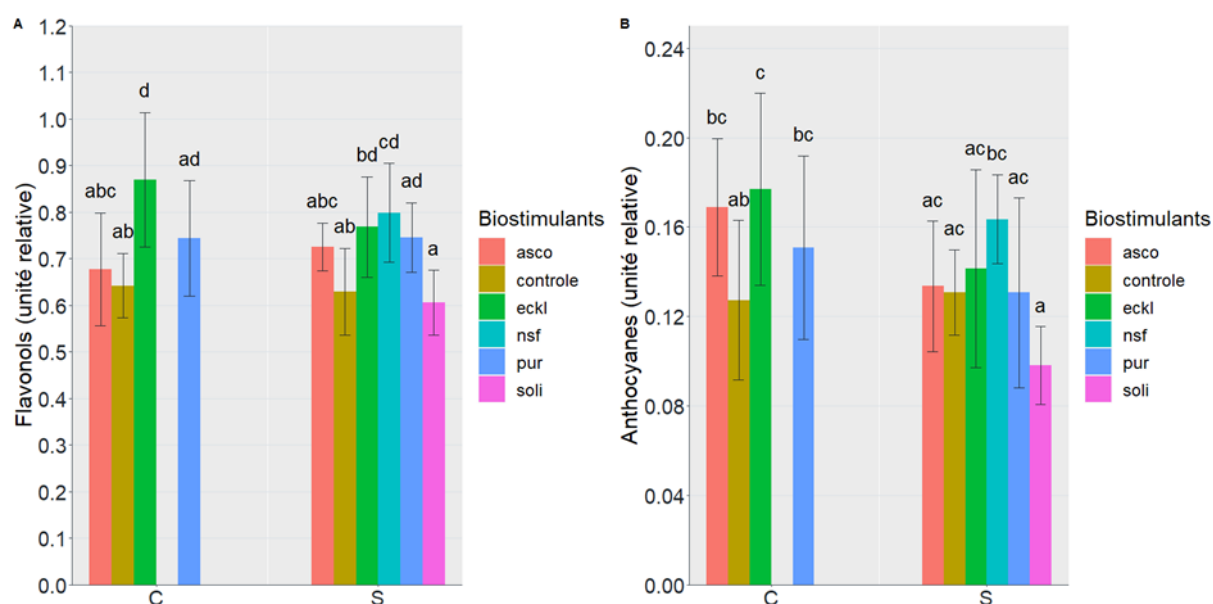


Figure 9 : Effet de biostimulants sur (A) la teneur en flavonols et (B) en anthocyanes contenues dans les feuilles mesurée 43 jours après l'application du stress hydrique en fonction des traitements contrôles (C) et stress (S). $n=10$ Les valeurs avec des lettres différentes sont statistiquement différentes ($p\text{-value} < 0.05$).

5.4.2 Paramètres associés à la photosynthèse

La conductance stomatique a été mesurée après 24 JAS par le Delta-TDevices et 43 JAS par le LI-600. Avec le Delta-TDevice, les valeurs n'ont pas varié avec le stress et les biostimulants (figure 10 A, annexe 4), tandis qu'avec le Li-600 le stress a diminué la conductance stomatique

et les biostimulants ont eu un effet sur les traitements (figure 10 B, annexe 4). Les conductances les plus élevées ont été mesurées sur les plantes stressées traitées par nsf et soli et chez les plantes contrôles traitées par eckl 24 JAS (figure 10 A). 43 JAS, les valeurs les plus élevées ont été mesurées sur les plantes contrôles traitées par asco et témoins. Les valeurs les plus faibles ont été observées chez les plantes stressées témoins, traitées par asco et pur ainsi que chez les plantes contrôles arrosées par eckl (fig.10 B).

Le rendement quantique de la fluorescence du PS2 (Φ_{PS2}) et l'efficacité du transport d'électron (ETR) ont été mesurées 43 JAS par le LI-600. Le stress a impacté l'ETR mais pas le RQPS2 tandis que les biostimulants ont eu un impact sur les deux (figure 10 C-D, annexe 4).

Les plantes traitées avec nsf et soli ont montré des valeurs de RQPS2 supérieures aux plantes non traitées (figure 10 C) et les valeurs d'ETR les plus importantes ont été observées sur les plantes témoins du contrôle.

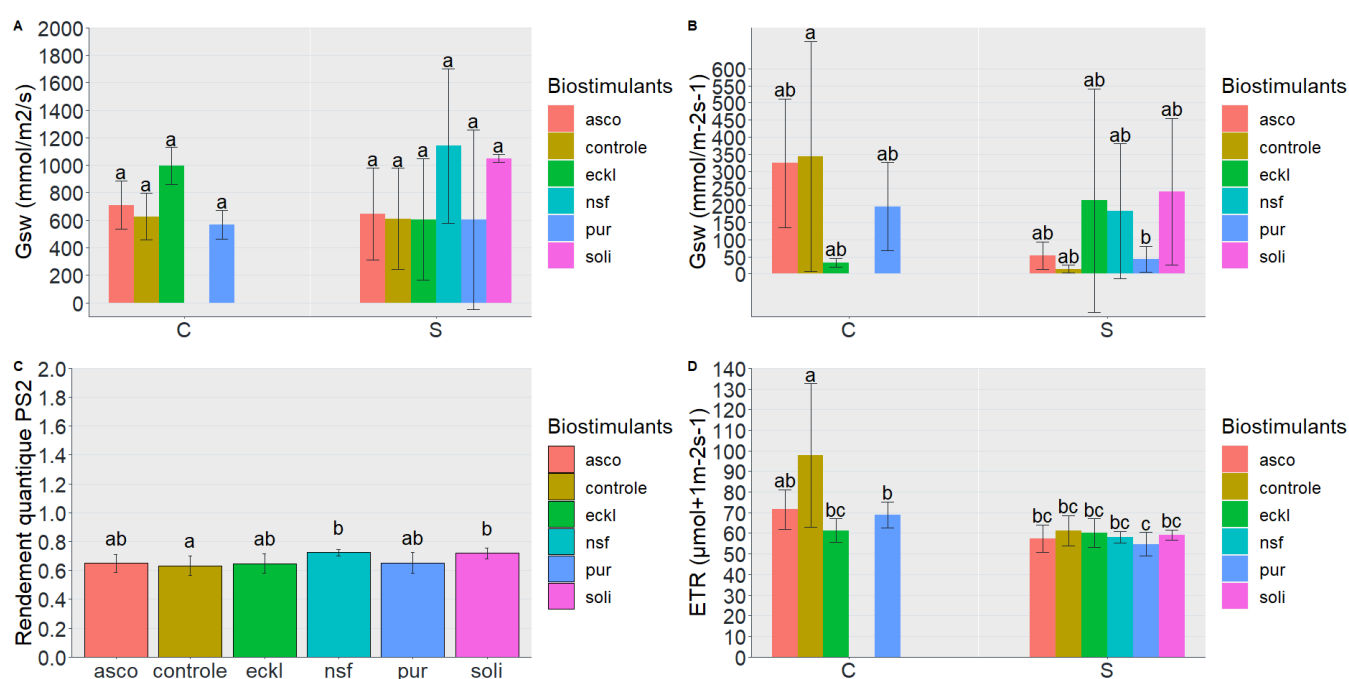


Figure 10 Effet des biostimulants sur (A) la conductances stomatiques mesurées 24 jours et (B) 43 jours après l'application du stress, sur (C) le rendement quantique de la fluorescence du PS2 (Φ_{PS2}) 43 JAS et (D) l'efficacité du transport des électrons (ETR) 43 JAS en fonction des traitements contrôles (C) et stress (S). (C) est seulement présenté en fonction des biostimulants. $n=3$ (A) $n=4-15$ (B,C,D) Les valeurs avec des lettres différentes diffèrent statistiquement (p -value < 0,05).

5.4.3 Paramètres associés au statut hydrique

Le stress hydrique a diminué le contenu en eau des feuilles et des tiges et seules les feuilles ont été impactées par les biostimulants (figure 11 A-B, annexe 3). Les valeurs les plus élevées ont été observées chez les plantes témoin du contrôle dans les feuilles et les tiges ainsi que les plantes pulvérisées par asco et pur dans les tiges. La valeur la plus faibles a été obtenue sur les plantes stressées traitées par nsf dans les deux cas (figure 11 A-B).

5.4.4 Potentiel hydrique

Le potentiel hydrique était plus faible chez les plantes stressées que chez les plantes témoins et a également varié entre les biostimulants (figure 12, annexe 3). Les plantes non traitées avaient globalement un potentiel hydrique plus faible que les plantes traitées aux biostimulants, tant en condition témoin que de stress hydrique. La valeur de potentiel hydrique la plus faible a été observée chez les plantes stressées non traitées et la plus élevée chez les plantes stressées traitées avec soli. Les différences entre biostimulants étaient moins marquées en condition témoin qu'en condition de stress.

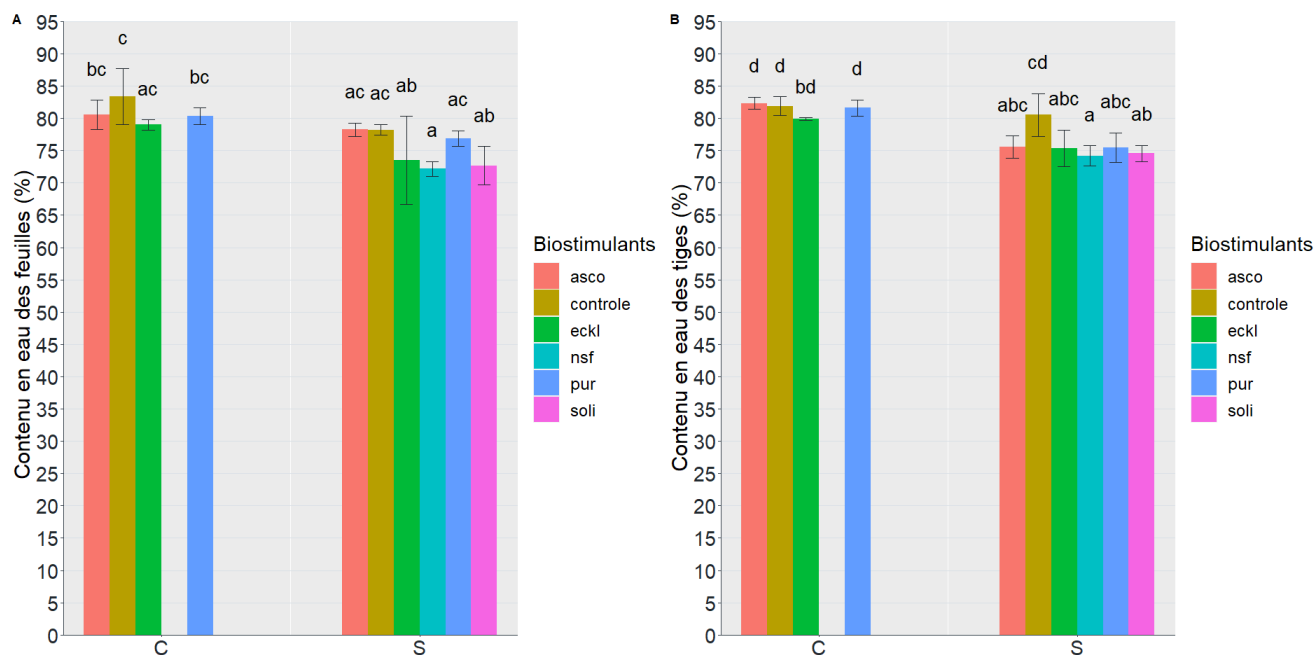


Figure 11 : Effet des biostimulants sur le contenu en eau (A) des feuilles et (B) des tiges après 24 Jours de stress en fonction des conditions contrôles (C) et stress (S). $n=3$ Les lettres différentes sont significatives (p -value < 0.05).

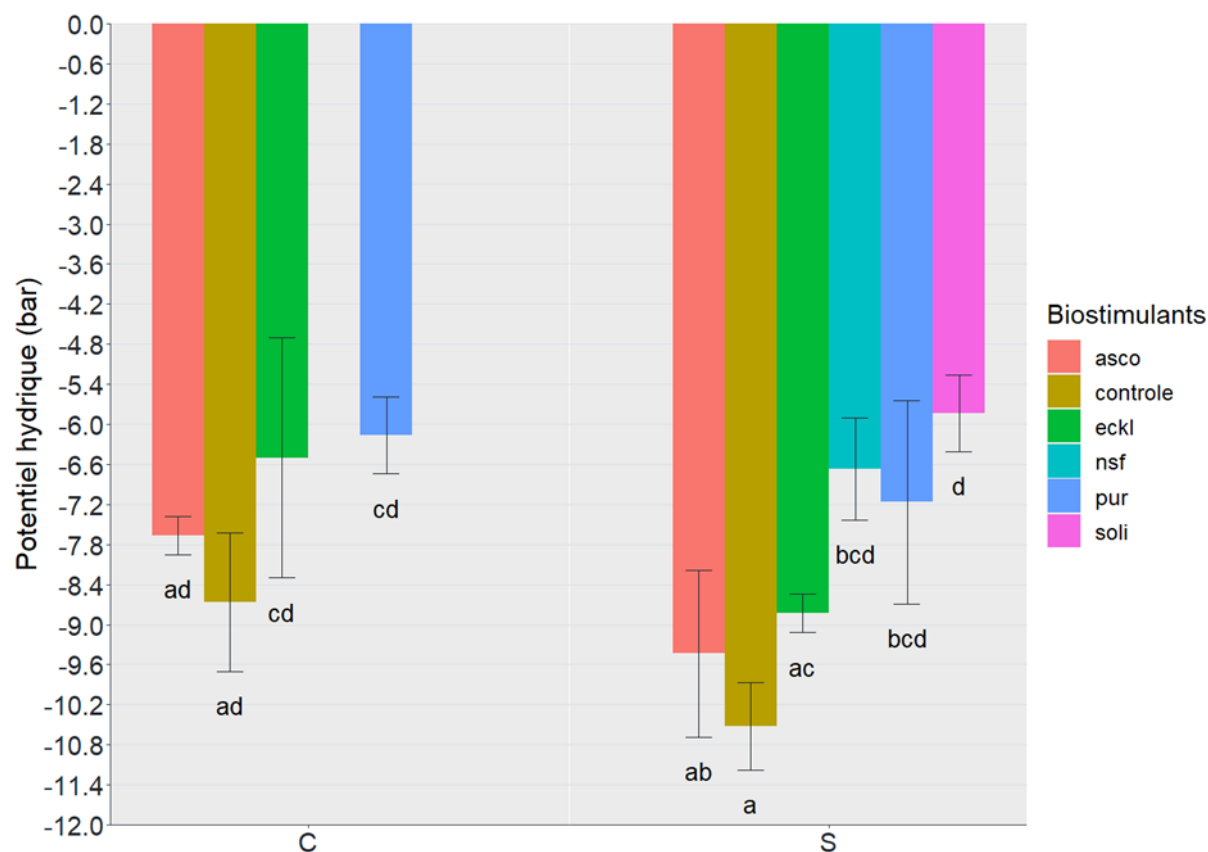


Figure 12 : Effet des biostimulants sur le potentiel hydrique 24 jours après la mise en place du stress hydrique en fonction des traitements contrôles (C) et stress (S). $n=3$ Les valeurs avec des lettres différentes sont statistiquement différentes (p -value < 0.05).

5.4.5 Concentrations en malondialdéhyde (MDA) et en sucres solubles totaux

Statistiquement il n'y a pas eu de différences significatives entre biostimulants ni entre conditions de stress pour la mesure de MDA dans les feuilles du fait la forte hétérogénéité au sein de certains traitements (figure 13 A, annexe 4). On a observé cependant une valeur clairement plus élevée chez les plantes non traitées par rapport aux biostimulants chez les plantes stressées.

De même que pour la MDA, les concentrations en sucres totaux dans les feuilles n'étaient pas statistiquement significatives entre biostimulants ni entre conditions de stress (figure 13 B, annexe 4). On observe cependant que les traitements asco, eckl et pur ont présenté des valeurs moyennes bien plus hautes que les autres traitements pour les plantes stressées mais avec une forte variabilité au sein d'un même traitement.

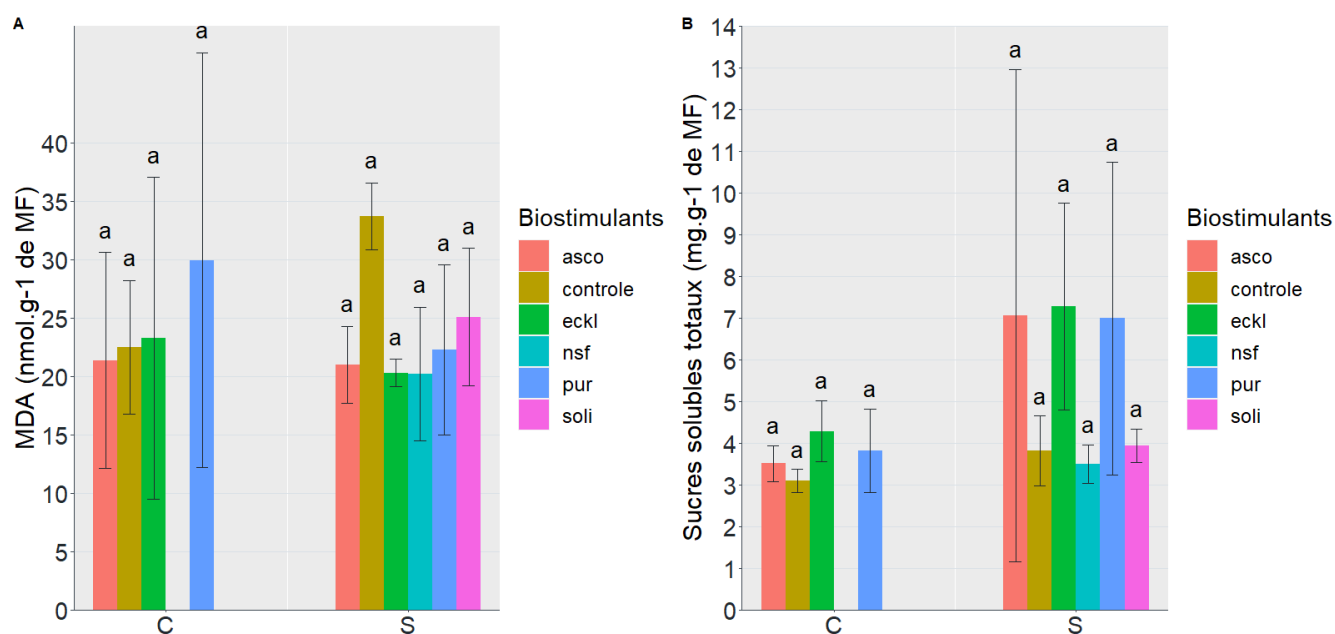


Figure 13 : A Effet des biostimulants sur (A) la MDA mesurée et (B) les sucres totaux solubles 24 jours après la mise en place du stress hydrique présenté en fonction des traitements contrôles (C) et stress (S). $n=3$ Les valeurs avec des lettres différentes sont statistiquement différentes (p -value < 0.05).

5.4.6 Concentration des feuilles en minéraux

Concernant les teneurs en éléments minéraux, les concentrations en Ca, Mg, K et Na ont varié avec le stress hydrique tandis que les valeurs de Ca, Mg, K, Na, Zn et Cu ont varié avec les biostimulants . Le fer n'a été pas été impacté (tableau 6, annexe 4).

Le stress hydrique a globalement diminué les concentrations de Ca tandis que celles de K ont augmenté. Les teneurs les plus élevées ont été observées chez les plantes témoins traitées avec eckl pour Ca et chez les plantes stressées pulvérisées par pur pour K. Les valeurs les plus faibles ont été obtenue chez les plantes stressées traitées avec asco pour Ca et chez les plantes stressées pulvérisées par eckl pour K.

La teneur en Na a également augmenté en condition de stress. La valeur la plus forte a été obtenue sur les plantes stressées pulvérisées par asco et la plus faible sur les plantes stressées pulvérisées par pur.

Les plantes traitées par soli ont aussi montré des fortes valeurs en Zn et Cu.

Tableau 6 Concentrations des minéraux présents dans les feuilles 24 JAS, n=3

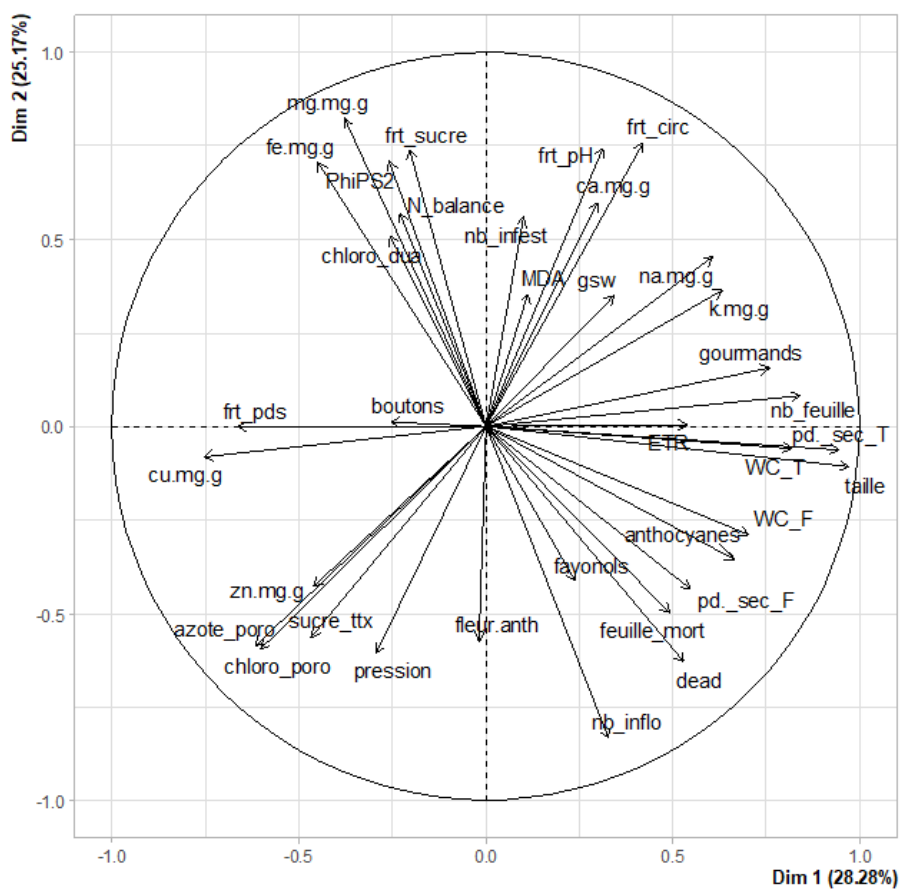
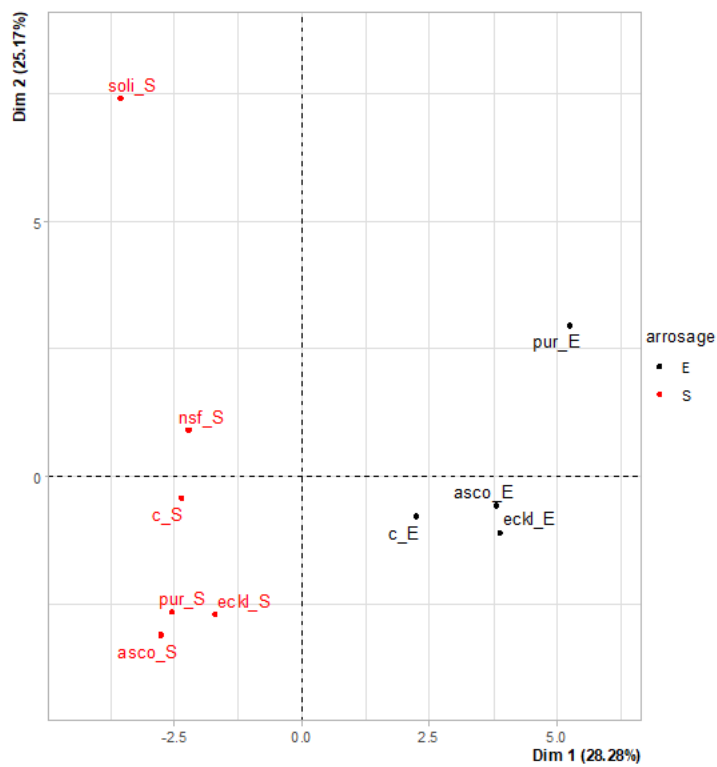
	Asco E	Asco S	C E	C S	Eckl E	Eckl S	NSF S	Pur E	Pur S	Soli S
Ca (mg.L⁻¹)	40,485 ±8,296 ac	28,118 ±3,319 a	33,692 ±5,163 ac	31,706 ±4,25 ab	52,142 ±9,223 c	44,944 ±9,624 ac	38,458 ±1,261 ac	47,959 ±7,628 bc	29,329 ±7,674 a	41,366 ±2,666 ac
Mg (mg.L⁻¹)	7,674 ±0,831 a	5,482 ±0,325 a	6,239 ±1,719 a	6,824 ±0,604 a	7,586 ±0,801 a	7,618 ±1,019 a	8,091 ±0,519 a	7,572 ±1,069 a	5,994 ±1,201 a	7,928 ±0,320 a
K (mg.L⁻¹)	24,195 ±8,067 ab	44,300 ±13,38 1 bc	33,589 ±5,994 ac	36,633 ±7,190 ac	22,139 ±8,589 ab	20,670 ±5,939 a	28,894 ±3,258 9 ab	26,753 ±3,770 ab	51,954 ±13,21 3 c	25,373 ±2,882 ab
Na (mg.L⁻¹)	0,765 ±0,249 ab	1,349 ±0,201 c	0,654 ±0,047 ab	1,021 ±0,184 4 bc	0,572 ±0,199 ab	0,765 ±0,250 ab	0,699 ±0,108 ab	0,510 ±0,057 a	0,904 ±0,226 ac	1,069 ±0,212 bc

Fe (mg.L⁻¹)	97,523 ±10,60 1 a	89,567 ±5,913 a	97,029 ±4,162 a	96,522 ±7,121 a	107,20 5±14,7 90 a	100,5± 2,845 a	90,641 ±5,542 a	119,24 ±42,73 1 a	88,170 ±15,87 2 a	106,92± 2,237 a
Zn (mg.L⁻¹)	59,659 ±21,41 6 a	77,831 ±24,80 9 a	69,174 ±7,348 a	59,267 ±16,16 8 a	69,897 ±13,86 0 a	66,861 ±6,954 a	68,600 ±18,43 5 a	69,253 ±5,846 a	110,98 1 ± 27,560 a	206,543 ±38,367 b
Cu (mg.L⁻¹)	26,780 ±6,571 a	24,077 ±6,409 a	16,842 ±4,222 a	18,769 ±4,129 a	16,448 ±3,915 a	13,426 ±3,744 a	27,362 ±22,30 5 a	19,064 ±8,109 a	12,994 ±3,156 a	202,841 ±79,560 b

Les valeurs avec des lettres différentes sont statistiquement différentes (p-value < 0,05).

5.5 Analyse en composante principale (ACP)

L'ACP a montré les traitements avaient une tendance à se regrouper par Stress. Dans ces dimension Soli était le traitement en conditions de stress qui agissait le plus différemment des autres et pur celui pour la condition contrôle.



6. Discussion

Les variétés de tomates commercialisées sont généralement cultivées dans des conditions optimales, ce qui les rend généralement plus sensibles aux stress hydriques que leur homologues sauvages¹⁶⁴ et la variété moneymaker ne semble pas faire exception¹⁶⁵. Dans le cadre de ce mémoire, nous avons cherché à voir si des applications de biostimulants pouvaient améliorer la résistance de cette variété au stress hydrique.

6.1 Paramètres physiologiques

6.1.1 Croissance

Les résultats de cette expérience nous montrent bien que les plantes ont eu à faire face à un stress hydrique avec une taille et un nombre de feuilles réduites en début de culture. C'était assez clair pour l'ensemble des plantes stressées. Ces résultats vont dans le sens de nombreuses études qui montrent une réduction de la taille^{8,64,166} sur de nombreuses plantes et une diminution significative du nombre de feuilles^{10,67,167} chez la tomate en cas de stress hydrique. Cependant, contrairement à toutes les études précédentes sur la tomate, notre expérience ne montrait plus de différence marquée du nombre de feuilles entre les plantes stressées et non stressées en fin de culture. Comme la majorité de ces expériences se sont déroulées sur un cycle de vie complet, on peut imputer nos observations aux différents biostimulants qui ont été appliqués. Plusieurs études ont déjà démontré que les biostimulants pouvaient améliorer la croissance et/ou la productivité des plantes en conditions normales. Alam et al.¹⁶⁸ ont par exemple montré que l'utilisation d'un extrait d'algues *A. nodosum* pouvait augmenter chez 4 variétés de fraises la surface des feuilles et leur poids sec jusqu'à 30 %¹⁶⁸. De même, Zubair et al.¹⁶⁹ ont montré des effets similaires avec du thé de vermicompost sur le maïs. D'autres études ont également montré sur des plantes en stress hydrique une amélioration de la croissance végétative^{135,170,171}.

Nos résultats montrent que l'ensemble de ces produits semble avoir permis d'améliorer la croissance des individus stressés malgré l'absence de significativité avec les plantes du contrôle stress. Deux produits semblent cependant ressortir par rapport à l'évolution du nombre de feuilles.

Au sein des contrôles, les plantes traitées avec asco présentait un nombre de feuilles plus faible qu'avec les autres produits, ce qui pourrait laisser penser que ce produit est plus lent à agir. Chez les plantes stressées, à cette même date, eckl et asco avaient une évolution de leur nombre de feuilles formant un plateau avant de reprendre une évolution régulière. Ces résultats diffèrent de ceux de KERDRAON et al.¹⁶¹ qui présentaient une évolution beaucoup plus régulière de la croissance végétale avec ces mêmes biostimulants. Pour ces deux produits, on pourrait supposer que le stress a pris le dessus par rapport à la première pulvérisation (19/04) et que la suivante (21/04) a permis de stimuler la croissance de la plante. Ces résultats pourraient corroborer l'hypothèse précédente sur la vitesse d'action du produit asco. Concernant le eckl, il est possible que ce délai observé soit dû à la nature de la formulation qui est présentée comme un produit améliorant la croissance racinaire¹⁷².

La répartition de la biomasse des plantes s'est également retrouvée impactée par le stress induit en diminuant le poids sec des tiges. Ces résultats ont aussi été observés par Grosjean (2022)¹⁶⁶ 47 JAS, lors de sa première récolte de plants de tomates. D'autres études ont montré que le stress hydrique impactait le poids sec des feuilles et des tiges chez la tomate cultivée^{10,173}. De ce fait, nos données montreraient une réponse au stress hydrique mitigée avec une réponse de la tige mais pas des feuilles. Au sein de la tige, il se serait opéré une réduction des vaisseaux de xylème permettant de prévenir la rupture de la colonne d'eau¹⁷³. De l'autre côté, l'absence de changement du poids sec des feuilles suggérerait un métabolisme pas ou peu impacté par le stress hydrique¹⁷⁴. Comme nous avons récolté ces données 27 jours après la mise en place du stress, il est plus probable que ces valeurs nous montrent la réponse progressive des plantes sous stress hydrique plutôt qu'un effet issu des biostimulants. En effet, dans son étude, Grosjean (2022)¹⁶⁶ a procédé à une seconde récolte 73 JAS et ses résultats ont montré un effet significatif du stress sur l'ensemble des tiges et feuilles. Ainsi, il est difficile d'avancer un effet provenant de l'application des biostimulants sur ce paramètre en l'absence d'une seconde récolte dans notre cas. Il semblerait cependant que les plantes traitées aient des poids secs plus élevés que leur contrôle mais cela reste à confirmer.

6.1.2 Statut hydrique

Il a été montré que la diminution de l'eau disponible dans le sol déclenchait des mécanismes de tolérance chez de nombreuses plantes, dont la tomate cultivée, pour préserver leur statut hydrique¹⁷⁵. Les paramètres suivants, le contenu en eau relatif, le potentiel hydrique, l'évapotranspiration, la conductance stomatique et le potentiel osmotique, ont été déterminés comme étant impactés et impliqués dans la réponse au stress hydrique⁵⁶.

Dans notre étude nous avons mesuré la conductance stomatique des feuilles en début et fin d'expérience, le contenu en eau des feuilles et des tiges, le potentiel hydrique et les sucres solubles totaux 24 JAS. Généralement, en réponse au stress hydrique, les plantes ferment leurs stomates, ce qui se traduit par une réduction de la conductance stomatique⁵⁶. Dans notre étude, la conductance stomatique ne semblait pas affectée 24 JAS mais 43 JAS après celle-ci, ces valeurs avaient diminué. Ceci suggère que les plantes ont mis un certain temps avant de sentir le stress et de fermer leurs stomates pour éviter une perte d'eau par transpiration. Habituellement, la réduction de l'ouverture des stomates affecte fortement le potentiel osmotique et le contenu en eau des plantes¹⁷⁶. Globalement on a observé une réduction du contenu en eau des feuilles et des tiges ainsi qu'une diminution du potentiel hydrique 24 JAS. Cela est en accord avec les observations de Hayat et al.¹⁷⁷, Rahman et al.¹⁷⁸ et Xue et al.¹⁷⁹, qui ont observé dans leurs études respectives que leurs tomates présentaient des signes similaires suite à la mise en place d'un stress hydrique.

Malgré des réponses très hétérogènes au sein des traitements, 43 JAS, on a constaté que eckl, nsf et soli amélioraient plus fortement la conductance stomatique que asco et pur. Nos observations vont dans le sens de plusieurs études¹⁸⁰⁻¹⁸², bien que nos résultats avec asco et pur ne corroborent pas les résultats. Ces études ont respectivement montré qu'un biostimulant issu d'*A.nodosum*, *E.maxima* ou à partir de thé de vermicompost diminuait la fermeture stomatique.

Il semblerait que pur puisse avoir un mécanisme d'action similaire à ce qu'ont décrit Santaniello et al.¹⁸³ sur *Arabidopsi*, en réduisant l'ouverture des stomates des plantes arrosées. Contrairement à leur produit issu d'*A.nodosum*, asco a semblé n'avoir aucun effet sur les plantes bien arrosées.

Les biostimulants ont également agi sur le contenu en eau et le potentiel hydrique de nos plantes. Ils n'ont pas influencé le contenu en eau des tiges mais, au niveau des feuilles, on a observé que les plantes traitées par nsf avaient le contenu en eau le plus faible tandis que asco et pur avaient des valeurs comparable aux plantes contrôles. Dans la littérature, Sujata et al.¹⁷⁶ ont montré que leur biostimulant issu d'*A.nodosum* permettait d'améliorer chez *Brassica juncea* la réponse au stress hydrique, de même que Ghaffari et al.¹²⁸, qui ont travaillé avec un thé de vermicompost sur de la betterave sucrière.

Pur, nsf et soli ont permis d'améliorer le potentiel hydrique des plantes en condition de stress. Comme chez Sujata et al.¹⁷⁶, asco a eu peu d'impact sur ce paramètre. Le résultats était similaire pour eckl.

Les sucres solubles totaux sont des osmolytes qui interviennent dans l'ajustement osmotique au même titre que la proline, le Ca⁺ ou le K⁺ pour maintenir le gradient permettant le déplacement de l'eau et la turgescence⁵⁶chez de nombreuses plantes. Sur nos plantes récoltées 24 JAS, nous n'avons observé aucun effet du stress ou des biostimulants, probablement dû aux biostimulants asco, eckl et pur qui montrent une forte variabilité en condition de stress. Il est tout de même très probable que ces 3 produits induisent une augmentation des sucres solubles d'après leurs valeurs moyennes supérieures aux plantes témoins en stress et en contrôle. Dans leurs études, Sujata et al.¹⁷⁶ et Ghaffari et al.¹²⁸ ont montré que l'application de leurs biostimulants augmentait la quantité de sucres solubles en condition de stress hydrique. Ghaffari et al.¹²⁸ ont également fait cette observation sur des plantes non stressées avec leur thé de vermicompost.

6.1.3 Activité photosynthétique

Pour l'activité photosynthétique, nous avons eu l'occasion de suivre les concentrations en chlorophylle et en azote, la fluorescence de la chlorophylle ainsi que la conductance stomatique (discutée auparavant) des feuilles en milieu et fin d'expérience. 24 jours après l'application du stress (JAS) le contenu en chlorophylle et en azote des plantes stressées était équivalent voire supérieur à certains traitements du bloc contrôle mais cette différence n'était plus significative par la suite. Une concentration plus importante de chlorophylle en cas de stress hydrique a été observée dans d'autres études chez la tomate et peut être expliquée par

un effet de concentration due à une diminution de la surface foliaire¹⁸⁴, bien que ce paramètre n'ait pas été mesuré ici. Les mesures de rendement quantique du photosystème 2 (ΦPS2) et du taux de transport d'électrons (ETR) prises 43 JAS présentaient respectivement une absence d'effet et une diminution de l'ETR sous stress hydrique. Cette différence peut paraître étrange vu que ces deux paramètres semblent fortement liés dans la réaction photosynthétique^{185,186}.

Nos résultats nous montrent des signaux de réponse au stress hydrique mitigés. En effet, les signes de réponse au stress sont généralement assez clairs et l'on observe assez aisément une réduction importante de la conductance stomatique^{177,179,187} impactant négativement le flux de carbone entrant⁶⁹, une diminution significative de la quantité de chlorophylle^{177,179,188–190} ainsi qu'une réduction du ΦPS2^{186,191,192} et de l'ETR^{190,193} dus à une sous-régulation ou une photo-inhibition de la photosynthèse¹⁹⁴.

On pourrait supposer que l'absence de différences significatives au stress entre les plantes contrôles pourrait être due au fait que l'application du stress s'est faite sur des plantes âgées de 33 jours. Elles auraient, de ce fait, une meilleure résistance au stress que l'on a appliqué que des individus plus jeunes, comme dans l'expérience de Shamsul et al.¹⁷⁷ ou celle de Pervez et al.¹⁶⁷, qui ont montré que le moment de l'application d'un stress impactait différemment les plantes.

Une autre hypothèse serait que le stress appliqué était modéré et n'a pas nécessairement fortement affecté la photosynthèse des plantes.

L'amélioration de ces différents paramètres photosynthétiques peut être liée à l'action des biostimulants. Plusieurs études ont déjà montré que l'application de biostimulants lors d'un stress hydrique permettait d'améliorer le contenu en chlorophylle et la qualité de la photosynthèse chez de nombreuses plantes^{183,195,196}. Dans notre cas, les résultats sur la chlorophylle des plantes stressées 43 JAS entrent également en corrélation avec ces dernières. On a observé une seule différence : les plantes en contrôles stress présentaient des valeurs supérieures aux autres plantes pulvérisées, ce que l'on n'a retrouvé dans aucune des études utilisées dans cette discussion. On pourrait supposer que, sous l'effet du stress hydrique, l'épiderme de ces feuilles s'est épaissi¹⁷³ et qu'il y a eu une accumulation de chlorophylle plus importante en surface détectée lors de la mesure avec le DUALEX.

Une des causes de l'amélioration des valeurs de chlorophylle des plantes pulvérisées pourrait se situer dans la composition des biostimulants. En effet, tous nos biostimulants avaient dans leur composition minérale du Mg, un macronutriment important au sein des molécules de chlorophylle¹⁹⁷. Les pulvérisations pourraient ainsi créer un apport régulier en Mg permettant aux plantes d'en maintenir une quantité suffisante à leur bon fonctionnement. Parmi nos biostimulants, asco et soli sont les produits qui contenaient la plus grande quantité de Mg dans leur composition. On pourrait faire un lien avec nos résultats de chlorophylle car asco et soli, malgré la grande variabilité des observations, ont été les traitements où l'on a mesuré les plus grandes valeurs. Il aurait été intéressant de comparer cette hypothèse avec les valeurs de Mg mesurées dans des feuilles récoltées à la même période pour mieux visualiser la relation entre la composition du produit et le contenu en chlorophylle. Parmi les autres biostimulants, eckl est celui qui fut le moins efficace.

Au niveau de l'appareil photosynthétique, plusieurs expériences ont montré que des biostimulants à base d'algues ou de thé de vermicompost pouvaient améliorer ou maintenir le $\Phi PS2$ sur diverses plantes en conditions de stress^{198–200}. Dans notre cas, nous n'avons pas observé d'effet du stress mais il y a tout de même eu une amélioration du $\Phi PS2$ sur les plantes pulvérisées, signe probable d'une meilleure assimilation du carbone. Les biostimulants ayant eu le plus d'effet sont nsf et soli mais cela ne diffère pas significativement des autres produits pulvérisés qui améliorent légèrement ce facteur. Par rapport à nos données d'ETR, Xu et al.²⁰² et Kałużewicz et al.²⁰³ ont montré chez l'épinard et chez le brocoli que le vermicompost et un biostimulant à base d'*A.nodosum* associé à des acides aminés avaient la capacité d'améliorer ce paramètre en conditions normales et de stress. Avec nos données on n'a pas constaté cet effet d'amélioration par les biostimulants mais comme seul le contrôle bien arrosé présente une valeur d'ETR élevée, on peut émettre l'idée d'une régulation au niveau génétique¹⁸³.

6.1.4 MDA et réponses aux dommages cellulaires

Les stress environnementaux génèrent des espèces réactives de l'oxygène (ERO) susceptibles de causer d'importants dommages cellulaires comme la peroxydation des lipides⁵⁶. On a déjà vu que chez la tomate le stress hydrique induisait une augmentation significative des valeurs

de MDA^{173,204}. Nos résultats ont montré une très grande variabilité dans le groupe de plantes arrosées potentiellement causée par l'infestation de *Tuta absoluta* car nous n'aurions pas dû observer autant d'hétérogénéité dans ces valeurs en comparaison à d'autres études^{173,204}. Sur nos plantes stressées on a pu constater une mitigation de la peroxydation des lipides par les biostimulants. Sur la tomate, Goñi et al.¹⁷⁰ et Campobenedetto et al.²⁰⁴ l'ont également observée avec leurs biostimulants issus d'*A.nodosum*¹⁷⁰ et d'un mélange d'*A.nodosum* et de *Laminaria*²⁰⁴. De leur côté, Ghaffarie et al.¹²⁸ l'ont également montré chez la betterave sucrière¹²⁸. Les produits ayant induit la moins bonne protection cellulaire ont été soli, suivi de pur.

Pour limiter les dommages cellulaires causés par les ERO, les plantes possèdent une panoplie de molécules agissant à divers niveaux cellulaires⁵⁶. Dans notre étude, nous avons mesuré deux types d'antioxydants : les flavonols et les anthocyanes. Concernant les flavonols, nous n'avons observé aucun effet du stress et, à part pour le traitement soli, tous les biostimulants ont semblé induire une augmentation des flavonols, eckl et nsf ayant montré les meilleures réponses. Xu et al.²⁰⁵ ont montré, chez l'épinard, que le stress hydrique augmentait la quantité de flavonoïdes quand la mesure était faite à partir du poids frais. Parallèlement, quand ils mesuraient la même valeur à partir du poids sec, ils n'observaient plus de cette augmentation de flavonoïdes. Pour ces chercheurs, cela signifiait que le stress hydrique n'impactait pas ce paramètre. Il est probable que l'on ait affaire au même type de réponse au niveau foliaire concernant *S.lycopersicon*.

En ce qui concerne les anthocyanes, le stress a diminué leur quantité. Cela semble être similaire à ce que Hinojosa-Gómez et al.²⁰⁶ ont observé avec *Hibiscus sabdariffa*, une plante sensible à la sécheresse²⁰⁶, de même que pour Ghaffari et al.¹²⁸. L'application des biostimulants a cependant amélioré cette mesure. En effet, les plantes pulvérisées et arrosées présentaient toutes des valeurs supérieures à leur contrôle et les plantes stressées pulvérisées montraient des valeurs proches de ce dernier, comme ont pu observer Ghaffari et al.¹²⁸. De leur côté, Santaniello et al.¹⁸³ ont remarqué qu'après un pré-traitement avec leur biostimulant, ils avaient obtenu plus de transcriptions des gènes impliqués dans la synthèse des anthocyanes.

Tous nos biostimulants n'ont cependant pas agi avec la même intensité car il semblerait que soli n'ait pas impacté ce paramètre tandis que nsf a semblé être le biostimulant le plus efficace.

6.2 Reproduction et production

Dans nos résultats, le stress hydrique a ralenti le développement des inflorescences en début de floraison et influencé le nombre de fleurs passées en anthèse. Cela est similaire à ce qu'ont pu observer Lamin-Samu et al.²⁰⁷ en comparant le développement de fleurs sur des plants de tomate développés au simultanément sous stress hydrique et normalement. On n'a cependant plus fait cette observation en fin de culture malgré, l'application constante d'un stress hydrique, signe que l'application des biostimulants permettrait d'améliorer le délai de développement floral induit en condition de stress. Chez le maïs, Ayyat et al.²⁰⁸ ont également montré que leurs biostimulants à base d'extraits d'algues permettaient d'accélérer l'apparition des premiers bourgeons floraux et d'augmenter le nombre d'inflorescences en conditions de stress hydrique. Parmi nos biostimulants, nous avons constaté des différences entre les traitements avec nsf et soli qui ont semblé moins performants en donnant un nombre d'inflorescences inférieur aux autres biostimulants.

Il semblerait aussi que asco améliore le nombre d'inflorescences en conditions normales, comme l'ont observé Hussain al.²⁰⁹ dans leur étude.

Dans leur étude, Ayyat et al.²⁰⁸ ont montré que le stress hydrique limitait le développement de nouveaux fruits en induisant l'avortement de nombreuses fleurs ayant des anthères anormales et du pollen infertile. Dans notre expérience, nous avons observé sur notre première inflorescence que le stress hydrique impactait le pourcentage de fleurs en anthèse mais pas la viabilité pollinique. Grosjean¹⁶⁶, dans son étude, avait fait la même observation.

On a observé que eckl et pur pouvaient améliorer légèrement le pourcentage de fleurs en anthèse chez les contrôles. En stress, les mêmes tendances n'ont pas été observées car pur a été beaucoup moins efficace. Cela paraît étonnant car le 19/04, pur semblait avoir une meilleure performance que soli, le produit le moins efficace. Sur les plantes stressées, il a été intéressant de constater que nsf présentait le plus haut pourcentage de fleurs en anthèse malgré sa faible production d'inflorescences.

Ce pourcentage plus élevé de fleurs pourrait être dû à la tolérance induite d'une manière similaire à ce qu'ont observé Carmody et al.¹¹ sur des fleurs de tomates en stress thermique.

Ils laissaient supposer que l'application d'un de leur biostimulant, en modifiant le métabolisme des sucres, induirait une accumulation de sucrose dans leurs fleurs permettant le développement d'une quantité plus importante. Comme nsf n'as pas induit d'augmentation des sucres solubles on ne peut pas faire la même supposition, mais il est possible qu'un élément qu'on n'a pas mesuré ai agi.

Peu importe les mécanismes sous-jacents, un nombre plus élevé de fleurs sur des plantes en stress permet généralement d'obtenir une meilleure récolte^{128,161,195,209}.

Dans notre étude, nous n'avons pas mesuré le rendement mais nous nous sommes concentrés sur la qualité des fruits en termes de poids, circonférence, pH du jus et sucrosité. A part le pH, ces paramètres ont été affectés par le stress et les biostimulants. Comme pour Basit et al.²¹⁰, le pH n'a pas été affecté par le stress hydrique mais par les biostimulants. La modification du pH par les biostimulants serait due au fait qu'ils contiennent des molécules tel que l'acide ascorbique qui interviennent dans la régulation du pH du jus du fruit²¹⁰.

Les fruits les plus lourds ont été mesurés chez les plantes contrôles pulvérisées par asco et pur. En stress hydrique, à par eckl l'ensemble des produits ont semblé aider leur développement car les valeurs de poids ne différaient pas significativement du contrôle.

En comparaison avec les résultats de KERDRAON et al.¹⁶¹, nos mesures de poids ne semblent pas suivre la tendance qu'ils ont démontré. En effet, les deux traitements qu'ils ont désignés comme intéressants (asco et eckl) ont respectivement obtenu un poids moyen similaire et plus faible en comparaison de soli et nsf. On ne peut pas dire toute fois que soli est intéressant pour autant car sur la période de récolte nous n'avons obtenu que deux fruits.

Concernant la sucrosité, les biostimulants semblent augmenter la concentration en sucres solubles chez les plantes correctement arrosées, comme pour Mzibra et al.²¹¹. Avec les acides organiques, ils constituent deux éléments importants dans la qualité d'une tomate ²¹¹. On peut donc supposer les tomates traitées sont potentiellement plus intéressantes que le contrôle en termes de goût.

Nos plantes stressées ont montré une augmentation globale de la quantité de sucres contenu dans les fruits. Cela entre en corrélation avec Cui et al.⁹, qui ont obtenu des tomates avec une qualité gustative et nutritionnelle augmentée lors d'une culture sous stress hydrique. Les deux

biostimulants impactant le plus positivement nos valeurs ont été asco et pur. Etonnement, soli semble avoir diminué la sucrosité de ses fruits.

6.3 Nutrition minérale

La nutrition minérale des plantes est dépendante de la quantité d'eau absorbée par leurs racines et du taux d'évapotranspiration. Cependant, en conditions de stress hydrique, à cause de la réduction de l'eau et de l'augmentation de l'indisponibilité des minéraux présents dans le sol, l'absorption de ces derniers est réduite et/ou ralentie au niveau de la plante et peut ainsi affecter beaucoup de processus biologiques²¹². Les biostimulants améliorent la qualité de la nutrition minérale en agissant sur des paramètres tels que la structure du sol, la stimulation de la croissance racinaire ou en améliorant la solubilité des minéraux²¹³.

Dans notre étude, nous n'avons quasiment pas apporté d'engrais en dehors du terreau lors de la culture et les seuls apports exogènes étaient les applications foliaires de biostimulants ; il était donc intéressant d'analyser les teneurs en minéraux dans les feuilles.

En termes de composition en macroéléments, le biostimulant asco était le produit qui contenait le plus de minéraux, suivi de nsf et soli. De son côté, pur avait seulement le Ca en concentration plus élevée par rapport aux autres biostimulants. Pour les microéléments, seuls asco et soli avaient une concentration statistiquement plus élevée en minéraux. En ce qui concerne pur, la quantité relative entre les différents minéraux corroborait les observations de Marcelis (2019)¹⁶², à part pour K, dont la concentration était plus faible dans le thé de vermicompost que nous avons utilisé.

L'apport de biostimulant par application foliaire a peu modifié les teneurs en minéraux par rapport aux plantes non traitées, sauf pour quelques éléments. Sur l'ensemble des plantes sans stress hydrique pulvérisées, les teneurs en Ca étaient un peu plus élevées que chez les plantes non traitées tandis qu'une tendance inverse a été observée pour le K. Les teneurs en Na des plantes traitées avec les biostimulants à base d'algues étaient similaires à celles chez les plantes non traitées malgré une teneur assez élevée en Na dans ces biostimulants ; ce qui suggère que l'application de ces produits à base d'algues n'a pas augmenté la teneur

en Na dans les plantes, le Na leur étant toxique à forte concentration²¹⁴. De même, les teneurs en Fe, Zn et Cu n'ont pas été affectées par les biostimulants chez les plantes non stressées.

Chez les plantes pulvérisées stressées, les valeurs ont plus varié en fonction des traitements.

Dans les feuilles des plantes en stress hydrique, la quantité de Ca a diminué par rapport aux plantes témoins seulement avec les traitements asco et pur. Medyouni et al.²¹⁵ ont également observé, sans application de biostimulant, une diminution des teneurs en Ca en stress hydrique chez *S.lycopersicon*. Dans leur étude, cette diminution était associée à une diminution de K et ils suggéraient que cela signifiait un déficit dans l'apport d'ions essentiels à la croissance de la plante²¹⁵. On ne peut cependant affirmer la même chose pour notre étude car nos plantes stressées avaient des valeurs de K supérieures à leurs équivalents arrosés. Une modification du rapport K/Ca, induite par la réduction du niveau de Ca dans les feuilles, a été observée en cas de stress hydrique chez la variété de tomate Renova²¹⁶. Dans notre étude, on peut supposer que le stress a induit une telle modification chez plantes traitées avec asco et pur. Par rapport aux plantes stressées témoin, on a observé une forte augmentation des teneurs de K avec ces deux traitements. On peut de ce fait supposer un potentiel changement dans la perméabilité des feuilles aux ions Ca et K favorisée par ces produits. Les autres traitements n'ont pas semblé avoir d'effet particulier sur les teneurs en K.

Dans notre étude, le stress hydrique a augmenté les teneurs en Na chez toutes les plantes, similairement à ce que Ors et al. avaient observé²¹⁷. Malgré sa toxicité, le Na, quand il est stocké dans les vacuoles, peut intervenir dans l'ajustement osmotique²¹⁸ et ainsi réduire l'impact négatif du stress hydrique. Parmi les biostimulants, asco est celui qui contenait le plus de Na et les plantes stressées traitées avec lui avaient la plus grande concentration en Na dans les feuilles, suggérant une absorption foliaire de Na provenant du produit. L'impact des biostimulants semble donc différent sur les teneurs en Na des plantes en présence ou absence de stress hydrique.

Concernant les microéléments, de la même manière que chez Sánchez-Rodríguez et al.²¹⁹ pour la plupart de leurs cultivars, nous n'avons pas observé d'impact du stress hydrique sur les teneurs en Fe, Zn et Cu (à l'exception de soli).

De même, nous n'avons pas observé d'effet des biostimulants sur la teneur en Fe des plantes stressées mais nous en avons vu sur les teneurs en Zn et Cu. On a remarqué que la quantité

de Zn et de Cu était plus importante chez les plantes stressées traitées avec soli que chez les autres plantes. Ceci pourrait avoir un effet bénéfique tant que les teneurs ne dépassent pas les seuils de toxicité. En effet, le Zn est un important composant des enzymes impliquées dans la synthèse protéique, la production d'énergie et le maintien de l'intégrité des membranes²¹⁹. Le Cu participe à limiter le stress oxydatif et permettrait une meilleure activité enzymatique antioxydante chez les plantes²¹⁹. Cette augmentation de la teneur en Zn et Cu dans les plantes traitées avec soli peut être expliquée par la teneur plus importante de ces minéraux dans ce biostimulant en comparaison de celle des autres ; ceci suggère une absorption foliaire de ces éléments suite à la pulvérisation du biostimulant.

Pour résumer cette partie, en conditions de stress hydrique, on a pu observer chez asco et pur une forte augmentation du ratio K/Ca qui permettrait d'améliorer la tolérance de nos plantes à ce stress. De son côté, soli agirait sur la qualité de la réponse enzymatique.

7. Conclusion et perspectives

Cette étude a comparé les capacités de 5 biostimulants produits à partir de 4 espèces d'algues différentes *A.nodosum* (asco), *E.maxima* (eckl), *Laminaria* (nsf) et *C.soli* (soli) et d'un thé de vermicomposte (pur) à rendre *S.lycopersicum* cv moneymaker plus résistante au stress hydrique. En condition arrosées nous avons comparé asco, eckl et pur, tandis qu'en conditions de stress nous les avons comparés avec deux biostimulants supplémentaires, nsf et soli.

De manière générale les signes de réponse au stress hydrique ont été en demi-teinte avec le contrôle mais des différences ressortent tout de même dans l'action des différents produits.

Les caractéristiques de ces produits variaient toutes que ce soit en termes de composition minérales ou de caractéristiques physiques. Les produits semblent tous agir plus ou moins sur les signes de stress hydriques, on peut tout de même les discriminer par rapport au nombre paramètres améliorés et l'intensité de la réponse.

En absence de stress hydrique, on a pu observer que les plantes pulvérisées par asco et eckl avaient une croissance plus rapide, tandis que pur améliorait mieux la production de biomasse.

Seules les plantes traitées par asco donné un plus grand nombre d'inflorescences, cependant contrebalancé par le taux de fleurs passées en anthèse le plus faible.

En fin de culture, les biostimulants n'ont pas semblé avoir amélioré la conductance stomatique a part eckl, ni le contenu en eau des organes végétatifs. Ils ont cependant amélioré le potentiel hydrique et le contenu en sucres solubles totaux des plantes. Il n'est pas ressorti de différence pour les sucres mais, on a pu constater avec pur et eckl une amélioration du potentiel hydrique plus important qu'avec asco.

Dans l'analyse des paramètres liés au photosystème, nous n'avons pas observé d'amélioration particulière du contenu en chlorophylle et du statut azoté. Le rendement quantique du PS2 a été légèrement amélioré mais les produits ont semblé néanmoins avoir induit une diminution de l'ETR.

Lorsque l'on a mesuré les dommages cellulaires, ils étaient équivalent au contrôle à part pour pur qui a montré une valeur supérieure. L'ensemble des produits ont induit une augmentation des antioxydants mesurés (flavonols et anthocyanes) équivalente.

Concernant la nutrition, on a observé que l'application de asco, eckl et pur sur les plantes non stressées augmentaient leur teneur en calcium et diminuaient celles en potassium.

En condition de stress hydrique, les traitements asco et pur ont permis de maintenir une meilleur croissance et une biomasse élevée.

Sur les modalités de reproduction, on a observé le plus de différences entre les traitements. Soli a été le traitement qui a eu le plus de difficultés à avoir des fleurs en anthèse, suivi de pur malgré la bonne production de fleurs de ce traitement. Asco et eckl n'ont pas eu d'effet particulier sur le taux de fleurs en anthèse, tandis que nsf en a montré le meilleur.

En fin de culture , la conductance stomatique a été fortement améliorée par eckl, nsf et soli et plus faiblement par asco et pur.

Nsf et soli ont également induit les meilleures améliorations du potentiel hydrique avec pur. Cependant, à la différence de asco et pur ils ont eu un moins bon maintien de leur contenu en eau et n'ont pas induit une augmentation des sucres solubles comme ces derniers et eckl.

Dans les paramètres photosynthétique, asco et soli ont amélioré le contenu en chlorophylle et en azote de leur plantes contrairement aux autres biostimulants. Nsf et soli ont semblé améliorer le mieux le rendement quantique du PS2.

Tous les produits ont permis de bien diminuer les dommages cellulaires. Soli est celui qui a le moins bien fonctionné. Il n'a également induit aucune teneur en antioxydants au contraire des autres qui ont tous amélioré la teneur en flavonols. Seul nsf a amélioré la quantité d'anthocyanes des feuilles.

La teneur en potassium des feuilles a augmenté avec les traitements asco et pur. Celle en sodium a également augmenté avec le traitement asco. Les plantes traitées par soli ont montré une forte augmentation des teneurs en zinc et en cuivre.

Les paramètres sur les fruits ont essentiellement été améliorés en termes de sucrosité.

Chez les plantes arrosées, on a constaté que les biostimulants asco et pur amélioraient le poids des fruits tandis qu'en stress aucun biostimulant n'a eu d'impact positif. En termes de quantité, soli est le traitement qui a été le moins fructueux.

Au niveau de la qualité des fruits, l'acidité a légèrement varié avec les biostimulants tandis que la sucrosité des fruits a augmenté pour tous les traitements à l'exception de soli. Les biostimulants induisant la plus grande accumulation de sucres ont été asco et pur.

Pour conclure, les biostimulants les plus susceptibles d'améliorer la résistance de *S.lycopersicon* cv moneymaker sont asco et pur car ils ont induit le plus de réponses de tolérance au stress. Ils ont amélioré tous deux la croissance végétative, induit et apporté un bon maintien du statut hydrique, des osmoprotectants et des antioxydants réduisant les dommages cellulaires subits. Le seul bémol que l'on pourrait apporter à pur, c'est que contrairement à asco on n'a pas obtenu d'amélioration du contenu en chlorophylle.

Concernant la production, nous n'avons pas obtenu de d'amélioration du poids des fruits en condition de stress hydrique. On peut cependant supposer que asco et pur sont susceptibles d'améliorer le poids des fruits d'après les données obtenues sur nos plantes arrosées. En termes de sucrosité, ce sont également les meilleurs candidats.

L'application foliaire des biostimulants a peu modifié les teneurs en minéraux des plantes et ne semble pas impacter les plantes non stressées. On a seulement obtenu des effets visibles avec asco et soli en stress hydrique sur respectivement sur les teneur en sodium et celles du cuivre et zinc.

Dans la continuation de cette étude il serait intéressant d'approfondir la relation avec la réponse du système racinaire et d'étudier plus en détails la qualité nutritive que cela peut induire dans les fruits avec les produits qui ont le mieux fonctionner. Il serait également très instructif d'étudier les effets de ces produits au niveau du microbiome qui se forme autour de la plante et d'observer les interactions positives que cela peut créer.

8. Bibliographie

1. Trends in surface equivalent potential temperature: A more comprehensive metric for global warming and weather extremes. <https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.2117832119> doi:10.1073/pnas.2117832119.
2. Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability - IPCC Summary for policymakers.pdf.
3. Trenberth, K. Changes in precipitation with climate change. *Clim. Res.* **47**, 123–138 (2011).
4. *Plant Responses to Drought Stress*. (Springer Berlin Heidelberg, 2012). doi:10.1007/978-3-642-32653-0.
5. Mirzabaev, A. *et al.* Climate Change and Food Systems. in *Science and Innovations for Food Systems Transformation* (eds. von Braun, J., Afsana, K., Fresco, L. O. & Hassan, M. H. A.) 511–529 (Springer International Publishing, 2023). doi:10.1007/978-3-031-15703-5_27.
6. Bhattacharya, A. Global Climate Change and Its Impact on Agriculture. in *Changing Climate and Resource Use Efficiency in Plants* 1–50 (Elsevier, 2019). doi:10.1016/B978-0-12-816209-5.00001-5.
7. FAOSTAT. <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL/visualize>.
8. Alordzinu, K. E. *et al.* Water stress affects the physio-morphological development of tomato growth. *Afr. J. Agric. Res.* **17**, 733–742 (2021).
9. Cui, J., Shao, G., Lu, J., Keabetswe, L. & Hoogenboom, G. Yield, quality and drought sensitivity of tomato to water deficit during different growth stages. *Sci. Agric.* **77**, (2019).
10. Sarker, M. R. *et al.* The effects of climatic change mediated water stress on growth and yield of tomato. *Cent. Asian J. Environ. Sci. Technol. Innov.* **1**, (2020).
11. Carmody, N., Goñi, O., Łangowski, Ł. & O’Connell, S. Ascophyllum nodosum Extract Biostimulant Processing and Its Impact on Enhancing Heat Stress Tolerance During Tomato Fruit Set. *Front. Plant Sci.* **11**, (2020).
12. Arancon, N. Q., Owens, J. D. & Converse, C. The effects of vermicompost tea on the growth and yield of lettuce and tomato in a non-circulating hydroponics system. *J. Plant Nutr.* **42**, 2447–2458 (2019).
13. Goñi, O. *et al.* Comparative Transcriptome Analysis of Two Ascophyllum nodosum Extract Biostimulants: Same Seaweed but Different. *J. Agric. Food Chem.* **64**, 2980–2989 (2016).
14. Oppo, D. Millennial Climate Oscillations. *Science* **278**, 1244–1246 (1997).
15. Wanner, H. *et al.* Mid- to Late Holocene climate change: an overview. *Quat. Sci. Rev.* **27**, 1791–1828 (2008).
16. Zalasiewicz, J. *et al.* The Working Group on the Anthropocene: Summary of evidence and interim recommendations. *Anthropocene* **19**, 55–60 (2017).
17. Lange, J.-M. Repères pour l’enseignement et la formation des enseignants à l’ère de l’anthropocène. in *Travail, formation et éducation au temps des transitions écologiques* (ed. Legardez, F. D.-G. et A.) (Octarès éditions, 2020).
18. meteofrance. Une sécheresse des sols historique dans de nombreuses régions. <https://meteofrance.com/actualites-et-dossiers/actualites/climat/une-secheresse-des-sols-historique-dans-de-nombreuses-regions> (2022).

19. eaufrance. Bulletin national de situation hydrologique de juillet 2022. <https://www.eaufrance.fr/actualites/bulletin-national-de-situation-hydrologique-de-juillet-2022> (2022).
20. francetvinfo. Etats-Unis : le désert de la Vallée de la Mort en Californie en proie à des crues exceptionnelles. (2022).
21. Ring, M. J., Lindner, D., Cross, E. F. & Schlesinger, M. E. Causes of the Global Warming Observed since the 19th Century. *Atmospheric Clim. Sci.* **02**, 401 (2012).
22. Changements Climatiques 2007 Rapport de synthèse IPCC.
23. Ippc. *The Ocean and Cryosphere in a Changing Climate: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. (Cambridge University Press, 2022). doi:10.1017/9781009157964.
24. Pachauri, R. K., Meyer, L. A. & Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat. *Changements climatiques 2014: rapport de synthèse*. (2015).
25. Ma, J. *et al.* Responses of the Tropical Atmospheric Circulation to Climate Change and Connection to the Hydrological Cycle. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* **46**, 549–580 (2018).
26. Allan, R. P. *et al.* Climate Change 2021: The Physical Science Basis - Summary for Policymakers. 32 (2021).
27. Meyer, A. L. S., Bentley, J., Odoulami, R. C., Pigot, A. L. & Trisos, C. H. Risks to biodiversity from temperature overshoot pathways. *Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci.* **377**, 20210394 (2022).
28. Diffenbaugh, N. S. & Burke, M. Global warming has increased global economic inequality. *Proc. Natl. Acad. Sci.* **116**, 9808–9813 (2019).
29. Bell, J. E. *et al.* Changes in extreme events and the potential impacts on human health. *J. Air Waste Manag. Assoc.* **68**, 265–287 (2018).
30. Otto, C., Kuhla, K., Geiger, T., Schewe, J. & Frieler, K. *Incomplete recovery to enhance economic growth losses from US hurricanes under global warming*. <https://www.researchsquare.com/article/rs-654258/v2> (2022) doi:10.21203/rs.3.rs-654258/v2.
31. European Commission. Joint Research Centre. *Global warming and drought impacts in the EU: JRC PESETA IV project : Task 7*. (Publications Office, 2020).
32. Vörösmarty, C. J. *et al.* Global threats to human water security and river biodiversity. *Nature* **467**, 555–561 (2010).
33. IPES-Food. *From uniformity to diversity: a paradigm shift from industrial agriculture to diversified agroecological systems*. <https://hdl.handle.net/10568/75659> (2016).
34. Pahalvi, H. N., Rafiya, L., Rashid, S., Nisar, B. & Kamili, A. N. Chemical Fertilizers and Their Impact on Soil Health. in *Microbiota and Biofertilizers, Vol 2: Ecofriendly Tools for Reclamation of Degraded Soil Environs* (eds. Dar, G. H., Bhat, R. A., Mehmood, M. A. & Hakeem, K. R.) 1–20 (Springer International Publishing, 2021). doi:10.1007/978-3-030-61010-4_1.
35. Savci, S. An Agricultural Pollutant: Chemical Fertilizer. *Int. J. Environ. Sci. Dev.* 73–80 (2012) doi:10.7763/IJESD.2012.V3.191.
36. Towards a new definition of quality for fresh fruits and vegetables | Elsevier Enhanced Reader. <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0304423817305988?token=82C8B36E08EF63DA1EE64A6F19690B5496645F07E813DD26019AD80D8EE51F327D2F6034AE1DFE691B26154C7BFD9A22&originRegion=eu-west-1&originCreation=20220708135358> doi:10.1016/j.scienta.2017.09.046.
37. The global value of water in agriculture. <https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.2005835117> doi:10.1073/pnas.2005835117.

38. Assessment of global drought propensity and its impacts on agricultural water use in future climate scenarios | Elsevier Enhanced Reader.
<https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S016819231930231X?token=A9C408A937F36A55A14FB7F0F160FD23990B295DE2C96D63C0E3A0420EE581F3FC126FBAED3E2AEFA9ADDB85C398CB1C&originRegion=eu-west-1&originCreation=20221011132358>
doi:10.1016/j.agrformet.2019.107623.
39. Adaptation strategies for agricultural water management under climate change in Europe | Elsevier Enhanced Reader.
<https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S037837741500089X?token=18E19CF9F2AA745E8BB1D1EC1AB496091DCDC58E26AA8562DA9CFD69D4FF0676D990B798021939FE0B40794A4691D416&originRegion=eu-west-1&originCreation=20221011143545>
doi:10.1016/j.agwat.2015.03.014.
40. Zhao, C. *et al.* Temperature increase reduces global yields of major crops in four independent estimates. *Proc. Natl. Acad. Sci.* **114**, 9326–9331 (2017).
41. Ray, D. K. *et al.* Climate change has likely already affected global food production. *PLOS ONE* **14**, e0217148 (2019).
42. Knox, J., Hess, T., Daccache, A. & Wheeler, T. Climate change impacts on crop productivity in Africa and South Asia. *Environ. Res. Lett.* **7**, 034032 (2012).
43. Schnitter, R. & Berry, P. The Climate Change, Food Security and Human Health Nexus in Canada: A Framework to Protect Population Health. *Int. J. Environ. Res. Public Health* **16**, 2531 (2019).
44. Chen, Y., Zhang, Z. & Tao, F. Impacts of climate change and climate extremes on major crops productivity in China at a global warming of 1.5 and 2.0°C. *Earth Syst. Dyn.* **9**, 543–562 (2018).
45. Guo, C. *et al.* Impacts of climate change mitigation on agriculture water use: A provincial analysis in China. *Geogr. Sustain.* **1**, 189–199 (2020).
46. Chartzoulakis, K. & Bertaki, M. Sustainable Water Management in Agriculture under Climate Change. *Agric. Agric. Sci. Procedia* **4**, 88–98 (2015).
47. Flörke, M., Schneider, C. & McDonald, R. I. Water competition between cities and agriculture driven by climate change and urban growth. *Nat. Sustain.* **1**, 51–58 (2018).
48. Climate change and challenges of water and food security | Elsevier Enhanced Reader.
<https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S221260901400020X?token=C17A5DFDA942E99892866003E702A91354C88FD978604DC3E1D0FE2B464FF6F774D8AD1F59745CBB2903934FBDE73F6E&originRegion=eu-west-1&originCreation=20221011130244>
doi:10.1016/j.ijlsbe.2014.04.006.
49. Vaadia, Y., Raney, F. C. & Hagan, R. M. Plant Water Deficits and Physiological Processes. *Annu. Rev. Plant Physiol.* **12**, 265–292 (1961).
50. Schlesinger, W. H. & Jasechko, S. Transpiration in the global water cycle. *Agric. For. Meteorol.* **189–190**, 115–117 (2014).
51. Cornu, S. La circulation de l’eau dans l’arbre : ascension de la sève et transpiration foliaire. 58 (1998).
52. L-ARBRE-ET-L-EAU.pdf.
53. Meza, F. J. Variability of reference evapotranspiration and water demands. Association to ENSO in the Maipo river basin, Chile. *Glob. Planet. Change* **47**, 212–220 (2005).

54. Mosa, K. A., Ismail, A. & Helmy, M. Introduction to Plant Stresses. in *Plant Stress Tolerance: An Integrated Omics Approach* (eds. Mosa, K. A., Ismail, A. & Helmy, M.) 1–19 (Springer International Publishing, 2017). doi:10.1007/978-3-319-59379-1_1.
55. Zhu, J.-K. Abiotic Stress Signaling and Responses in Plants. *Cell* **167**, 313–324 (2016).
56. Farooq, M., Wahid, A., Kobayashi, N., Fujita, D. & Basra, S. M. A. Plant drought stress: effects, mechanisms and management. *Agron. Sustain. Dev.* **29**, 185–212 (2009).
57. Ondrasek, G. *Drought: Detection and Solutions*. (BoD – Books on Demand, 2020).
58. Trenberth, K. E. *et al.* Global warming and changes in drought. *Nat. Clim. Change* **4**, 17–22 (2014).
59. Khaeim, H. *et al.* The Effect of Temperature and Water Stresses on Seed Germination and Seedling Growth of Wheat (*Triticum aestivum* L.). *Sustainability* **14**, 3887 (2022).
60. . V., Shahi, C., Bargali, K. & Bargali, S. Seed germination and seedling growth parameters of rice (*Oryza sativa* L.) varieties as affected by salt and water stress. *Indian J. Agric. Sci.* **85**, 102–108 (2015).
61. Sevik, H. & Cetin, M. Effects of Water Stress on Seed Germination for Select Landscape Plants. *Pol. J. Environ. Stud.* **24**, 689–693 (2015).
62. How Seed Size and Water Stress Effect the Seed Germination and Seedling Growth in Wheat Varieties? – Current Agriculture Research Journal. <http://www.agriculturejournal.org/volume3number1/how-seed-size-and-water-stress-effect-the-seed-germination-and-seedling-growth-in-wheat-varieties/>.
63. Rao, G. *et al.* Low soil temperature and drought stress conditions at flowering stage affect physiology and pollen traits of rice. *J. Integr. Agric.* **18**, 1859–1870 (2019).
64. Imani, C., Aguyoh, J. & Opiyo, A. Water stress affects growth and yield of container grown tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill) plants. *Glob J Bio-Sci BioTechnol* **2**, 461–466 (2013).
65. Pirzad, A. *et al.* Effect of water stress on leaf relative water content, chlorophyll, proline and soluble carbohydrates in *Matricaria chamomilla* L. **6** (2011).
66. Hsiao, T. C. Plant Responses to Water Stress. *Annu. Rev. Plant Physiol.* **24**, 519–570 (1973).
67. Tanguilig, V. C., Yambao, E. B., O'toole, J. C. & De Datta, S. K. Water stress effects on leaf elongation, leaf water potential, transpiration, and nutrient uptake of rice, maize, and soybean. *Plant Soil* **103**, 155–168 (1987).
68. Batista-Silva, W. *et al.* The role of amino acid metabolism during abiotic stress release. *Plant Cell Environ.* **42**, 1630–1644 (2019).
69. Tezara, W., Mitchell, V. J., Driscoll, S. D. & Lawlor, D. W. Water stress inhibits plant photosynthesis by decreasing coupling factor and ATP. *Nature* **401**, 914–917 (1999).
70. Flexas, J., Bota, J., Galmés, J., Medrano, H. & Ribas-Carbó, M. Keeping a positive carbon balance under adverse conditions: responses of photosynthesis and respiration to water stress. *Physiol. Plant.* **127**, 343–352 (2006).
71. Biehler, K. & Fock, H. Evidence for the Contribution of the Mehler-Peroxidase Reaction in Dissipating Excess Electrons in Drought-Stressed Wheat. *Plant Physiol.* **112**, 265–272 (1996).
72. Hernández, I., Cela, J., Alegre, L. & Munné-Bosch, S. Antioxidant Defenses Against Drought Stress. in *Plant Responses to Drought Stress: From Morphological to Molecular Features* (ed. Aroca, R.) 231–258 (Springer, 2012). doi:10.1007/978-3-642-32653-0_9.
73. Sharma, A. *et al.* Photosynthetic Response of Plants Under Different Abiotic Stresses: A Review. *J. Plant Growth Regul.* **39**, 509–531 (2020).
74. Lawlor, D. W. & Cornic, G. Photosynthetic carbon assimilation and associated metabolism in relation to water deficits in higher plants. *Plant Cell Environ.* **25**, 275–294 (2002).

75. Sun, Y., Wang, C., Chen, H. Y. H. & Ruan, H. Response of Plants to Water Stress: A Meta-Analysis. *Front. Plant Sci.* **11**, (2020).
76. Kazan, K. Diverse roles of jasmonates and ethylene in abiotic stress tolerance. *Trends Plant Sci.* **20**, 219–229 (2015).
77. Li, Z., Yu, J., Peng, Y. & Huang, B. Metabolic pathways regulated by abscisic acid, salicylic acid and γ -aminobutyric acid in association with improved drought tolerance in creeping bentgrass (*Agrostis stolonifera*). *Physiol. Plant.* **159**, 42–58 (2017).
78. Bariagabre, S. A., Asante, I. K., Gordon, C. & Ananng, T. Y. Cactus Pear (*Opuntia ficus-indica* L.) a Valuable Crop for Restoration of Degraded Soils in Northern Ethiopia. *J. Biol.* **8** (2016).
79. Grace, O. M. Succulent plant diversity as natural capital. *PLANTS PEOPLE PLANET* **1**, 336–345 (2019).
80. Corsi, S. *et al.* A Bibliometric Analysis of the Scientific Literature on Biostimulants. *Agronomy* **12**, 1257 (2022).
81. Critchley, A. T., Critchley, J. S. C., Norrie, J., Gupta, S. & Van Staden, J. Chapter 13 - Perspectives on the global biostimulant market: applications, volumes, and values, 2016 data and projections to 2022. in *Biostimulants for Crops from Seed Germination to Plant Development* (eds. Gupta, S. & Van Staden, J.) 289–296 (Academic Press, 2021). doi:10.1016/B978-0-12-823048-0.00012-5.
82. Kunal, A. & Tushar, M. *Biostimulants Market Size, Share and Industry Analysis Report by Active Ingredients (Acid-based [Humic Acid, Fulvic Acid, Amino Acids], Extract-based [Protein Hydrolysates, Seaweed Extracts]), Application (Foliar Treatment, Soil Treatment, Seed Treatment), Crop (Row Crops, Turf & Ornamentals, Fruit & Vegetables) and Form (Dry, Liquid), COVID-19 Impact Analysis, Regional Outlook, Growth Potential, Competitive Market Share & Forecast, 2022 – 2028.* 450 <https://www.gminsights.com/industry-analysis/biostimulants-market#:~:text=Based%20on%20source%2C%20biostimulants%20market%20is%20segmented%20into,groups%20help%20plant%20roots%20grow%2C%20water%2C%20and%20nutrients.> (2022).
83. Stirk, W. A., Rengasamy, K. R. R., Kulkarni, M. G. & Staden, J. Plant Biostimulants from Seaweed: An Overview. in *The Chemical Biology of Plant Biostimulants* (eds. Geelen, D. & Xu, L.) 31–55 (Wiley, 2020). doi:10.1002/9781119357254.ch2.
84. EBIC. Economic Overview of the European Biostimulants Market. <https://biostimulants.eu/highlights/economic-overview-of-the-european-biostimulants-market/> (2022).
85. Yakhin, O. I., Lubyantsev, A. A., Yakhin, I. A. & Brown, P. H. Biostimulants in Plant Science: A Global Perspective. *Front. Plant Sci.* **7**, (2017).
86. Brown, P. & Saa, S. Biostimulants in agriculture. *Front. Plant Sci.* **6**, (2015).
87. Calvo, P., Nelson, L. & Kloepper, J. W. Agricultural uses of plant biostimulants. *Plant Soil* **383**, 3–41 (2014).
88. Pooja & Munjal, R. Use of Biostimulants in Conferring Tolerance to Environmental Stress. in *Plant Ecophysiology and Adaptation under Climate Change: Mechanisms and Perspectives II: Mechanisms of Adaptation and Stress Amelioration* (ed. Hasanuzzaman, M.) 231–244 (Springer, 2020). doi:10.1007/978-981-15-2172-0_10.
89. Povero, G., Mejia, J. F., Di Tommaso, D., Piaggese, A. & Warrior, P. A Systematic Approach to Discover and Characterize Natural Plant Biostimulants. *Front. Plant Sci.* **7**, (2016).

90. Camarena-Gómez, M. T., Lähteenmäki-Uutela, A. & Spilling, K. Macroalgae production in Northern Europe: Business and government perspectives on how to regulate a novel blue bioeconomy. *Aquaculture* **560**, 738434 (2022).
91. Pereira, L., Morrison, L., Shukla, P. S. & Critchley, A. T. A concise review of the brown macroalga *Ascophyllum nodosum* (Linnaeus) Le Jolis. *J. Appl. Phycol.* **32**, 3561–3584 (2020).
92. Lähteenmäki-Uutela, A. *et al.* European Union legislation on macroalgae products. *Aquac. Int.* **29**, 487–509 (2021).
93. Khan, W. *et al.* Seaweed Extracts as Biostimulants of Plant Growth and Development. *J. Plant Growth Regul.* **28**, 386–399 (2009).
94. Nanda, S., Kumar, G. & Hussain, S. Utilization of seaweed-based biostimulants in improving plant and soil health: current updates and future prospective. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* (2021) doi:10.1007/s13762-021-03568-9.
95. Suchithra, M. R. *et al.* Effectiveness of green microalgae as biostimulants and biofertilizer through foliar spray and soil drench method for tomato cultivation. *South Afr. J. Bot.* **146**, 740–750 (2022).
96. Sangha, J. S., Kelloway, S., Critchley, A. T. & Prithiviraj, B. Seaweeds (Macroalgae) and Their Extracts as Contributors of Plant Productivity and Quality. in *Advances in Botanical Research* vol. 71 189–219 (Elsevier, 2014).
97. Hamed, S. M., Abd El-Rhman, A. A., Abdel-Raouf, N. & Ibraheem, I. B. M. Role of marine macroalgae in plant protection & improvement for sustainable agriculture technology. *Beni-Suef Univ. J. Basic Appl. Sci.* **7**, 104–110 (2018).
98. Ali, O., Ramsubhag, A. & Jayaraman, J. Biostimulant Properties of Seaweed Extracts in Plants: Implications towards Sustainable Crop Production. *Plants* **10**, 531 (2021).
99. Battacharyya, D., Babgohari, M. Z., Rathor, P. & Prithiviraj, B. Seaweed extracts as biostimulants in horticulture. *Sci. Hortic.* **196**, 39–48 (2015).
100. Van Oosten, M. J., Pepe, O., De Pascale, S., Silletti, S. & Maggio, A. The role of biostimulants and bioeffectors as alleviators of abiotic stress in crop plants. *Chem. Biol. Technol. Agric.* **4**, 5 (2017).
101. Fleurence, J. Biostimulant Potential of Seaweed Extracts Derived from *Laminaria* and *Ascophyllum nodosum*. in *Biostimulants: Exploring Sources and Applications* (eds. Ramawat, N. & Bhardwaj, V.) 31–49 (Springer Nature, 2022). doi:10.1007/978-981-16-7080-0_2.
102. Ertani, A. *et al.* Evaluation of Seaweed Extracts From *Laminaria* and *Ascophyllum nodosum* spp. as Biostimulants in *Zea mays* L. Using a Combination of Chemical, Biochemical and Morphological Approaches. *Front. Plant Sci.* **9**, (2018).
103. Schiener, P., Black, K. D., Stanley, M. S. & Green, D. H. The seasonal variation in the chemical composition of the kelp species *Laminaria digitata*, *Laminaria hyperborea*, *Saccharina latissima* and *Alaria esculenta*. *J. Appl. Phycol.* **27**, 363–373 (2015).
104. Appelhof, M. & Olszewski, J. *Worms Eat My Garbage, 35th Anniversary Edition: How to Set Up and Maintain a Worm Composting System: Compost Food Waste, Produce Fertilizer for Houseplants and Garden, and Educate Your Kids and Family.* (Storey Publishing, 2017).
105. Munroe, G. Introduction: Vermiculture and Vermicomposting. 56.
106. Edwards, C. A. & Arancon, N. Q. The Use of Earthworms in Organic Waste Management and Vermiculture. in *Biology and Ecology of Earthworms* (eds. Edwards, C. A. & Arancon, N. Q.) 467–527 (Springer US, 2022). doi:10.1007/978-0-387-74943-3_14.
107. Siddiqui, M. A., Neeraj, A. & Hiranmai, R. Y. Vermitechnology: An Eco-Friendly Approach for Organic Solid Waste Management and Soil Fertility Improvement—A Review. in *Strategies and Tools for Pollutant Mitigation: Research Trends in Developing Nations* (eds. Aravind, J., Kamaraj,

- M. & Karthikeyan, S.) 91–112 (Springer International Publishing, 2022). doi:10.1007/978-3-030-98241-6_5.
108. Soobhany, N. Insight into the recovery of nutrients from organic solid waste through biochemical conversion processes for fertilizer production: A review. *J. Clean. Prod.* **241**, 118413 (2019).
 109. Oominguez, J. Batch reactors allow feedstock to be added at the top from modified spreaders or mobile gantries. 3.
 110. Fornes, F., Mendoza-Hernández, D., García-de-la-Fuente, R., Abad, M. & Belda, R. M. Composting versus vermicomposting: A comparative study of organic matter evolution through straight and combined processes. *Bioresour. Technol.* **118**, 296–305 (2012).
 111. Lavelle, P. & Martin, A. Small-scale and large-scale effects of endogeic earthworms on soil organic matter dynamics in soils of the humid tropics. *Soil Biol. Biochem.* **24**, 1491–1498 (1992).
 112. Sim, E. Y. S. & Wu, T. Y. The potential reuse of biodegradable municipal solid wastes (MSW) as feedstocks in vermicomposting. *J. Sci. Food Agric.* **90**, 2153–2162 (2010).
 113. Amiri, H., Ismaili, A. & Hosseinzadeh, S. R. Influence of Vermicompost Fertilizer and Water Deficit Stress on Morpho-Physiological Features of Chickpea (*Cicer arietinum* L. cv. karaj). *Compost Sci. Util.* **25**, 152–165 (2017).
 114. Sarwar, G. *et al.* IMPROVEMENT OF SOIL PHYSICAL AND CHEMICAL PROPERTIES WITH COMPOST APPLICATION IN RICE-WHEAT CROPPING SYSTEM. 9.
 115. Liu, X. *et al.* Long-Term Application of Bio-Compost Increased Soil Microbial Community Diversity and Altered Its Composition and Network. *Microorganisms* **10**, 462 (2022).
 116. Raimi, A. R. *et al.* Diversity and predicted functional roles of cultivable bacteria in vermicompost: bioprospecting for potential inoculum. *Arch. Microbiol.* **204**, 261 (2022).
 117. Mohee, R. & Soobhany, N. Comparison of heavy metals content in compost against vermicompost of organic solid waste: Past and present. *Resour. Conserv. Recycl.* **92**, 206–213 (2014).
 118. S, K. K., Ibrahim, M. H., Quaik, S. & Ismail, S. A. Vermicomposting: An Earthworm Mediated Waste Treatment Technique. in *Prospects of Organic Waste Management and the Significance of Earthworms* (eds. Kiyasudeen S, K., Ibrahim, M. H., Quaik, S. & Ahmed Ismail, S.) 167–199 (Springer International Publishing, 2016). doi:10.1007/978-3-319-24708-3_8.
 119. Manivannan, S., Balamurugan, M., Parthasarathi, K., Gunasekaran, G. & Ranganathan, L. S. Effect of vermicompost on soil fertility and crop productivity - beans (*Phaseolus vulgaris*. *J. OfEnvironmental Biol.* 275–281 (2009).
 120. Makkar, C. *et al.* Vermicompost acts as bio-modulator for plants under stress and non-stress conditions. *Environ. Dev. Sustain.* (2022) doi:10.1007/s10668-022-02132-w.
 121. Yatoo, A. M., Ali, Md. N., Baba, Z. A. & Hassan, B. Sustainable management of diseases and pests in crops by vermicompost and vermicompost tea. A review. *Agron. Sustain. Dev.* **41**, 7 (2021).
 122. Haynes, R. J. & Zhou, Y.-F. Comparison of the chemical, physical and microbial properties of composts produced by conventional composting or vermicomposting using the same feedstocks. *Environ. Sci. Pollut. Res.* **23**, 10763–10772 (2016).
 123. Pattnaik, S. & Reddy, M. V. Nutrient Status of Vermicompost of Urban Green Waste Processed by Three Earthworm Species—*Eisenia fetida*, *Eudrilus eugeniae*, and *Perionyx excavatus*. *Appl. Environ. Soil Sci.* **2010**, e967526 (2009).
 124. Tognetti, C., Laos, F., Mazzarino, M. J. & Hernández, M. T. Composting vs. Vermicomposting: A Comparison of End Product Quality. *Compost Sci. Util.* **13**, 6–13 (2005).

125. Edwards, C. A., Arancon, N. Q. & Greytak, S. Beneficial response may be due to plant growth regulators or hormones produced by the high microbial activity in vermicomposts. 2.
126. Pant, A., Radovich, T. J. K., Hue, N. V. & Arancon, N. Q. Effects of Vermicompost Tea (Aqueous Extract) on Pak Choi Yield, Quality, and on Soil Biological Properties. *Compost Sci. Util.* **19**, 279–292 (2011).
127. Sugino Souffront, D. K., Salazar-Amoretti, D. & Jayachandran, K. Influence of vermicompost tea on secondary metabolite production in tomato crop. *Sci. Hortic.* **301**, 111135 (2022).
128. Ghaffari, H., Tadayon, M. R., Bahador, M. & Razmjoo, J. Biochemical and yield response of sugar beet to drought stress and foliar application of vermicompost tea. *Plant Stress* **5**, 100087 (2022).
129. Chinsamy, M., Kulkarni, M. G. & Staden, J. V. Vermicompost Leachate Reduces Temperature and Water Stress Effects in Tomato Seedlings. *HortScience* **49**, 1183–1187 (2014).
130. Muhie, S. H., Yildirim, E., Memis, N. & Demir, I. Vermicompost priming stimulated germination and seedling emergence of onion seeds against abiotic stresses. *Seed Sci. Technol.* **48**, 153–157 (2020).
131. Sallaku, G., Babaj, I., Kaciu, S. & Balliu, A. The influence of vermicompost on plant growth characteristics of cucumber (*Cucumis sativus* L.) seedlings under saline conditions. vol. 7 (2009).
132. Celikcan, F., Kocak, M. Z. & Kulak, M. Vermicompost applications on growth, nutrition uptake and secondary metabolites of *Ocimum basilicum* L. under water stress: A comprehensive analysis. *Ind. Crops Prod.* **171**, 113973 (2021).
133. Song, X., Li, H., Song, J., Chen, W. & Shi, L. Biochar/vermicompost promotes Hybrid Pennisetum plant growth and soil enzyme activity in saline soils. *Plant Physiol. Biochem.* **183**, 96–110 (2022).
134. Hosseinzadeh, S. R., Amiri, H. & Ismaili, A. Nutrition and biochemical responses of chickpea (*Cicer Arietinum* L.) to vermicompost fertilizer and water deficit stress. *J. Plant Nutr.* **40**, 2259–2268 (2017).
135. Voko, M. P. *et al.* Vermicompost leachate, seaweed extract and smoke-water alleviate drought stress in cowpea by influencing phytochemicals, compatible solutes and photosynthetic pigments. *Plant Growth Regul.* **97**, 327–342 (2022).
136. Kiran, S. Effects of Vermicompost on Some Morphological, Physiological and Biochemical Parameters of Lettuce (*Lactuca sativa* var. *crispa*) under Drought Stress. *Not. Bot. Horti Agrobot. Cluj-Napoca* **47**, 352–358 (2019).
137. Hosseinzadeh, S. R., Amiri, H. & Ismaili, A. Evaluation of photosynthesis, physiological, and biochemical responses of chickpea (*Cicer arietinum* L. cv. Pirouz) under water deficit stress and use of vermicompost fertilizer. *J. Integr. Agric.* **17**, 2426–2437 (2018).
138. Hosseinzadeh, S. R., Amiri, H. & Ismaili, A. Effect of vermicompost fertilizer on photosynthetic characteristics of chickpea (*Cicer arietinum* L.) under drought stress. *Photosynthetica* **54**, 87–92 (2016).
139. paper_14.pdf.
140. Bergougnoux, V. The history of tomato: From domestication to biopharming. *Biotechnol. Adv.* **32**, 170–189 (2014).
141. Gebhardt, C. The historical role of species from the Solanaceae plant family in genetic research. *Theor. Appl. Genet.* **129**, 2281–2294 (2016).
142. Baranski, R., Goldman, I., Nothnagel, T. & Scott, J. W. 19 - Improving Color Sources by Plant Breeding and Cultivation. in *Handbook on Natural Pigments in Food and Beverages* (eds. Carle, R. & Schweiggert, R. M.) 429–472 (Woodhead Publishing, 2016). doi:10.1016/B978-0-08-100371-8.00019-1.

143. Khan, I. A. Foreword. in *Sustainable Management of Arthropod Pests of Tomato* (eds. Wakil, W., Brust, G. E. & Perring, T. M.) xv (Academic Press, 2017). doi:10.1016/B978-0-12-802441-6.06001-0.
144. Quinet, M. *et al.* Tomato Fruit Development and Metabolism. *Front. Plant Sci.* **10**, 1554 (2019).
145. Echeverría-Londoño, S., Särkinen, T., Fenton, I. S., Purvis, A. & Knapp, S. Dynamism and context-dependency in diversification of the megadiverse plant genus *Solanum* (Solanaceae). *J. Syst. Evol.* **58**, 767–782 (2020).
146. Kaunda, J. S. & Zhang, Y.-J. The Genus *Solanum*: An Ethnopharmacological, Phytochemical and Biological Properties Review. *Nat. Prod. Bioprospecting* **9**, 77–137 (2019).
147. Knapp, S. & Peralta, I. E. The Tomato (*Solanum lycopersicum* L., Solanaceae) and Its Botanical Relatives. in *The Tomato Genome* (eds. Causse, M., Giovannoni, J., Bouzayen, M. & Zouine, M.) 7–21 (Springer, 2016). doi:10.1007/978-3-662-53389-5_2.
148. Grandillo, S. *et al.* *Solanum* sect. *Lycopersicon*. in *Wild Crop Relatives: Genomic and Breeding Resources* (ed. Kole, C.) 129–215 (Springer Berlin Heidelberg, 2011). doi:10.1007/978-3-642-20450-0_9.
149. Chetelat, R. T. & Ji, Y. Cytogenetics and Evolution. in *Genetic Improvement of Solanaceous Crops* (CRC Press, 2007).
150. Peralta, I. E. & Spooner, D. M. MORPHOLOGICAL CHARACTERIZATION AND RELATIONSHIPS OF WILD TOMATOES (*SOLANUM* L. SECT. *LYCOPERSICON*). 32.
151. Bedinger, P. A. *et al.* Interspecific reproductive barriers in the tomato clade: opportunities to decipher mechanisms of reproductive isolation. *Sex. Plant Reprod.* **24**, 171–187 (2011).
152. Suchoff, D. H. *et al.* Grafting the Indeterminate Tomato Cultivar Moneymaker onto Multifort Rootstock Improves Cold Tolerance. *HortScience* **53**, 1610–1617 (2018).
153. Venning, F. D. Investigations on the Morphology, Anatomy, and Secondary Growth in the Main Axis of Marglobe Tomato (*Lycopersicon Esculentum* Mill.). *Am. J. Bot.* **36**, 559–567 (1949).
154. Bai, Y. & Lindhout, P. Domestication and Breeding of Tomatoes: What have We Gained and What Can We Gain in the Future? *Ann. Bot.* **100**, 1085–1094 (2007).
155. 8213 (1).pdf.
156. Chanda, B., Gilliard, A., Jaiswal, N. & Ling, K.-S. Comparative Analysis of Host Range, Ability to Infect Tomato Cultivars with Tm-22 Gene, and Real-Time Reverse Transcription PCR Detection of Tomato Brown Rugose Fruit Virus. *Plant Dis.* **105**, 3643–3652 (2021).
157. Caractéristiques de la tomate ‘Moneymaker’, description de la variété, photos, avis. <https://fr.tomathouse.com/tomat-manimejker.html>.
158. Tomato Moneymaker: caractéristiques et description de la variété, rendement avec photo. <https://garden-fr.desiguxpro.com/tomat/vyrashhivanie/manimejker.html>.
159. Tomato Moneymaker Bio (très précoce) - L’atelier des bons plants. <https://www.atelier-des-bons-plants.fr/produit/tomate-moneymaker/>.
160. TagoraSign. H.G.C.P. | Tomato Moneymaker. <https://www.hgcp-seeds.be/boutique/semences-non-traitees-germiser/semences-de-legumes/tomate-moneymaker/>.
161. Annual_Report_Tomato2021.pdf.
162. Marcelis, S. The impact of boron excess and vermicompost tea on the arsenic absorption by *Atriplex atacamensis* PHIL. (2019).
163. Annual_Report_Tomato2021.docx. https://uclouvain-my.sharepoint.com/:w:/r/personal/mathilde_hebert_student_uclouvain_be/_layouts/15/doc2.aspx?sourcedoc=%7BFE03755F-1239-41AF-8D23-

8F3063640F47%7D&file=Annual_Report_Tomato2021.docx&action=default&mobileredirect=true&cid=ab1e6221-6a05-4b07-83ca-77c7c55d0a94.

164. Galmés, J. *et al.* Leaf responses to drought stress in Mediterranean accessions of *Solanum lycopersicum*: anatomical adaptations in relation to gas exchange parameters. *Plant Cell Environ.* **36**, 920–935 (2013).
165. Moles, T. M. *et al.* Drought induced changes of leaf-to-root relationships in two tomato genotypes. *Plant Physiol. Biochem.* **128**, 24–31 (2018).
166. Grosjean_16391600_2022.pdf.
167. Pervez, M. A., Ayub, C. M., Khan, H. A., Shahid, M. A. & Ashraf, I. EFFECT OF DROUGHT STRESS ON GROWTH, YIELD AND SEED QUALITY.
168. Alam, M. Z., Braun, G., Norrie, J. & Hodges, D. M. Effect of Ascophyllum extract application on plant growth, fruit yield and soil microbial communities of strawberry. *Can. J. Plant Sci.* **93**, 23–36 (2013).
169. Aslam, Z. & Ahmad, A. Effects of Vermicompost, Vermi-tea and Chemical Fertilizer on Morpho-physiological Characteristics of Maize (*Zea mays* L.) in Suleymanpasa District, Tekirdag of Turkey. *J. Innov. Sci.* **6**, (2020).
170. Goñi, O., Quille, P. & O’Connell, S. Ascophyllum nodosum extract biostimulants and their role in enhancing tolerance to drought stress in tomato plants. *Plant Physiol. Biochem.* **126**, 63–73 (2018).
171. O. Elansary, H., Mahmoud, E. A., El-Ansary, D. O. & Mattar, M. A. Effects of Water Stress and Modern Biostimulants on Growth and Quality Characteristics of Mint. *Agronomy* **10**, 6 (2020).
172. Kelpak - OMEX Agriculture. OMEX <https://www.omex.com/products/kelpak-uk>.
173. CAUCHIE, Anaïs_14551700_2022.pdf.
174. Gargallo-Garriga, A. *et al.* Opposite metabolic responses of shoots and roots to drought. *Sci. Rep.* **4**, 6829 (2014).
175. Kapoor, D. *et al.* The Impact of Drought in Plant Metabolism: How to Exploit Tolerance Mechanisms to Increase Crop Production. *Appl. Sci.* **10**, 5692 (2020).
176. Sujata, Goyal, V., Baliyan, V., Avtar, R. & Mehrotra, S. Alleviating Drought Stress in Brassica juncea (L.) Czern & Coss. by Foliar Application of Biostimulants—Orthosilicic Acid and Seaweed Extract. *Appl. Biochem. Biotechnol.* (2022) doi:10.1007/s12010-022-04085-2.
177. Shamsul Hayat, Syed Aiman Hasan, Qazi Fariduddin, & Aqil Ahmad. Growth of tomato (*Lycopersicon esculentum*) in response to salicylic acid under water stress. <https://www.tandfonline.com/doi/epdf/10.1080/17429140802320797?needAccess=true&role=button> (2008) doi:10.1080/17429140802320797.
178. Rahman, S. M. L., Mackay, W. A., Quebedeaux, B., Nawata, E. & Sakuratani, T. Superoxide Dismutase Activity, Leaf Water Potential, Relative Water Content, Growth and Yield of a Drought-Tolerant and a Drought-Sensitive Tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) Cultivars.
179. Xue, F. *et al.* Stomatal conductance of tomato leaves is regulated by both abscisic acid and leaf water potential under combined water and salt stress. *Physiol. Plant.* **172**, 2070–2078 (2021).
180. Elansary, H. O., Skalicka-Woźniak, K. & King, I. W. Enhancing stress growth traits as well as phytochemical and antioxidant contents of *Spiraea* and *Pittosporum* under seaweed extract treatments. *Plant Physiol. Biochem.* **105**, 310–320 (2016).
181. Liatile, P. C., Potgieter, G. & Moloi, M. J. A Natural Bio-Stimulant Consisting of a Mixture of Fish Protein Hydrolysates and Kelp Extract Enhances the Physiological, Biochemical and Growth Responses of Spinach under Different Water Levels. *Plants* **11**, 3374 (2022).

182. Hafez, E. M., Omara, A. E. D., Alhumaydhi, F. A. & El-Esawi, M. A. Minimizing hazard impacts of soil salinity and water stress on wheat plants by soil application of vermicompost and biochar. *Physiol. Plant.* **172**, 587–602 (2021).
183. Santaniello, A. *et al.* Ascophyllum nodosum Seaweed Extract Alleviates Drought Stress in Arabidopsis by Affecting Photosynthetic Performance and Related Gene Expression. *Front. Plant Sci.* **8**, 1362 (2017).
184. Blanchard-Gros, R. *et al.* Comparison of Drought and Heat Resistance Strategies among Six Populations of Solanum chilense and Two Cultivars of Solanum lycopersicum. *Plants* **10**, 1720 (2021).
185. Morales, F. *et al.* Photosynthetic Metabolism under Stressful Growth Conditions as a Bases for Crop Breeding and Yield Improvement. *Plants* **9**, 88 (2020).
186. de Oliveira Maia Júnior, S. *et al.* Osmoregulators' accumulation minimizes the effects of drought stress in sugarcane and contributes to the recovery of photochemical efficiency in photosystem II after rewatering. *Acta Physiol. Plant.* **42**, 62 (2020).
187. Chapin, F. S., Walter, C. H. S. & Clarkson, D. T. Growth response of barley and tomato to nitrogen stress and its control by abscisic acid, water relations and photosynthesis. *Planta* **173**, 352–366 (1988).
188. Zhang, Y. J. *et al.* Effect of water stress on leaf photosynthesis, chlorophyll content, and growth of oriental lily. *Russ. J. Plant Physiol.* **58**, 844–850 (2011).
189. Khaleghi, E., Arzani, K., Moallemi, N. & Barzegar, M. Evaluation of Chlorophyll Content and Chlorophyll Fluorescence Parameters and Relationships between Chlorophyll a, b and Chlorophyll Content Index under Water Stress in Olea europaea cv. 'Dezful'. (2013).
190. Yuan, X. K., Yang, Z. Q., Li, Y. X., Liu, Q. & Han, W. Effects of different levels of water stress on leaf photosynthetic characteristics and antioxidant enzyme activities of greenhouse tomato. *Photosynthetica* **54**, 28–39 (2016).
191. TERZİ, R., SAĞLAM, A., KUTLU, N., NAR, H. & KADIOĞLU, A. Impact of soil drought stress on photochemical efficiency of photosystem II and antioxidant enzyme activities of Phaseolus vulgaris cultivars. *Turk. J. Bot.* **34**, 1–10 (2010).
192. Razavi, F., Pollet, B., Steppe, K. & van Labeke, M. C. Chlorophyll fluorescence as a tool for evaluation of drought stress in strawberry. *Photosynthetica* **46**, 631–633 (2008).
193. Carvalho, M. *et al.* Evaluating stress responses in cowpea under drought stress. *J. Plant Physiol.* **241**, 153001 (2019).
194. Batra, N. G., Sharma, V. & Kumari, N. Drought-induced changes in chlorophyll fluorescence, photosynthetic pigments, and thylakoid membrane proteins of Vigna radiata. *J. Plant Interact.* **9**, 712–721 (2014).
195. Liatile, P. C. Effect of a natural bio-stimulant on the photosynthetic capacity and yield of spinach under drought stress. (2021).
196. Baltazar, M. *et al.* Recent Advances in the Molecular Effects of Biostimulants in Plants: An Overview. *Biomolecules* **11**, 1096 (2021).
197. Farhat, N. *et al.* Effects of magnesium deficiency on photosynthesis and carbohydrate partitioning. *Acta Physiol. Plant.* **38**, 145 (2016).
198. Radzikowska-Kujawska, D., John, P., Piechota, T., Nowicki, M. & Kowalczewski, P. Ł. Response of Winter Wheat (Triticum aestivum L.) to Selected Biostimulants under Drought Conditions. *Agriculture* **13**, 121 (2022).

199. do Rosário Rosa, V. *et al.* Increased soybean tolerance to water deficiency through biostimulant based on fulvic acids and *Ascophyllum nodosum* (L.) seaweed extract. *Plant Physiol. Biochem.* **158**, 228–243 (2021).
200. Benazzouk, S., Djazouli, Z.-E. & Lutts, S. Assessment of the preventive effect of vermicompost on salinity resistance in tomato (*Solanum lycopersicum* cv. Ailsa Craig). *Acta Physiol. Plant.* **40**, 1–11 (2018).
201. Sosnowski, J. *et al.* Effect of *Ecklonia maxima* extract on photosynthesis activity and chlorophyll content of *Medicago × varia* Martyn leaves. *Chil. J. Agric. Res.* **79**, 257–265 (2019).
202. Xu, C. & Mou, B. Vermicompost Affects Soil Properties and Spinach Growth, Physiology, and Nutritional Value. *HortScience* **51**, 847–855 (2016).
203. Kałużewicz, A., Baczek-Kwinta, R., Krzesinski, W., Spizewski, T. & Zaworska, A. Effect of biostimulants on chlorophyll fluorescence parameters of broccoli (*Brassica oleracea* var. Italica) under drought stress and rewatering. *Acta Sci. Pol. Hortorum Cultus* **17**, 97–106 (2018).
204. Campobenedetto, C. *et al.* A Biostimulant Based on Seaweed (*Ascophyllum nodosum* and *Laminaria digitata*) and Yeast Extracts Mitigates Water Stress Effects on Tomato (*Solanum lycopersicum* L.). *Agriculture* **11**, 557 (2021).
205. Xu, C. & Leskovar, D. I. Effects of *A. nodosum* seaweed extracts on spinach growth, physiology and nutrition value under drought stress. *Sci. Hortic.* **183**, 39–47 (2015).
206. Hinojosa-Gómez, J. *et al.* Anthocyanin Induction by Drought Stress in the Calyx of Roselle Cultivars. *Molecules* **25**, 1555 (2020).
207. Lamin-Samu, A. T., Farghal, M., Ali, M. & Lu, G. Morpho-Physiological and Transcriptome Changes in Tomato Anthers of Different Developmental Stages under Drought Stress. *Cells* **10**, 1809 (2021).
208. Ayyat, A. & Abdel-Mola, M. RESPONSE OF TAGETES PATULA PLANTS TO FOLIAR APPLICATION OF POTASSIUM SILICATE AND SEAWEED EXTRACT UNDER VARIOUS IRRIGATION INTERVALS. *Sci. J. Flowers Ornam. Plants* **7**, 513–526 (2020).
209. Hussain, H. I., Kasinadhuni, N. & Arioli, T. The effect of seaweed extract on tomato plant growth, productivity and soil. *J. Appl. Phycol.* **33**, 1305–1314 (2021).
210. Abdul Basit, H., Zuhair, S. A. & Ullah, I. 13. Quality indices of tomato plant as affected by water stress conditions and chitosan application. *Pure Appl. Biol. PAB* **9**, 1364–1375 (2020).
211. Mzibra, A. *et al.* Improving Growth, Yield, and Quality of Tomato Plants (*Solanum lycopersicum* L) by the Application of Moroccan Seaweed-Based Biostimulants under Greenhouse Conditions. *Agronomy* **11**, 1373 (2021).
212. Drought_Stress_and_Plant_Nutrition20160603-21495-1k6asbj-libre.pdf.
213. Halpern, M. *et al.* Chapter Two - The Use of Biostimulants for Enhancing Nutrient Uptake. in *Advances in Agronomy* (ed. Sparks, D. L.) vol. 130 141–174 (Academic Press, 2015).
214. Bigot, S. *et al.* The Halophyte Species *Solanum chilense* Dun. Maintains Its Reproduction despite Sodium Accumulation in Its Floral Organs. *Plants* **11**, 672 (2022).
215. Medyouni, I. *et al.* Effects of water deficit on leaves and fruit quality during the development period in tomato plant. *Food Sci. Nutr.* **9**, 1949–1960 (2021).
216. Boon, J. van der. Influence of K/Ca ratio and drought on physiological disorders in tomato. *Neth. J. Agric. Sci.* **21**, 56–67 (1973).
217. Ors, S. *et al.* Interactive effects of salinity and drought stress on photosynthetic characteristics and physiology of tomato (*Lycopersicon esculentum* L.) seedlings. *South Afr. J. Bot.* **137**, 335–339 (2021).

218. Chen, H. & Jiang, J.-G. Osmotic adjustment and plant adaptation to environmental changes related to drought and salinity. *Environ. Rev.* **18**, 309–319 (2010).
219. Sánchez-Rodríguez, E. *et al.* Study of the ionome and uptake fluxes in cherry tomato plants under moderate water stress conditions. *Plant Soil* **335**, 339–347 (2010).

Annexes

Annexe 1 : Tableau reprenant les caractéristiques physico-chimiques du produit PUR VER® pur, n=3

Paramètres	Résultats
PH	7,23 ± 0,015
Conductivité (mS,cm ⁻¹)	1,12 ± 0,087
Potentiel osmotique (MPa)	-0,056 ± 0,008
Résidus secs (%)	0,46 ± 0,019

Annexe 2 : Résultats des ANOVA 1 sur les Biostimulants dilués aux concentration pulvérisées

Mesure	Valeur d'anova
PH	F = 200652 p-val = < 2,2e-16
Conductivité	F = 4030,8 p-val =5,487e-16
Potentiel osmotique	F = 370 p-val = 8,1e-11
Ca	F = 184,97 p-val = 1,286e-5
Mg	F = 2476,7 p-val = 2e-08
K	F = 38,66 p-val = 0,0005941
Na	F = 1009,2 p-val = 1,882e-7
Fe	F = 49,224 p-val = 0,0003318

Zn	F = 31104 p-val = 3,583e-11
Cu	Chi ² = 7,4182 p-val = 0,1154
C/N	F = 63384 p-val = <2e-16

Annexe 3 : Résultats des ANOVA 2 et test de Kruskal-Wallis (*) des données morphologiques

Mesure	Produit	Arrosage	Arrosage x Produit
Nombre de feuilles 29/03	F = 1,16 p-val = 0,33	F = 0,63 p-val = 0,43	F = 1,58 p-val = 0,20
Nombre de feuilles 01/04	F = 5,12 p-val = 0,00035	F = 0,91 p-val = 0,34339	F = 1,10 p-val = 0,35309
Nombre de feuilles 19/04	F = 1,95 p-val = 0,094	F = 48,49 p-val = 5,2e-10	F = 3,20 p-val = 0,027
Nombre de feuilles 29/04	F = 1,33 p-val = 0,26	F = 24,08 p-val = 4,2e-06	F = 0,48 p-val = 0,70
Nombre de feuilles 16/05	F = 0,27 p-val = 0,924	F = 6,28 p-val = 0,018	F = 0,14 p-val = 0,933
Nombre de feuilles mortes 19/04	F = 1,94 p-val = 0,096	F = 30,67 p-val = 3e-07	F = 1,70 p-val = 0,172
Nombre de feuilles mortes 29/04	F = 3,36 p-val = 0,008	F = 0,95 p-val = 0,333	F = 3,23 p-val = 0,026
Nombre de feuilles mortes 16/05	F = 3,32 p-val = 0,017	F = 4,32 p-val = 0,047	F = 1,10 p-val = 0,363
Nombre de gourmands 29/04	F = 1,78 p-val = 0,13	F = 0,45 p-val = 0,51	F = 1,00 p-val = 0,40
Nombre de gourmands 16/05	F = 1,24 p-val = 0,3149	F = 10,15 p-val = 0,0034	F = 2,18 p-val = 0,1113
Nombre de feuilles infestées 29/04	F = 2,05 p-val = 0,079	F = 2,54 p-val = 0,115	F = 3,02 p-val = 0,034
Nombre de feuilles infestées 16/05	F = 1,98 p-val = 0,11	F = 0,72 p-val = 0,40	F = 2,21 p-val = 0,11
Taille 20/04	F = 1,84 p-val = 0,11	F = 99,21 p-val = 3,5e-16	F = 1,04 p-val = 0,38
Taux de croissance	F = 2,59 p-val = 0,031	F = 54,14 p-val = 8,4e-11	F = 0,93 p-val = 0,428

Poids sec des feuilles	F = 2,02 p-val = 0,118	F = 4,05 p-val = 0,057	F = 0,49 p-val = 0,692
Contenu en eau des feuilles	F = 3,38 p-val = 0,021	F = 12,48 p-val = 0,002	F = 0,41 p-val = 0,751
Poids sec des tiges	F = 1,17 p-val = 0,35	F = 24,94 p-val = 6,1e-05	F = 0,08 p-val = 0,97
Contenu en eau des tiges	F = 3,65 p-val = 0,016	F = 40,34 p-val = 2,7e-06	F = 2,53 p-val = 0,085
Potentiel hydrique	F = 1,95 p-val = 0,094	F = 48,49 p-val = 5,2e-10	F = 3,20 p-val = 0,027
Nombre d'inflos 19/04	F = 1,46 p-val = 0,21	F = 32,03 p-val = 1,8e-07	F = 0,09 p-val = 0,97
Nombre d'inflos 29/04	F = 2,11 p-val = 0,072	F = 6,74 p-val = 0,011	F = 0,05 p-val = 0,984
Nombre d'inflos 16/04	F = 0,86 p-val = 0,52	F = 0,01 p-val = 0,92	F = 0,45 p-val = 0,72
Nombre de fleurs inflo 1 19/04 *	Chi ² = 13 p-val = 0,03	Chi ² = 4,2 p-val = 0,04	Chi ² = 17 p-val = 0,05
Nombre de feuilles entre inflorescences	F = 2,28 p-val = 0,05359	F = 16,36 p-val = 0,00011	F = 0,61 p-val = 0,61070
Nombre de fleurs inflo 1 29/04	F = 1,0349 p-val = 0,4023	F = 0,2653 p-val = 0,6078	F = 0,4990 p-val = 0,6839
Nombre de fleurs inflo 1 16/05	F = 1,76 p-val = 0,15	F = 5,20 p-val = 0,03	F = 1,43 p-val = 0,25
%fleurs en anthèse inflo 1 16/05	F = 3,2659 p-val = 0,0190124	F = 14,4910 p-val = 0,0007039	F = 1,1918 p-val = 0,3308173
%fleurs en anthèse inflo 1 29/04	F = 4,1735 p-val = 0,005854	F = 11,6769 p-val = 0,001954	F = 0,8976 p-val = 0,454720
%fleurs en anthèse inflo 1 19/04	F = 3,4608 p-val = 0,01421	F = 4,1322 p-val = 0,05132	F = 0,6828 p-val = 0,56977
Viabilité pollinique *	Chi ² = 8,9183 p-val = 0,06317	Chi ² = 0,3704 p-val = 0,5428	Chi ² = 9,2065 p-val = 0,1623
Réceptivité stigmatique *	Chi ² = 12,486 p-val = 0,01408	Chi ² = 0,10411 p-val = 0,747	Chi ² = 14,84 p-val = 0,03811

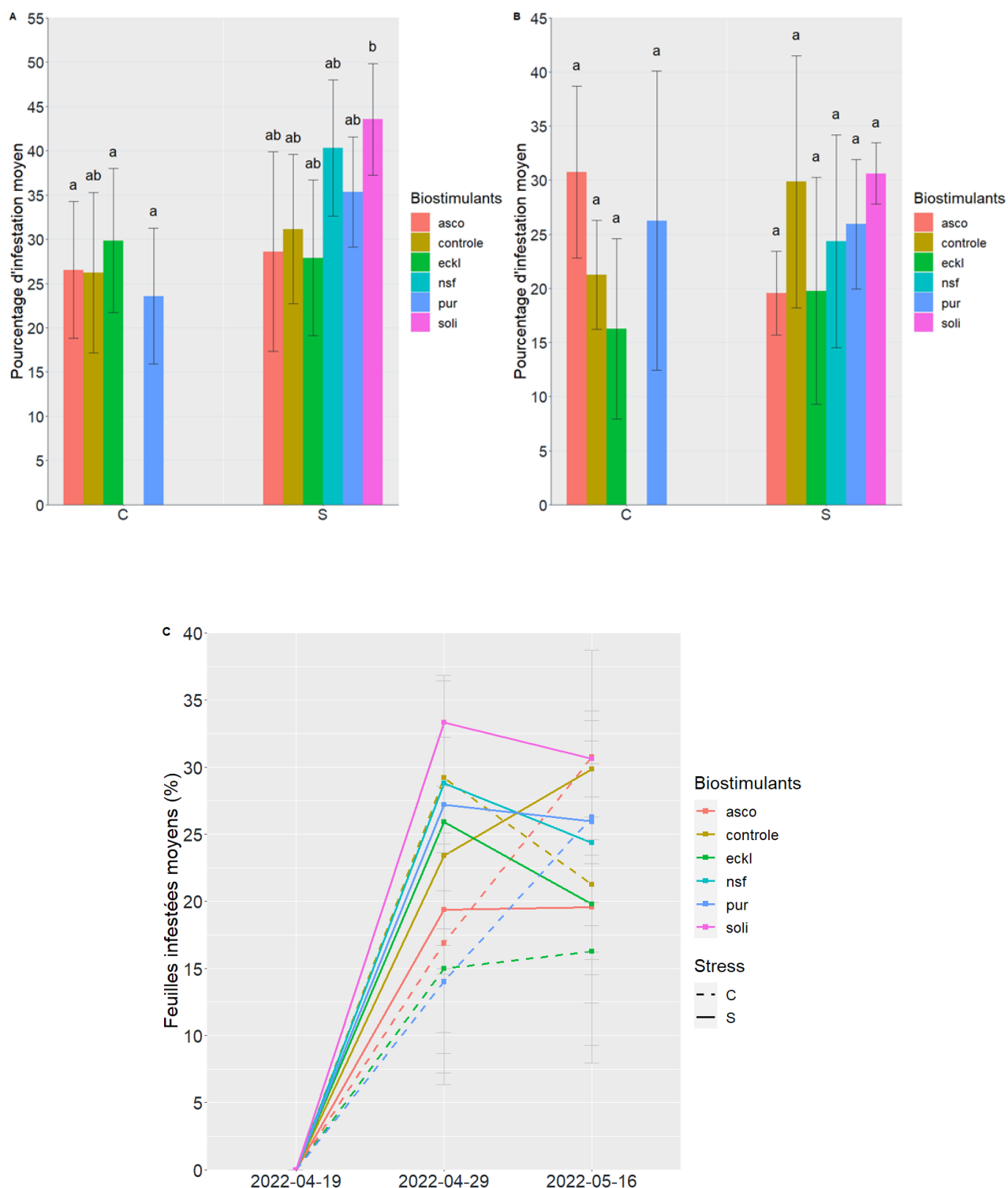
Poids des fruits	F = 2,5761 p-val = 0,03397	F = 19,1266 p-val = 4,236e-05	F = 0,6420 p-val = 0,59061
Circonférence des fruits	F = 2,5620 p-val = 0,034788	F = 16,5322 p-val = 0,000125	F = 1,4668 p-val = 0,231191
pH des fruits	F = 3,0147 p-val = 0,01631	F = 0,7333 p-val = 0,39487	F = 0,4446 p-val = 0,72193
Teneur en sucre des fruits	F = 2,7039 p-val = 0,027883	F = 11,3595 p-val = 0,001267	F = 2,51 p-val = 0,0662

Annexe 4 : Résultats des ANOVA 2 et test de Kruskal-Wallis (*) des mesures physiologiques

Mesure	Produit	Arrosage	Arrosage x Produit
Chlorophylle (dua)	F = 2,47 p-val = 0,038	F = 0,33 p-val = 0,564	F = 1,74 p-val = 0,165
Flavonols (dua)	F = 10,98 p-val = 3e-8	F = 0,53 p-val = 0,47	F = 1,98 p-val = 0,12
Anthocyanes (dua)	F = 5,60 p-val = 0,00016	F = 8,34 p-val = 0,00486	F = 1,48 p-val = 0,22435
Statut azoté (dua)	F = 6,52 p-val = 3,3e-05	F = 0,13 p-val = 0,72	F = 1,71 p-val = 0,17
Potentiel hydrique	F = 11,73 p-val = 2,2e-05	F = 18,00 p-val = 0,0004	F = 0,45 p-val = 0,7179
Chlorophylle (pna)	F = 11,52 p-val = 2,7e-08	F = 52,69 p-val = 2,8e-10	F = 7,81 p-val = 0,00013
Contenu en azote pna	F = 9,06 p-val = 8,7e-07	F = 52,06 p-val = 3,4e-10	F = 7,86 p-val = 0,00012
Conductance stomatique (LI-600) *	Chi ² = 5,459 p-val = 0,3625	Chi ² = 11,374 p-val = 0,0007449	Chi ² = 38,125 p-val = 1,655e-05
Conductance stomatique (Delta-TDevices)	F = 1,33 p-val = 0,30	F = 0,37 p-val = 0,55	F = 0,33 p-val = 0,81
ΦPS2	F = 3,2305 p-val = 0,01186	F = 0,2545 p-val = 0,61577	F = 0,8765 p-val = 0,45834
ETR	F = 4,8694 p-val = 0,00082	F = 40,2932 p-val = 3,021e-08	F = 2,6547 p-val = 0,05640
MDA	F = 0,6549 p-val = 0,6613	F = 0,0002 p-val = 0,9893	F = 1,2687 p-val = 0,3120
Sucres soluble totaux*	Chi ² = 8,0645 p-val = 0,1527	Chi ² = 2,8674 p-val = 0,09039	Chi ² = 12,931 p-val = 0,1657
Ca	F = 5,0133 p-val = 0,0035394	F = 15,2627 p-val = 0,0008117	F = 1,8638 p-val = 0,1666784
Mg	F = 3,1115	F = 4,6517	F = 2,9506

	p-val = 0,02954	p-val = 0,04276	p-val = 0,05620
K	F = 5,0206 p-val = 0,0035131	F = 14,7775 p-val = 0,0009425	F = 4,2148 p-val = 0,0175759
Na	F = 4,9639 p-val = 0,003723	F = 27,3420 p-val = 3,498e-05	F = 1,1447 p-val = 0,354096
Fe*	Chi ² = 9,3247 p-val = 0,09679	Chi ² = 1,3065 p-val = 0,253	Chi ² = 12,449 p-val = 0,1891
Zn	F = 22,0554 p-val = 1,049e-07	F = 2,5034 p-val = 0,1285	F = 2,1623 p-val = 0,1227
Cu*	Chi ² = 14,836 p-val = 0,01109	Chi ² = 0 p-val = 1	Chi ² = 16,991 p-val = 0,04886

Annexe 5 : A,B Pourcentage de feuilles infestées le 29/04 (A) et 16/05 (B). n=10 (A) n=4 (B)
Les valeurs avec des lettres différentes sont statistiquement différentes (p-value < 0.05). C
Graphiques traçant l'évolution du pourcentage de feuilles infestées sur les plantes



Annexe 6 : A, B, C Pourcentage de feuilles observées à partir de la 3e prise de mesures (24 jours après application du stress). n=10 (A,B) et n=4 (C)
Les valeurs avec des lettres différentes sont statistiquement différentes (p-value < 0.05).

différentes sont statistiquement différentes ($p\text{-value} < 0.05$). D Graphique traçant l'évolution du pourcentage de feuilles mortes.

