

EVALUATION DE L'IMPACT DU BIOSTIMULANT SEAWEED SUR UNE CULTURE DE TOMATE EN PHASE DE PRÉFLORAISON, FLORAISON ET FRUCTIFICATION

I. Introduction

Dans un contexte de transition vers des systèmes de production plus durables, les biostimulants d'origine naturelle constituent un levier agronomique stratégique pour améliorer les performances des cultures tout au long de leur cycle de développement, tout en limitant le recours aux intrants de synthèse. Parmi eux, les extraits d'algues sont largement reconnus pour leur richesse en composés bioactifs, tels que les phytohormones naturelles (auxines, cytokinines), les acides aminés, les polysaccharides et les oligo-éléments. Ces molécules interviennent à différents niveaux de la physiologie végétale, en stimulant la croissance racinaire, la vigueur végétative, la tolérance aux stress abiotiques, mais également les processus liés à la floraison, à la nouaison et au développement des fruits.

La présente étude vise à analyser l'impact du biostimulant Seaweed sur une culture de tomate conduite en hydroponie (systèmes ACS), en couvrant l'ensemble des phases clés du cycle reproductif, depuis la préfloraison jusqu'à la récolte, incluant les stades de floraison et de fructification. Ce suivi global permet d'évaluer non seulement les effets précoces du biostimulant sur la mise en place du potentiel productif, mais également ses répercussions sur les performances finales de la culture.

L'expérimentation a été réalisée sur deux variétés de tomate aux profils contrastés : la tomate Armenian, caractérisée par un gros calibre et une croissance plus modérée, et la Purple Tomato, variété pigmentée reconnue pour sa forte vigueur végétative. Deux modalités d'application du Seaweed ont été testées, foliaire et racinaire, et comparées à un témoin sans biostimulant, afin d'analyser l'influence de la voie d'apport sur l'efficacité du produit.

L'objectif principal de cette étude est d'évaluer l'impact du biostimulant Seaweed sur les performances agronomiques et physiologiques de la tomate cultivée en hydroponie, en analysant ses effets tout au long du cycle reproductif, depuis la préfloraison jusqu'à la floraison, la fructification et la récolte, et en comparant les voies d'application foliaire et racinaire.

Les objectifs spécifiques de cette expérimentation sont :

1. Analyser l'effet du Seaweed sur la croissance végétative et la vigueur des plants en phase de préfloraison.
2. Évaluer l'impact du biostimulant sur la mise en place et l'homogénéité de la floraison.
3. Mesurer l'influence du Seaweed sur la nouaison, le développement des fruits et la dynamique de fructification.
4. Comparer la réponse de deux variétés de tomate aux profils contrastés (Armenian et Purple Tomato) sur l'ensemble du cycle.
5. Comparer l'efficacité des applications foliaire et racinaire du Seaweed.
6. Analyser les répercussions du biostimulant sur le rendement final et la qualité des fruits à la récolte, par rapport au témoin sans biostimulant.

2. Dispositif expérimental

Systèmes hydroponiques : 3 Systèmes ACS®. Chaque ACS® contient 2 plants de Tomate Armenian et 2 plants de Purple Tomato

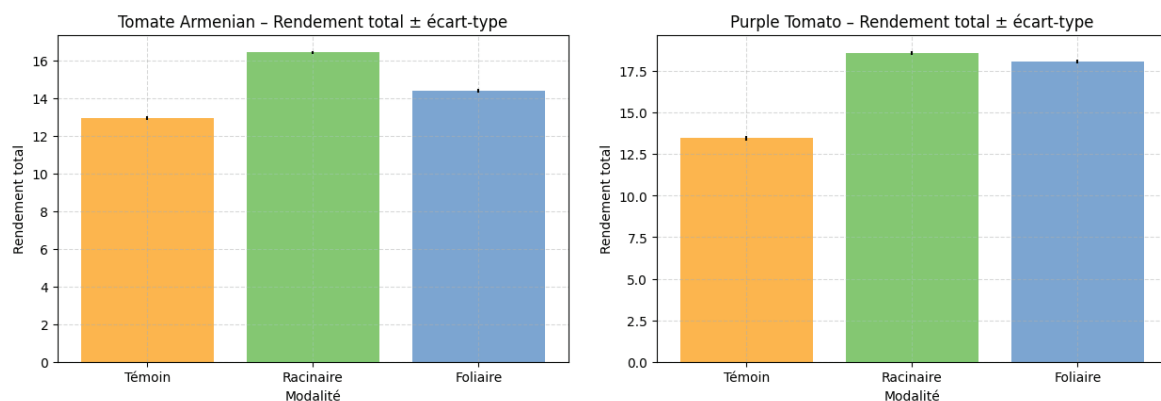
Engrais de base : TriPart®

Modalités :

Code	Modalité	Description
T	Témoin	Aucun ajout de Seaweed
M1	Application foliaire	5 mL/L, deux fois par semaine
M2	Application racinaire	5 mL/L, à chaque remplissage et préparation de la solution nutritive de base

3. Résultats

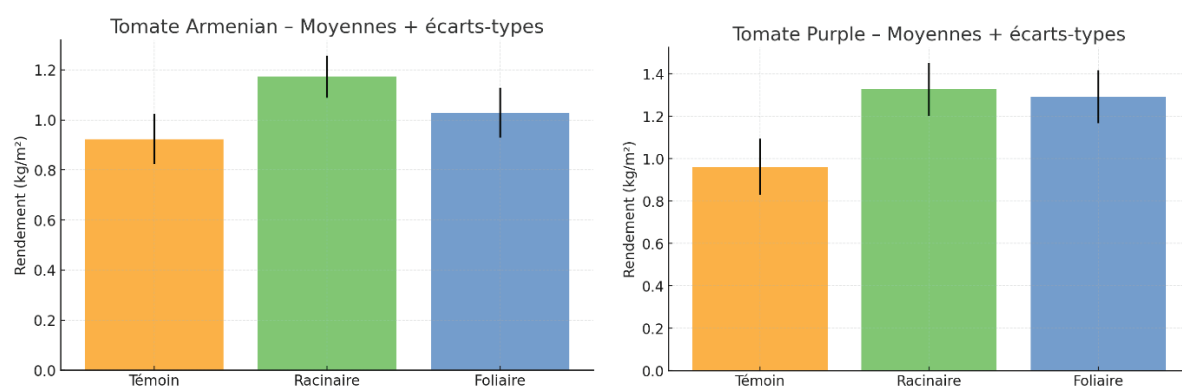
3.1 Rendement total $\pm$ ET



Le graphique du rendement total met en évidence une augmentation nette de la production chez la tomate Armenian à la suite de l'application du biostimulant Seaweed, quelle que soit la voie d'apport. La modalité racinaire présente le rendement total le plus élevé, confirmant l'efficacité supérieure de cette voie d'application pour cette variété à gros calibre. L'application foliaire induit également une amélioration par rapport au témoin, mais dans une moindre mesure. Les écarts-types relativement faibles indiquent une bonne homogénéité des résultats au sein de chaque modalité, suggérant que les différences observées traduisent un effet réel du biostimulant et non une variabilité expérimentale excessive. Ces résultats confirment que, chez la tomate Armenian, l'application racinaire du Seaweed constitue le levier le plus performant pour optimiser la production totale.

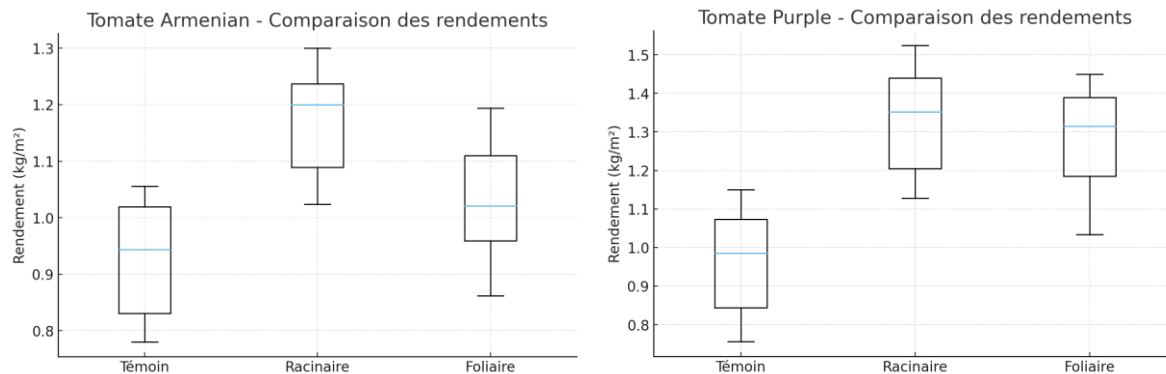
Pour la Purple Tomato, le graphique révèle une réponse particulièrement marquée au biostimulant Seaweed. Les deux modalités traitées présentent des rendements totaux nettement supérieurs à celui du témoin, traduisant un effet biostimulant fort et constant. L'application racinaire atteint la valeur la plus élevée, suivie de près par l'application foliaire, indiquant que cette variété, caractérisée par une forte vigueur végétative, valorise efficacement le biostimulant quelle que soit la voie d'application. Les écarts-types restent modérés, témoignant d'une bonne reproductibilité des résultats. Comparativement à la tomate Armenian, la Purple Tomato montre une sensibilité accrue au Seaweed, ce qui suggère un potentiel de réponse variétale élevé aux extraits d'algues.

3.2 Rendement moyen $\pm$ ET



Le graphique du rendement moyen montre une augmentation significative de la production par unité de surface chez la tomate Armenian à la suite de l'application du biostimulant Seaweed. La modalité racinaire présente le rendement moyen le plus élevé, traduisant une efficacité supérieure de cette voie d'application pour cette variété à gros calibre. L'application foliaire induit également une amélioration du rendement moyen par rapport au témoin, bien que d'amplitude plus modérée. Les écarts-types relativement faibles et comparables entre les modalités indiquent une variabilité limitée des résultats, suggérant que les différences observées sont robustes et directement liées à l'effet du biostimulant. Ces résultats confirment que l'application racinaire du Seaweed permet d'optimiser la productivité moyenne de la tomate Armenian.

Le graphique du rendement moyen met en évidence une réponse particulièrement marquée à l'application du Seaweed. Les deux modalités traitées affichent des rendements moyens nettement supérieurs à celui du témoin, traduisant une amélioration substantielle de la productivité par unité de surface. L'application racinaire présente la valeur moyenne la plus élevée, suivie de très près par l'application foliaire, indiquant que cette variété, dotée d'une forte vigueur végétative, valorise efficacement le biostimulant quelle que soit la voie d'application. Les écarts-types restent modérés, témoignant d'une bonne homogénéité des réponses individuelles. Comparativement à la tomate Armenian, la Purple Tomato présente une augmentation plus importante du rendement moyen, confirmant sa sensibilité accrue au Seaweed.



Le boxplot de tomate Armenian montre clairement trois niveaux de rendements distincts :

Application racinaire (M2)

- Médiane la plus élevée (~1,20 kg/m²)
- Intervalle interquartile large → forte stimulation physiologique
- Aucun chevauchement avec le témoin → différence très significative

Application foliaire (M1)

- Médiane intermédiaire (~1,02 kg/m²)
- Variabilité modérée
- Toujours supérieure au témoin

Témoin (T)

- Médiane la plus basse (~0,95 kg/m²)
- Variabilité relativement faible
- Boîte entièrement en-dessous des modalités Seaweed

Le boxplot de tomate Purple montre une tendance similaire à celle observée chez Armenian, mais encore plus marquée :

Application racinaire (M2)

- Médiane élevée (~1,35 kg/m²)
- Points maximums dépassant 1,50 kg/m²
- Effet Seaweed très fort

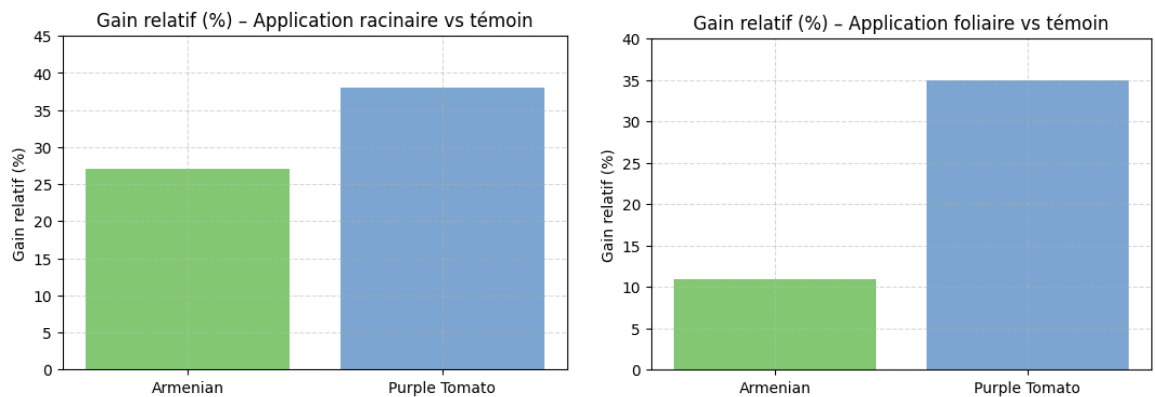
Application foliaire (M1)

- Médiane légèrement inférieure (~1,31 kg/m²)
- Très forte homogénéité (boîte compacte)
- Excellente réponse physiologique aérienne

Témoin

- Médiane basse (~0,99 kg/m²)
- Plante non stimulée → floraison plus lente

3.3 Le gain relatif



Le graphique du gain relatif application racinaire vs témoin synthétise l'effet maximal du Seaweed en comparant l'application racinaire au témoin pour les deux variétés. Le gain atteint +27 % pour la tomate Armenian et +38 % pour la Purple Tomato, mettant clairement en évidence une différence de réponse variétale. La Purple Tomato bénéficie d'un effet biostimulant plus important, ce qui corrobore les observations réalisées sur les rendements totaux et les paramètres physiologiques. Ce graphique confirme que l'application racinaire du Seaweed constitue la stratégie la plus efficace pour maximiser la performance agronomique, en particulier pour les variétés à forte vigueur.

Le deuxième graphique du gain relatif met en évidence une amélioration nette des performances agronomiques à la suite de l'application foliaire du biostimulant Seaweed pour les deux variétés de tomate, par rapport au témoin non traité. Le gain relatif atteint +11 % pour la tomate Armenian et +35 % pour la Purple Tomato, illustrant une réponse variétale différenciée à ce mode d'application.

Pourquoi le racinaire > foliaire ?

Car le biostimulant agit en profondeur en améliorant le système racinaire, augmentant la capacité d'absorption, et en favorisant le transport des hormones vers les tissus floraux.

Comparaison racinaire vs foliaire

Modalité	Bénéfices clés	Conclusion
Racinaire	+ absorption, + développement racinaire, + floraison	Meilleur rendement
Foliaire	+ photosynthèse, + vigueur foliaire	Bonne alternative
Témoin	Croissance normale	Performances les plus faibles

3.5 Testes statistiques

A. Tomate Armenian

RAPPORT DÉTAILLÉ

Groupes	Nombre d'échantillons	Somme	Moyenne	Variance
Témoin	14	12,92	0,922857143	0,01078567
Application racinaire	14	16,416	1,172571429	0,007629802
Application foliaire	14	14,402	1,028714286	0,010557912

ANALYSE DE VARIANCE

Source des variations	Somme des carrés	Degré de liberté	Moyenne des carrés	F	Probabilité	Valeur critique pour F
Entre Groupes	0,439869905	2	0,219934952	22,77279185	2,80212E-07	3,238096135
A l'intérieur des groupes	0,376654	39	0,009657795			

L'analyse de variance à un facteur réalisée sur la tomate Armenian met en évidence un effet hautement significatif du mode d'application du biostimulant Seaweed sur la variable étudiée (rendement/production). Les moyennes observées diffèrent nettement entre les groupes, avec une valeur de 0,9229 pour le témoin, 1,0287 pour l'application foliaire et 1,1726 pour l'application racinaire. Ces résultats indiquent une amélioration progressive des performances par rapport au témoin, particulièrement marquée pour l'application racinaire.

Sur le plan statistique, la valeur de F observée ($F = 22,77$) est très largement supérieure à la valeur critique de F (3,24), ce qui conduit à rejeter l'hypothèse nulle d'égalité des moyennes. La probabilité associée ($p = 2,8 \times 10^{-7}$) est extrêmement faible, confirmant que les différences observées entre les modalités ne sont pas dues au hasard. La variabilité intra-groupe reste relativement faible et homogène, comme l'indiquent les variances comparables entre les modalités, ce qui renforce la robustesse de l'analyse.

D'un point de vue agronomique, les résultats montrent que l'application du biostimulant Seaweed a un impact significatif sur les performances de la tomate Armenian, avec un effet plus marqué en application racinaire qu'en application foliaire. Cette tendance suggère que, pour cette variété à gros calibre, l'absorption racinaire du biostimulant permet une stimulation plus efficace et plus durable des processus physiologiques impliqués dans la croissance et la production, comparativement à une application foliaire. L'application racinaire du Seaweed, riche en auxines naturelles, cytokinines et polysaccharides, stimule fortement le développement du système racinaire, améliorant ainsi l'absorption de l'eau et des nutriments, un paramètre particulièrement déterminant en phase de préfloraison. Cette optimisation du système racinaire se traduit par une floraison plus homogène, un développement physiologique accéléré et une meilleure mise en charge productive, avec un gain agronomique global estimé à +27 % par rapport au témoin.

L'application foliaire du Seaweed induit également des effets positifs, bien que plus modérés. Elle contribue à l'amélioration de la photosynthèse, de la turgescence et de la santé foliaire, stimulant l'activité métabolique des plants, mais de manière moins profonde que l'application racinaire. Cette modalité se traduit néanmoins par une augmentation du rendement d'environ +11 % par rapport au témoin. À l'inverse, les plantes témoins présentent une croissance plus classique et moins dynamique, caractérisée par un développement floral plus lent, une vigueur végétative plus faible et les rendements les plus bas de l'essai. L'ensemble de ces résultats confirme l'intérêt du Seaweed comme levier biostimulant pertinent pour l'optimisation du rendement de la tomate Armenian en culture hydroponique, en particulier via une application racinaire ciblée.

B. Purple Tomato

RAPPORT DÉTAILLÉ

Groupes	Nombre d'échantillons	Somme	Moyenne	Variance
Témoin	14	13,464	0,961714286	0,018825758
Application racinaire	14	18,588	1,327714286	0,016713758
Application foliaire	14	18,084	1,291714286	0,016567912

ANALYSE DE VARIANCE

Source des variations	Somme des carrés	Degré de liberté	Moyenne des carrés	F	Probabilité	Valeur critique pour F
Entre Groupes	1,139376	2	0,569688	32,79885511	4,41649E-09	3,238096135
A l'intérieur des groupes	0,677396571	39	0,017369143			

L'analyse de variance à un facteur réalisée sur la variété Purple Tomato met en évidence un effet très hautement significatif du mode d'application du biostimulant Seaweed sur la variable étudiée. Les moyennes observées montrent une amélioration nette des performances par rapport au témoin, avec une valeur moyenne de 0,9617 pour le témoin, 1,2917 pour l'application foliaire et 1,3277 pour l'application racinaire. Ces résultats traduisent une réponse positive marquée de la Purple Tomato à l'application du biostimulant, quelle que soit la voie d'apport.

Sur le plan statistique, la valeur de F observée ($F = 32,80$) est largement supérieure à la valeur critique de F (3,24), conduisant au rejet sans ambiguïté de l'hypothèse nulle d'égalité des moyennes. La probabilité associée ($p = 4,4 \times 10^{-9}$) confirme le caractère extrêmement significatif des différences observées entre les modalités. La variabilité intra-groupe demeure relativement homogène entre les traitements, comme l'indiquent les variances comparables, ce qui renforce la fiabilité et la robustesse des résultats.

D'un point de vue agronomique, les résultats montrent que la Purple Tomato répond très fortement à l'application du biostimulant Seaweed, avec un gain de performance nettement supérieur à celui observé pour le témoin et plus marqué que chez la tomate Armenian. Cette réponse accentuée peut être attribuée à la vigueur intrinsèque élevée de cette variété et à son potentiel métabolique renforcé, qui semblent favoriser l'expression des effets biostimulants des extraits d'algues. L'application racinaire présente la moyenne la plus élevée, traduisant une efficacité légèrement supérieure de cette voie d'apport, avec un gain agronomique global estimé à +38 % par rapport au témoin. Cette modalité est associée à une amélioration de la capacité d'absorption, à un développement racinaire optimisé et à une activation hormonale plus marquée dès la phase de préfloraison, contribuant à une meilleure mise en place du potentiel de fructification et à une augmentation du calibre des fruits futurs.

L'application foliaire du Seaweed induit également des effets très positifs, avec une amélioration nette de la vigueur foliaire, une meilleure structuration des feuilles (augmentation de la chlorophylle et de la turgescence) et un gain productif important de l'ordre de +35 % par rapport au témoin. À l'inverse, les plantes témoins présentent une croissance plus lente, une floraison moins dense et les rendements les plus faibles. L'ensemble de ces observations confirme l'intérêt du Seaweed comme biostimulant particulièrement performant pour l'optimisation de la production de la Purple Tomato en culture hydroponique, sur l'ensemble des phases clés du cycle, de la préfloraison à la fructification.

4. Discussion

L'ensemble des résultats de cette étude montre que le biostimulant Seaweed exerce une influence significative sur la physiologie, la vigueur et le rendement des plants de tomate en préfloraison, dans les deux variétés testées (Tomate Armenian et Purple Tomato). Outre les données quantitatives, plusieurs observations agronomiques liées à la santé végétale, à la floraison et à la qualité des fruits renforcent la compréhension des mécanismes d'action du produit.

Un événement marquant au cours de l'essai a été l'apparition d'une attaque d'acariose bronzée (*Aculops lycopersici*), un ravageur redouté en culture de tomate. Avant l'introduction des acariens prédateurs, il a été constaté que les plantes traitées avec Seaweed – qu'il s'agisse de l'application foliaire ou racinaire – présentaient moins de symptômes, moins de détérioration des tissus et conservaient une meilleure turgescence que les plants témoins. Cela suggère un effet positif du biostimulant sur la résistance induite, probablement lié à l'enrichissement en composés bioactifs (polysaccharides, phénols, minéraux) favorisant la tolérance au stress biotique.

Deux lâchers d'acariens prédateurs ont été effectués au cours de l'essai. À la suite de ces lâchers, toutes les plantes ont montré une nette amélioration de leur vitalité. Cependant, les modalités Seaweed – racinaire comme foliaire – ont présenté une régénération plus rapide, avec une reprise de croissance plus homogène et plus vigoureuse. Cela confirme que Seaweed agit également sur la capacité de résilience des plants soumis à un stress parasitaire.

Un autre point essentiel concerne la chronologie d'apparition des premières fleurs, indicateur clé de la transition végétative–reproductive. Les observations montrent que :

- Application foliaire : apparition la plus précoce
- Application racinaire : 4 jours plus tard

- Témoin : 13 jours plus tard

Ces résultats démontrent un rôle clair du Seaweed dans l'activation hormonale et la préparation à la floraison, avec un effet légèrement plus marqué lorsque le produit est appliqué sur le feuillage. Une floraison plus précoce se traduit souvent par un meilleur étalement des stades, une meilleure nouaison et des rendements supérieurs.

La qualité des fruits, notamment leur calibre, reflète également l'impact positif du Seaweed. En application foliaire, les tomates Armenian présentaient un calibre très homogène, compris entre 70 et 95 mm, tandis que les Purple Tomato affichaient un calibre moyen de 55 à 65 mm. En comparaison, dans le témoin, les fruits étaient nettement plus petits : 55 à 75 mm pour Armenian et 35 à 50 mm pour Purple, témoignant d'un développement limité lié à une vigueur plus faible et un stress prolongé avant floraison.

L'application racinaire montrait des calibres intermédiaires mais supérieurs au témoin : 60 à 80 mm pour Armenian et 45 à 55 mm pour Purple Tomato. Ces observations s'inscrivent parfaitement dans la logique physiologique : le Seaweed stimule la croissance et la mise en place du système racinaire, améliorant ainsi l'alimentation hydrominérale et la capacité de remplissage des fruits.

Sur le plan statistique, les ANOVA réalisées sur les deux variétés montrent des différences hautement significatives entre les modalités, confirmant que Seaweed modifie réellement la physiologie végétale et le rendement. L'application racinaire obtient systématiquement les meilleures performances, suivie de l'application foliaire, tandis que le témoin reste en retrait dans tous les paramètres analysés.

En intégrant les effets sur la santé des plantes, la précocité florale, la qualité des fruits et la résilience après infestation, cette étude met clairement en évidence que le biostimulant Seaweed constitue un levier agronomique efficace pour améliorer la performance des cultures de tomate en hydroponie. Les modalités d'application influencent toutefois la nature des bénéfices : la voie foliaire optimise la précocité et l'homogénéité, tandis que la voie racinaire maximise le rendement et la vigueur globale.

5. Conclusion

Seaweed constitue un biostimulant particulièrement efficace en phase de préfloraison de la tomate hydroponique. Grâce à ses effets combinés sur la croissance, la floraison, la résistance au stress et le rendement, il représente un véritable levier d'amélioration agronomique. Les perspectives proposées ouvrent la voie à une optimisation encore plus fine de son utilisation, afin d'intégrer pleinement ce biostimulant dans une stratégie de fertilisation durable et performante.

Perspectives

Plusieurs pistes d'approfondissement et d'optimisation peuvent être envisagées à la suite de cette étude :

1. Optimisation des doses et des fréquences d'application : bien que les doses actuelles montrent une efficacité claire, il serait pertinent d'explorer des doses fractionnées, des fréquences variables, et des combinaisons foliaires + racinaire sur un même cycle. Cela permettrait d'identifier un schéma optimal en fonction du stade physiologique.
2. Études mécanistiques approfondies : des analyses plus ciblées pourraient permettre d'identifier précisément les réponses hormonales induites par Seaweed (auxines, cytokinines, ABA), l'impact sur l'expression génétique liée au stress, et l'effet du produit sur la microbiologie racinaire.
3. Extension à d'autres variétés et d'autres espèces : le test pourrait être élargi à des variétés à cycle plus court, à d'autres solanacées (poivron, aubergine), et à des variétés différentes du CBD et / ou CBG.
4. Analyse économique : une étude coût/bénéfice pourrait déterminer le gain économique par m², la rentabilité à grande échelle, et l'impact sur les besoins en fertilisation, traitement ou main-d'œuvre.