



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
جامعة عبد الحميد بن باديس مستغانم
كلية العلوم الطبيعية والحياة



République Algérienne Démocratique et populaire
Ministère De L'enseignement Supérieur Et De La Recherche Scientifique
Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem
Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie
Département d'Agronomie

MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Spécialité : Production végétale

Thème :

**Effet biostimulants sur la croissance et la physiologie du poivron
(*Capsicum annum L.*) cultivé sous serre.**

Présent par :

BRAHIMI Sihame

Devant le Jury

Président	Mme HAMZA Houaria	MCB	UAB Mostaganem
Examineur	Meliani Hadj Ahmed	MAA	UAB Mostaganem
Encadreur	Arbaoui Mohamed	MCA	UAB Mostaganem
Co-Encadreur	Ghelamallah Amine	MCA	UAB Mostaganem

Année universitaire: 2025-2026

Remerciement

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à toutes les personnes qui ont contribué,
de près ou de loin, à la réalisation de ce travail.

En premier lieu, mes sincères remerciements vont à mon encadrant, **Dr. Arbaoui Mohamed**, pour son accompagnement constant, ses précieux conseils et la qualité de son suivi scientifique. Sa disponibilité et son exigence ont été pour moi une source d'inspiration et de rigueur.

Je souhaite également remercier mon Co-encadrant, **Dr. Ghelamallah Amine**, pour son soutien, ses orientations pertinentes et son aide précieuse tout au long de ce projet.

Mes remerciements s'adressent aussi à **Dr. Hamza Houaria**, Présidente du jury, pour l'honneur qu'elle m'a fait en acceptant d'évaluer ce travail, ainsi que pour ses remarques constructives.

Enfin, j'exprime toute ma reconnaissance à **Dr. Meliani Haj Ahmed**, examinateur, pour l'attention portée à ce mémoire et pour ses observations enrichissantes qui contribueront à l'amélioration de mes recherches futures.

Nos remerciements s'adressent également aux agents de la ferme de **Mazagran** et du **laboratoire** pour leur aide, leur disponibilité et leur engagement essentiels à la réussite de cette expérimentation.

Nous exprimons aussi notre gratitude envers nos professeurs, qui nous ont conseillés et guidés avec leur savoir et leur vertu. Ils ont fait tout ce qui était en leur pouvoir pour nous accompagner dans notre parcours académique. Qu'Allah les récompense généreusement pour leurs efforts et leur dévouement.

À travers ces lignes, je souhaite témoigner de mon respect et de ma gratitude envers l'ensemble du jury d'évaluation, ainsi que toutes les personnes qui ont participé à la réussite de ce mémoire.



Dédicaces

Je dédie ce travail à mes chers **parents**, pour leur amour inconditionnel, leurs sacrifices et leurs prières qui m'ont accompagné à chaque étape de ma vie.

À mon **frère**, pour son soutien et sa présence rassurante.

À mes **sœurs**, pour leur affection, leurs encouragements et leur confiance qui m'ont toujours donné la force d'avancer.

Je dédie ce travail humble avec une profonde reconnaissance et une sincère affection

Résumé

Cette étude a montré que l'application de deux biostimulants influence positivement la croissance, la physiologie et le rendement du poivron (*Capsicum annum* L.) Cultivé sous serre. Les résultats ont mis en évidence un effet différencié selon le traitement : P1 (NANO ENERGY) a davantage stimulé la croissance végétative et l'état hydrique, tandis que P2 (mxim50) a amélioré le calibre, le poids des fruits et le rendement final. Ces observations confirment l'intérêt des biostimulants comme moyen efficace pour optimiser la production du poivron en culture protégée.

Mots clés : Biostimulants, poivron, *Capsicum annuum*, croissance, physiologie, rendement, serre

Abstract

This study showed that the application of two biostimulants positively affected the growth, physiology, and yield of greenhouse-grown pepper (*Capsicum annum* L.) The results revealed a treatment-dependent response: P1 (NANO ENERGY) mainly enhanced vegetative growth and water status, while P2 (maxim50) improved fruit size, fruit weight, and final yield. These findings confirm the value of biostimulants as an effective tool for optimizing pepper production under protected cultivation.

Key words: Biostimulants, pepper, *Capsicum annum*, growth, physiology, yield, greenhouse

ملخص

أظهرت هذه الدراسة أن استعمال محفزين حيويين له تأثير إيجابي على نمو الفلفل الحلو (*Capsicum annuum* L.) وخصائصه الفسيولوجية وإنتاجيته تحت الظروف المحمية. وقد بيّنت النتائج اختلاف التأثير حسب المعاملة؛ إذ ساهم P1 (NANO ENERGY) بشكل أكبر في تحسين النمو الخضري والحالة المائية للنبات، بينما حسّن P2 (maXim50) حجم الثمار ووزنها والمردود النهائي. وتؤكد هذه النتائج أهمية المحفزات الحيوية كوسيلة فعالة لتحسين إنتاج الفلفل في الزراعة المحمية.

الكلمات المفتاحية : المحفزات الحيوية، الفلفل الحلو، النمو، الفسيولوجيا، المردود، البيت البلاستيكي

SOMMAIRE

Remerciements	2
Dédicaces	3
SOMMAIRE	7
Abréviation	11
Liste des figures	12
Liste des tableaux	14
Introduction :	1
Première partie : Étude bibliographique	3
Chapitre 1.Étude de la culture du poivron	4
1. Généralités sur le poivron	4
1.1. Origine	4
1.2. Classification botanique	4
1.3. Caractères physiologiques et botaniques	5
1.3.1. Appareil végétatif	5
1.3.2. Variétés	7
1.5. Stades phénologiques	8
2. Importance économique de la culture du poivron	8
2.1. Dans le monde	8
2.2. En Algérie	9
2.3. A Mostaganem	10
2.4. Exigences pédoclimatiques	11
2.5. Température	11
2.6. Lumière	11
2.7. Humidité	11
2.8. Sol et ph	12
2.9. Besoins Eau	12
2.10. Fertilisation	13
4. Maladies et ravageurs	13
4.1. Maladies cryptogamiques	13
4.2. Maladies bactériennes	15
4.3. Maladies virales	15
4.4. Ravageurs du poivron	16
Chapitre 2. Étude des biostimulants.	20

.1 Évolution du concept	20
1.1. Historique	20
1.2. Définition	20
1.2.1. Spécificité	21
1.3. Classification des biostimulants	21
.1.3.1 Les Bio stimulants Non-Microbiens	22
2. Composition chimique	23
2. Méthodes d'application des bios stimulants	24
3.2. Application au sol des biostimulants	25
3.3. Traitement des semences avec biostimulants	25
4. Effets sur les Traits Morpho-Anatomiques, Biochimiques et Physiologiques	26
5. Impact sur les Traits de Qualité et la Valeur Nutritionnelle	26
Chapitre III : Mécanismes d'action des biostimulants	27
1. Classification générale des mécanismes d'action des biostimulants	27
1.1. Mécanismes directs sur la plante	27
1.2. Mécanismes indirects via la rhizosphère et le microbiote	27
2. Effets des biostimulants sur le système racinaire	28
2.1. Stimulation de la croissance et du développement racinaire	28
2.2. Amélioration de la surface d'absorption racinaire	28
2.3. Interaction entre l'architecture racinaire et l'efficacité nutritionnelle	28
3. Rôle des biostimulants dans l'absorption et l'utilisation des éléments nutritifs	29
3.1. Effet sur la disponibilité des macroéléments	30
3.2. Effet sur les oligo-éléments et sur la fertilité biologique du substrat	30
4. Régulation des hormones végétales par les biostimulants	30
4.1. Action sur les auxines et la formation racinaire	30
4.2. Action sur les cytokinines, gibbérellines et acide abscissique	30
4.3. Implication dans la floraison, la fructification et la tolérance au stress	30
5. Amélioration de la photosynthèse et des fonctions physiologiques	31
5.1. Effet sur l'activité photosynthétique	31
5.2. Influence sur la conductance stomatique et la transpiration	31
6. Renforcement des défenses et de la tolérance au stress	31
6.1. Activation des systèmes antioxydants	31
6.2. Rôle des prolines, sucres solubles et osmoprotecteurs	32
6.3. Atténuation des effets du stress abiotique	32

7.	Effets sur la qualité et la composition des fruits de poivron	32
7.1.	Modification de la teneur en sucres, vitamine C et caroténoïdes	32
7.2.	Amélioration de la couleur, la fermeté et la conservation post récolte	32
7.3.	Influence sur le calibre et le rendement commercial	32
8.	Modulation du microbiote racinaire et interactions avec le substrat	33
8.1.	Promotion des microorganismes bénéfiques (PGPR, champignons mycorrhiziens)	33
9.	Impact sur la fertilité biologique et la protection contre les pathogènes	33
10.	Modèle intégré des mécanismes d'action des biostimulants	33
10.1.	Modélisation des voies de signalisation	33
10.2.	Liens entre mécanismes et paramètres mesurés sur le poivron	33
11.	Synthèse et hypothèses de recherche	34
11.1.	Formulation des hypothèses liées à l'expérimentation sur le poivron	34
12.	Effet des biostimulants sur la nutrition végétale	34
13.	Gestion intégrée des nutriments (INM) et synergie des biostimulants	35
Deuxième partie : Étude expérimentale		37
Deuxième partie : Étude expérimentale		38
1.	Objectif de l'essai	38
2.	Zone d'étude	38
3.	Matériel et méthodes	38
3.1.	Matériel végétal	38
3.2.	Conditions expérimentales	39
3.2.1.	Produits utilisés	39
3.2.2.	Protocole d'application	41
3.3.	Dispositif expérimental	42
3.3.1.	Choix du dispositif	42
3.3.2.	Densité de plantation	42
3.3.3.	Conduite de la culture	43
3.4.	Paramètres mesurés	46
3.4.1.	Paramètres morphologiques	46
3.4.2.	Paramètres physiologiques	47
3.4.3.	Paramètres du rendement	49
4.	Analyse des données	50
1.	Paramètres morphologiques	51

1.1.	Longueur de la tige	51
1.2.	Longueur de la racine	51
1.3.	Nombre de fruits par plant	53
1.4.	Nombre de feuilles	53
2.	Paramètres physiologiques	54
2.1.	Teneur en eau racinaire	54
2.2.	Détermination du taux de chlorophylles	55
2.2.1.	Chlorophylle A	55
2.2.2.	Chlorophylle B	56
2.2.3.	Chlorophylle T	57
2.2.4.	Chlorophylle A/B :	58
4.	Paramètres du rendement	60
4.1.	Calibre	60
4.2.	Poids de fruits	61
5.	Rendement par plant	62
6.	Rendement total	63
	Discussion	64
	Conclusion	68
	Références bibliographiques	69

Abréviation

BBCH : *Biologische Bundesanstalt, Bundessortenamt und CHemische Industrie* (Échelle phénologique universelle)

BBWY : *Broad Bean Wilt Virus* (Virus du flétrissement de la fève)

CMA / AMF : Champignons Mycorhiziens à Arbuscules / *Arbuscular Mycorrhizal Fungi*

CMV : *Cucumber Mosaic Virus* (Virus de la mosaïque du concombre)

DAI : *Days After Inoculation* (Jours après inoculation)

DI : Degré de liberté

DSA : Direction des Services Agricoles

GIEN / INM : Gestion Intégrée des Éléments Nutritifs / *Integrated Nutrient Management*

MDA : Malondialdéhyde (Indicateur de peroxydation lipidique)

PFR / PSR : Poids Frais Racinaire / Poids Sec Racinaire

PGPB / PGPR : *Plant Growth-Promoting Bacteria / Rhizobacteria* (Bactéries promotrices de la croissance végétale) **POD**

POD : Peroxydase (Enzyme antioxydante)

PVY : *Potato Virus Y* (Virus Y de la pomme de terre)

ROS : *Reactive Oxygen Species* (Espèces réactives de l'oxygène)

RP-HPLC : *Reversed-Phase High-Performance Liquid Chromatography* (Chromatographie liquide à haute performance en phase inverse)

Liste des figures

Figure 1. Origine géographique du poivron (<i>Capsicum annuum</i> L.) (FAO, 2022).....	5
Figure 2. Différents organes de la plante de poivron (<i>Capsicum annuum</i> L.) (Originale, 2026). 7	
Figure 3. Cycle de développement du poivron (Adapté selon l'échelle BBCH, Illustration par Dreamstime, 2001).....	9
Figure 4. Répartition de la production maraîchère sous serre dans la wilaya de Mostaganem pour la campagne 2023-2024 (DSA Mostaganem, 2024).....	11
Figure 5. Évolution de la production de poivron (<i>Capsicum annuum</i> L.) dans la wilaya de Mostaganem entre 2021et 2024 (DSA Mostaganem, 2024).....	11
Figure 6. Populations de <i>Tetranychus uticae</i> , agents ravageurs du poivron. (Naika et al., 2005) 17	
Figure7. Galles racinaires observées chez différentes lignée locales de piment (<i>Capsicum annuum</i> L) à 63 Jours après inoculation (DAI) avec 4500 œufs de <i>Meloidogyne enterolobii</i> . (Salazar-Mesta et., 2024). (D) UTC67, (E) UTC66, (F) UTC90. (Les flèches rouges indiquent la formation des galles).....	17
Figure 8. Dynamique des populations de thrips palmi sur le piment à Lembang (Vos et al., 19991).....	18
Figure 9. Adulte et nymphes de l'aleurode du tabac (<i>Bemisia tabaci</i>) sur la face inférieure d'une feuille de poivron (Koppert, 2026).....	19
Figure 10. Famell adulte de puceron (<i>Aphidoidea</i>) et ses nymphes nées par parthénogenèse sur la feuille de la plante hôte (Aqua portail, 2024).....	19
Figure 11. Les biostimulants et leurs différentes catégories appliquées en agriculture (Ali et al., 2024).....	23
Figure 12. Représentation schématique des mécanismes d'action direct et indirects des biostimulants sure le développement végétal. (Rouphael et Colla, 2020).....	28
Figure 13. Représentation schématique des effets positifs des biostimulants sur la morphologie, racinaire, l'efficacité d'absorption et l'assimilation de l'azote selon la disponibilité en nutriments (Roupael et al., 2017).....	29
Figure 14. Effet du biostimulant (Radifarm®) sur le développement racinaire et caulinaire des plantules de bégonia de l'espèce (<i>Begonia semperflorens</i> Link. et Otto) (Paradiković et Tkalec, 2014).	
Figure 15. Intégration des approches multi-omiques pour comprendre les mécanismes d'action des biostimulants chez les plantes (Das et al., 2023).....	35
Figure 16. Représentation schématique des principales composantes de la gestion intégrée des éléments nutritifs (INM) en agriculture durable (Awais Ali et al.,2024).....	36

Figure 17. Situation géographique de la ferme expérimentale d'UMAB Mostaganem (Google maps, 2026).....	38
Figure 18. Jeunes plants en plateau alvéolé (Originale, 2026).....	39
Figure 19. Plant de poivron (<i>Capsicum annum</i> L) adulte en production sous serre (Originale, 2026).....	39
Figure 20. Vue générale de la serre tunnel utilisée pour l'expérimentation (Originale, 2026).....	39
Figure 21. Biostimulants (a) NANO ENERGY et en (b) maxim50 utilisés dans l'expérimentation.....	40
Figure 22. Technique de traitement du poivron par application pulvérisation foliaire des biostimulants (Originale, 2026).....	42
Figure 23. Schéma du dispositif expérimental.....	43
Figure 24. Dispositif expérimental et répartition des traitements sous serre selon le plan utilisé. (Originale, 2026).....	43
Figure 25. Produits phytosanitaires (a) Radix80SC et en (b) Albis (Originale, 2026).....	45
Figure 26. Schéma du dispositif expérimentale.....	45
Figure 27. Mesure de la longueur de la tige à l'aide d'un ruban à mesurer métrique.....	46
Figure 28. Echantillons racinaire des différents traitements préparés pour la détermination de la matière fraîche racinaire.....	47
Figure 29. Détermination de la teneur en eau des racines par passage à l'étuve.....	47
Figure 30. Les différentes étapes de la mesure du contenu en relatif RWC des feuilles.....	48
Figure 31. L'extrais des chlorophylles par poivron.....	49
Figure 32. Pesage d'un fruit de poivron pour la détermination du poids moyen du fruit.....	50
Figure 33. Longueur de la tige chez le poivron (<i>Capsicum annum</i> L.) variété Magister traité avec deux biostimulants. Les données représentent la moyenne de trois répétitions et indiquée par la barre d'erreur.....	51
Figure 34. révèlent des différences marquées dans le développement du système racinaire en fonction des traitements appliqués.....	52
Figure 35. Nombre de fruits par plant chez le poivron (<i>Capsicum annum</i> L.).....	53
Figure 36. Nombre de feuilles par plant chez le poivron (<i>Capsicum annum</i> L.).....	54
Figure 37. Teneur en eau racinaire (%) chez le poivron traité chez le poivron (<i>Capsicum annum</i> L.).....	55
Figure 38. Taux de chlorophylle a chez le poivron chez le poivron (<i>Capsicum annum</i> L.).....	56
Figure 39. Taux de chlorophylle b chez le poivron chez le poivron (<i>Capsicum annum</i> L.).....	57
Figure 40. Taux de chlorophylle totale chez le poivron (<i>Capsicum annum</i> L.).....	58

Figure 40. Rapport chlorophylle a/b chez le poivron (<i>Capsicum annuum</i> L.).....	59
Figure 41. Teneur en eau relative (RWC%) chez le poivron (<i>Capsicum annuum</i> L.).....	60
Figure 42. Calibre moyen des fruits (cm) par plant de poivron traité avec deux biostimulants....	61
Figure 43. Effet des différents traitements sur le poids moyen des fruits par plante.....	62
Figure 44. Rendement moyen par plant chez le poivron traité avec deux biostimulants.....	63
Figure 45. Rendement total (kg) chez le poivron variété Magister traité avec deux biostimulants.....	64

Liste des tableaux

Tableau 1. Classification botanique du poivron.....	5
Tableau 2. Classification, caractéristiques morphologiques et illustrations des principales espèces et variétés de poivron (Tripodi et al., 2021).....	8
Tableau 3. Production de Poivrons par Pays (2022) (UN Data, 2024).....	9
Tableau 4. Évolution de la Production de Poivrons Verts en Algérie (FAO, 2024).....	10
Tableau 5. Plan de fertilisation du poivron (JU, 2024).....	13
Tableau 6. Maladies cryptogamiques du poivron.....	14
Tableau 7. Principales maladies bactériennes du poivron.....	15
Tableau 8. Principales maladies virales du poivron.....	16
Tableau 9. Calendrier des interventions culturales, traitements phytosanitaires et applications des biostimulants.....	41
Tableau 10. ANOVA à 1 facteur au seuil de $\alpha = 5\%$, de la longueur de la tige (cm) par plant de poivron traité avec deux biostimulants.....	51
Tableau 11. ANOVA à 1 facteur à $p < 0,05$ Longueur racinaire (cm) par plant du poivron traité avec deux biostimulants.....	52
Tableau 12. ANOVA à 1 facteur à ($p < 0.05$) Nombre de fruits par plant du poivron traité avec deux biostimulants.....	53
Tableau 13. ANOVA à 1 facteur à $p < 0,05$ Nombre de feuilles par plant poivron traité avec deux biostimulants.....	54
Tableau 14. ANOVA à 1 facteur ($p < 0,05$) pour la teneur en eau racinaire : H (%) chez le poivron traité avec deux biostimulants.....	55
Tableau 15. ANOVA à 1 facteur ($p < 0,05$) pour le taux de chlorophylle a chez le poivron variété Magister traité avec deux biostimulants.....	56
Tableau 16. ANOVA à 1 facteur ($p < 0,05$) pour le taux de chlorophylle b chez le poivron variété Magister traité avec deux biostimulants.....	57

Tableau 17. ANOVA à 1 facteur ($p < 0,05$) pour le taux de chlorophylle totale.....	58
Tableau18.ANOVA à 1facteur ($p<0,05$) pour le rapport chlorophylle A/B.....	59
Tableau 19. ANOVA à 1facteur ($p< 0,05$) pour la teneur en eau relative (RWC%) chez le poivron traité avec deux biostimulants.....	60
Tableau 20. ANOVA à 1facteur ($p<0 ,05$) pour le calibre moyen des fruits (cm) par plant de poivron traité avec deux biostimulants.....	61
Tableau 21. Analyse de variance (ANOVA) à un facteur pour le poids moyen des fruits par plante.....	62
Tableau 22. ANOVA à 1 facteur ($p < 0,05$) pour le rendement par plant chez le poivron traité avec deux biostimulants.....	63
Tableau 23. ANOVA à 1 facteur ($p < 0,05$) pour le rendement total (kg) chez le poivron variété Magister traité avec deux biostimulants.....	64

Introduction

Introduction :

Introduction

L'agriculture mondiale est confrontée à des défis majeurs, notamment l'accroissement continu de la population, la raréfaction des ressources naturelles essentielles telles que l'eau et les terres arables, ainsi que les impacts négatifs du changement climatique (**Povero et al., 2016**). Les pressions exercées sur l'agriculture mondiale imposent une vigilance accrue quant à la sécurité alimentaire et à la durabilité des systèmes de production. Il devient essentiel de promouvoir des méthodes agricoles plus performantes et respectueuses de l'environnement afin de répondre aux besoins croissants tout en préservant les ressources naturelles (**Zia et al., 2011**).

Le poivron (*Capsicum annuum* L.), appartenant à la famille des Solanacées, représente une culture maraîchère de portée mondiale, tant par son importance économique que par sa consommation. Sa composition riche en vitamines (C et A), minéraux, fibres et en divers composés phytochimiques bioactifs, tels que les flavonoïdes et les caroténoïdes, lui confère une valeur nutritionnelle élevée et des bénéfices potentiels pour la santé humaine (**Liu et al., 2014; Bharti et al., 2026**). En Algérie, la culture du poivron, particulièrement en serre, occupe une place économique stratégique. Ce mode de production permet de maîtriser les conditions environnementales afin d'optimiser les rendements et d'améliorer la qualité des fruits récoltés (**Castilla, 2013**).

Malgré des conditions de culture contrôlées, le poivron (*Capsicum annuum* L.) demeure exposé à divers stress abiotiques, tels que les fluctuations de température, la salinité du sol ou de l'eau d'irrigation, ainsi que les déficits hydriques. Ces contraintes environnementales peuvent affecter de manière significative sa croissance et réduire sa productivité (**Toscano et al., 2018**). De plus, l'utilisation intensive d'engrais chimiques et de pesticides suscite des préoccupations majeures sur les plans environnemental et sanitaire, ce qui oriente la recherche agronomique vers le développement d'alternatives plus durables et respectueuses de l'écosystème (**Drobek et al., 2019**).

Dans ce contexte, les biostimulants d'origine végétale se présentent comme une approche agricole innovante et prometteuse. Ils sont définis comme des substances ou des microorganismes capables, lorsqu'ils sont appliqués aux plantes, d'améliorer l'efficacité de l'absorption des nutriments, la tolérance aux stress abiotiques et/ou la qualité des productions, indépendamment de leur valeur nutritive directe (**Rouphael et al., 2015**). Leur mode d'action est complexe et multifactoriel, impliquant notamment l'optimisation de l'assimilation des nutriments, la modulation des réponses hormonales et l'activation des mécanismes de défense antioxydants (**Colla et al., 2015**).

Introduction :

L'intérêt porté aux biostimulants connaît une progression constante, comme en témoignent les nombreuses recherches menées sur leur potentiel dans diverses cultures, notamment au sein des Solanacées (**Ertani et al., 2014**). Toutefois, leur efficacité demeure fortement dépendante du type de biostimulant utilisé et des conditions spécifiques de culture. Il apparaît donc nécessaire de conduire des investigations approfondies afin d'évaluer l'impact de biostimulants ciblés sur la croissance et la physiologie du poivron cultivé en serre, en particulier dans le contexte agro-climatique algérien.

La présente recherche a pour objectif d'analyser l'impact de deux biostimulants sur les paramètres de croissance ainsi que sur les réponses physiologiques du poivron (*Capsicum annuum*L.), dans la perspective de contribuer à l'optimisation durable de sa culture.

Chapitre I

Étude de la culture du poivron

Chapitre I. Étude de la culture du poivron

1. Généralités sur le poivron

1.1. Origine

Les poivrons correspondent à des cultivars non piquants de l'espèce (*Capsicum annuum* L.) produisant des fruits de grande taille. Ce nom désigne indistinctement la plante et son fruit. Il s'agit d'une solanacée vivace, généralement traitée comme annuelle, issue des zones centrales des Amériques à savoir l'Amérique centrale, le sud de l'Amérique du Nord et le nord de l'Amérique du Sud, où les conditions tropicales favorisent sa croissance.

Introduites en Espagne dès 1493 via leurs graines, elles se sont ensuite diffusées en Europe et en Asie. Le terme « poivron » tire son origine du mot « poivre » et apparaît pour la première fois dans les écrits en 1785. Originaire des régions centrales du continent américain, notamment l'Amérique centrale, le sud de l'Amérique du Nord et le nord de l'Amérique du Sud, le poivron y prospère grâce au climat tropical (Pitrat et Foury, 2003).

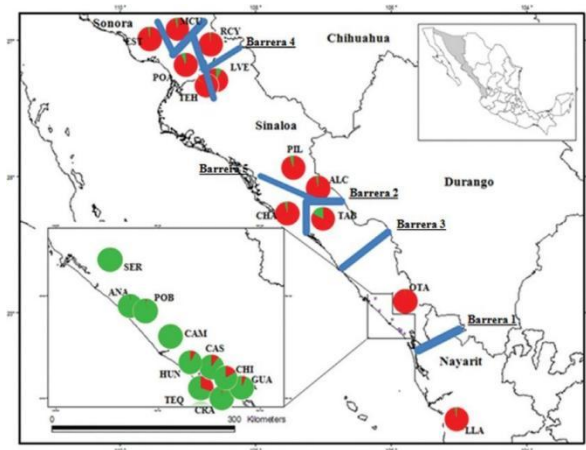


Figure 1. Origine géographique du poivron (*Capsicum annuum* L.) (FAO, 2022).

1.2. Classification botanique

Arthur John Cronquist est connu pour avoir été le principal responsable de la classification de Cronquist, une classification classique des plantes à fleurs, en 1968 et. La taxonomie du poivron est la suivante :

Tableau 1. Classification botanique du poivron

Rang taxonomique	Nom scientifique
Règne	<i>Plantae</i>
Sous- règne	<i>Tracheobionta</i>
Division	<i>Magnoliophyta</i>
Classe	<i>Magnoliopsida</i>
Ordre	<i>Asteridae</i>
Famille	<i>Solanales</i>
Gene	<i>Capsicum</i>
Espèce	<i>Capsicum annuum</i> (Linnæu,1753)

1.3. Caractères physiologiques et botaniques

1.3.1. Appareil végétatif

- **Système racinaire** : Le piment développe un système racinaire pivotant capable d'atteindre 40 à 60 cm de profondeur dans un sol meuble. Les racines secondaires s'étendent horizontalement sur 20 à 30 cm, favorisant une excellente absorption de l'eau et des nutriments. Les poils absorbants, mesurant 1 à 2 mm de long, accroissent la surface d'échange avec le sol. Ce système est toutefois sensible à l'asphyxie dans les sols compacts, d'où la nécessité de sols bien drainés (**Durand, 2021**).
- **Tige** : La tige du piment est herbacée, cylindrique et de couleur verte, atteignant 50 à 100 cm de hauteur selon les variétés. Son diamètre oscille entre 0,5 et 1,5 cm. Elle comporte des nœuds rapprochés d'où naissent les feuilles et les ramifications. À maturité, elle se lignifie légèrement, renforçant ainsi sa résistance mécanique (**Martin, 2020**).
- **Feuilles** : Les feuilles du piment sont simples et alternes, de forme ovale à lancéolée, avec un limbe mesurant 5 à 12 cm de long sur 2 à 6 cm de large. Le pétiole fait 1 à 3 cm. Riches en stomates, elles favorisent la transpiration et la photosynthèse. Leur vert foncé reflète une forte teneur en chlorophylle, cruciale pour la croissance végétative (**Lemoine, 2022**).
- **Fleurs** : Les fleurs du piment sont solitaires ou groupées par deux à trois, de couleur blanche à verdâtre, et mesurent 1 à 2 cm de diamètre. Le calice compte 5 sépales persistants, tandis que la corolle est formée de 5 pétales soudés à la base.

Cinq à six étamines entourent un pistil central. La floraison survient 40 à 60 jours après la levée : la pollinisation est majoritairement autogame, bien que l'entomophile soit possible (Bernard, 2021).

- **Fruits** : Le fruit du piment est une baie charnue, pendante ou érigée selon la variété. Il mesure 3 à 15 cm de long pour un diamètre de 1 à 5 cm. Sa couleur passe du vert au rouge vif, jaune ou orange à maturité, en fonction des cultivars. La paroi, épaisse de 2 à 4 mm, protège les graines. Les fruits renferment de la capsaïcine, alcaloïde responsable du piquant, concentré dans le placenta (Girard, 2022).
- **Semences** : Les graines de piment sont discoïdes et aplaties, de couleur jaune pâle, avec un diamètre de 2 à 4 mm. Elles renferment un embryon bien développé et des réserves nutritives dans l'endosperme. La germination survient en 7 à 14 jours à une température optimale de 25 à 30 °C. Leur viabilité se maintient 2 à 3 ans en conditions de stockage adaptées (Dupuis, 2023).

**Racine****Tige****Feuilles****Fleurs****Fruits****Semences**

Figure 2. Différents organes de la plante de poivron (*Capsicum annuum*L.) (Originale, 2026).

1.3.2. Variétés

La diversité du genre *Capsicum* se manifeste à travers une multitude de variétés, chacune possédant des caractéristiques morphologiques et organoleptiques distinctes. Cette diversité est le résultat d'une adaptation aux différentes conditions climatiques mondiales ainsi que des processus de sélection naturelle et humaine.

Le tableau suivant récapitule les principales espèces cultivées, leurs variétés représentatives, ainsi que leurs caractéristiques majeures et zones de répartition

Tableau2. Classification, caractéristiques morphologiques et illustrations des principales espèces et variétés de poivron (Tripodi et al., 2021)

Espèces s	Variété	Caractéristiques Principales	Régions Associées	
<i>C. annuum</i>	Jalapeño	Piquant moyen, vert/noir, forme conique	Mésoamérique, Amérique N.	
<i>C. annuum</i>	Cayenne	Très piquant, long/étroit, rouge	Global, Afrique/Asie	
<i>C. annuum</i>	Bell peppers	Doux, gros/quadrilobé, multicolore	Europe, Amérique N	
<i>C. baccatum</i>	Aji	Jaune-vert tacheté, forme variée	Amérique du Sud	
<i>C. chinense</i>	Habanero	Extrêmement piquant, lanternes	Caraïbes, Asie	
<i>C. frutescens</i>	Tabasco	Petit, très piquant, rouge	Global (sauce)	
<i>C. baccatum</i>	Bishop's Crown	Forme couronnée, piquant	Amérique du Sud	

1.5. Stades phénologiques

Le cycle de la culture du poivron dure en moyenne 5 mois et demi. La levée n'est pas rapide puisque les graines du poivron mettent une dizaine de jours avant de sortir de terre. Le cycle végétatif suit plusieurs stades végétatifs qui sont :

Stade 0 : Levée

Stade 1 : Les cotylédons sont étalés

Stade 2 : Deux feuilles étalées sur la tige principale

Stade 3 : Davantage de feuilles étalées sur tige

Stade 4 : Début floraison

Stade 5 : Floraison

Stade 6 : Développement du fruit

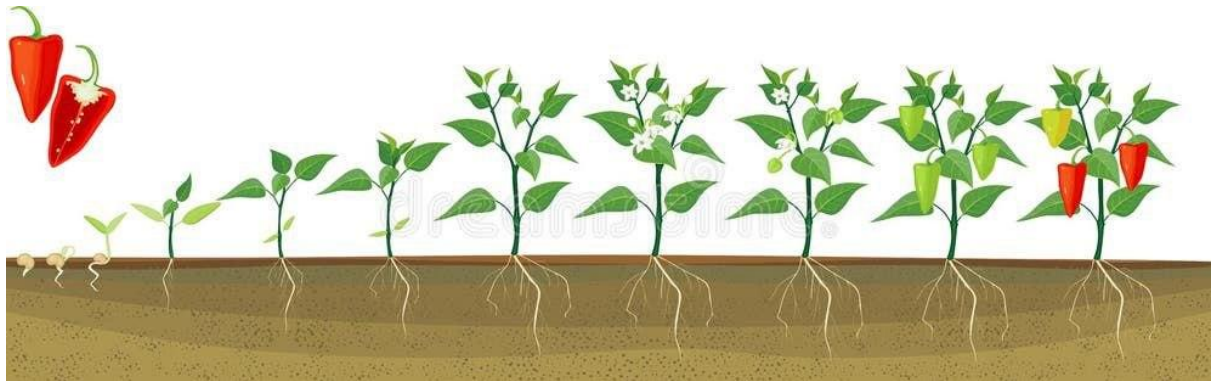


Figure 3 . Cycle de développement du poivron (Adapté selon l'échelle BBCH, Illustration par Dreamstime,2001)

2. Importance économique de la culture du poivron

2.1. Dans le monde

Dans le contexte régional nord-africain et méditerranéen, l'Égypte produit 1,143 millions de tonnes, ce qui place l'Égypte en première position en Afrique du Nord, la Tunisie avec 425 milliers de tonnes et le Maroc avec 274 milliers de tonnes. Cependant, Cette comparaison doit tenir compte des différences structurelles entre l'agriculture intensive méditerranéenne européenne et l'agriculture nord-africaine (UN Data, 2024).

Tableau 3. Production de Poivrons par Pays (2022) (UN Data, 2024).

Classement	Pays	Production (kT)
1	Égypte	1,143
2	Espagne	1,533
3	Algérie	487
4	Tunisie	425
5	Maroc	274
6	Libye	29.1

2.2. En Algérie

L'Algérie dispose d'avantages comparatifs significatifs, notamment une main-d'œuvre agricole. Cette comparaison montre que l'Algérie a le potentiel d'augmenter sa production pour rivaliser avec les plus grands producteurs régionaux abondants, des terres cultivables disponibles dans les régions sahariennes, et des conditions climatiques favorables pour la culture du poivron. Ces avantages pourraient être mieux exploités pour augmenter la production et la compétitivité du secteur.

La production algérienne de poivrons verts a connu une trajectoire volatile au cours de la période 2020-2024, révélant les défis et les opportunités du secteur. En 2020, l'Algérie a atteint un pic historique de production avec 718 milliers de tonnes de poivrons verts, résultant d'une mobilisation importante des ressources agricoles et de conditions climatiques exceptionnellement favorables. Cette année record a démontré le potentiel productif du pays lorsque les conditions sont optimales.

Cependant, cette dynamique positive s'est inversée de manière drastique en 2021, où la production a chuté à 352 milliers de tonnes, représentant une baisse de plus de 50 pour cent en une seule année. Cette contraction significative reflète l'impact de plusieurs facteurs externes tels que les conditions météorologiques défavorables, notamment les sécheresses localisées, les défis de la chaîne d'approvisionnement et les ajustements stratégiques dans les politiques de production agricole. Cette période a mis en évidence la vulnérabilité du secteur aux chocs climatiques et externes.

La production s'est partiellement redressée en 2022, atteignant 487 milliers de tonnes, soit une augmentation de 38,3 pour cent par rapport à 2021. Cette reprise progressive indique une stabilisation graduelle du secteur et une amélioration des conditions de production. En 2023, la production s'est maintenue à un niveau stable autour de 476 milliers de tonnes,

suggérant une consolidation des gains réalisés en 2022. Ces données montrent que le secteur a progressivement retrouvé un équilibre après la crise de 2021 (FAO, 2024).

Tableau 4. Évolution de la Production de Poivrons Verts en Algérie (FAO, 2024).

Année	Production (KT)	Variation (%)
2020	718	-
2021	352	-50.7
2022	487	+38.3
2023	476	-2.3
2024	500	+5.0
2025	520	+4.0

2.3. A Mostaganem

La production de poivron (*Capsicum annuum*L.) à Mostaganem est une activité agricole stratégique et bien développée, particulièrement le long du littoral de la wilaya qui s'étend sur environ 122 km, de la Macta jusqu'à El Bahara dans la daïra d'Achaâcha (DSA, 2024). Cette région bénéficie de conditions climatiques très favorables, avec des automnes et hivers doux, ce qui permet une culture maraîchère intensive, tant en plein champ que sous serres, avec des rendements élevés (ONS, 2024).

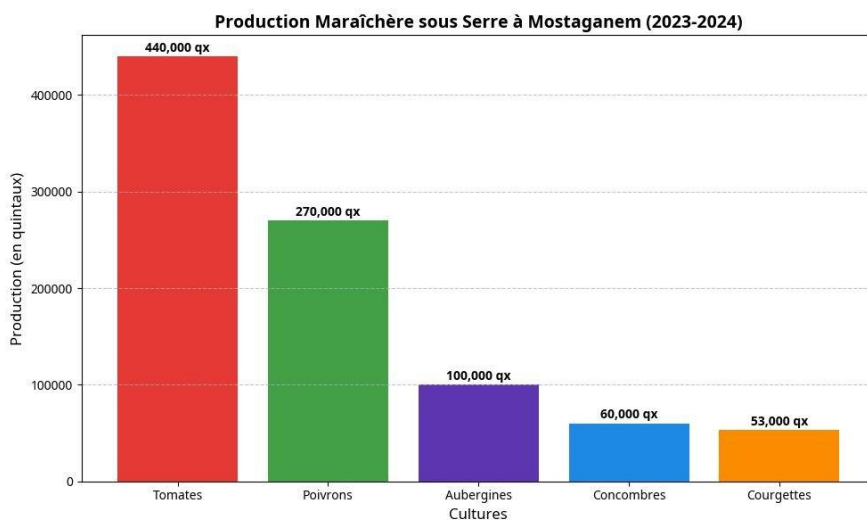


Figure 4. Répartition de la production maraîchère sous serre dans la wilaya de Mostaganem pour la campagne 2023-2024 (DSA Mostaganem, 2024).

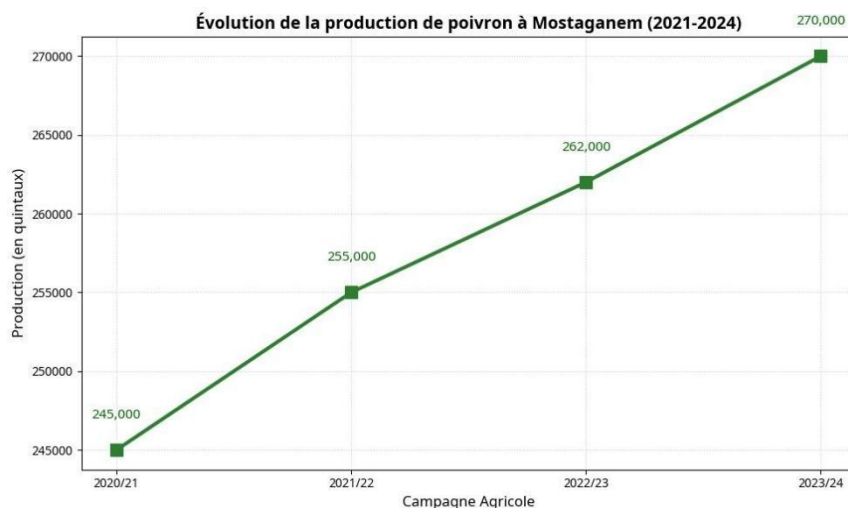


Figure 5. Évolution de la production de poivron (*Capsicum annuum*L.) dans la wilaya de Mostaganem entre 2021 et 2024 (DSA Mostaganem, 2024).

2.4. Exigences pédoclimatiques

2.5. Température

Le poivron (*Capsicum annuum* L.) est une plante qui se développe dans des conditions thermiques bien définies. Sa germination est optimale lorsque la température du sol se situe autour de **18 à 20°C**, ce qui favorise une levée rapide et homogène des semis. Durant la phase de croissance végétative et de fructification, la plage idéale se situe entre **20 et 30°C**. En dessous de **15°C**, la croissance ralentit fortement, les plants deviennent sensibles aux maladies et la nouaison est compromise. À l'inverse, lorsque la température dépasse **35°C**, on observe une chute des fleurs et des jeunes fruits, ce qui entraîne une baisse significative du rendement. Ainsi, le poivron est qualifié de plante thermophile, nécessitant un climat chaud mais sans excès, pour garantir une production régulière et de qualité (Diarra et al., 2018).

2.6. Lumière

Le poivron est une plante héliophile qui nécessite une forte intensité lumineuse pour réaliser une photosynthèse efficace et obtenir une bonne coloration des fruits. Une exposition directe au soleil favorise la maturation et la teneur en sucres, mais un excès de rayonnement peut provoquer des brûlures foliaires et altérer la qualité des fruits. Ainsi, une luminosité abondante mais bien régulée est indispensable pour garantir une production optimale (Moreno, 2015).

2.7. Humidité

L'humidité joue un rôle fondamental dans la culture du poivron (*Capsicum annuum* L.). Cette plante exige une humidité relative de l'air comprise entre **60 et 70 %**, ce qui permet de maintenir un équilibre physiologique favorable et d'assurer une bonne activité stomatique.

Lorsque l'humidité est trop faible, les fleurs et les jeunes fruits ont tendance à avorter, ce qui réduit le rendement. À l'inverse, une humidité excessive favorise le développement de maladies cryptogamiques telles que le mildiou ou la fusariose, qui peuvent compromettre la santé des plants. Les besoins en eau du poivron sont particulièrement élevés durant la floraison et la fructification, périodes où une irrigation régulière et fractionnée est indispensable pour éviter le stress hydrique. Ce dernier entraîne la chute des fleurs et une mauvaise nouaison. Ainsi, la gestion de l'humidité et de l'irrigation doit être rigoureuse, en privilégiant des apports modérés mais fréquents afin de maintenir un sol frais sans engorgement (**Benmoussa, 2020**)

2.8. Sol et pH

Le poivron (*Capsicum annuum L.*) est une plante qui manifeste des exigences précises vis-à-vis du sol. Il préfère les sols meubles, bien aérés et riches en matière organique, car ceux-ci favorisent le développement racinaire et la disponibilité des nutriments. Les sols lourds, argileux et mal drainés sont défavorables puisqu'ils entraînent une stagnation de l'eau, ce qui favorise l'apparition de maladies racinaires comme la fusariose. Le poivron se développe idéalement dans des sols ayant un pH compris entre 6.0 et 7.0, soit légèrement acide à neutre, car cette plage permet une bonne assimilation des éléments nutritifs essentiels tels que l'azote, le phosphore et le potassium. En dehors de cette gamme, certains nutriments deviennent moins disponibles, ce qui peut provoquer des carences et limiter la croissance. Une analyse préalable du sol est donc fortement recommandée afin d'adapter les amendements organiques ou minéraux nécessaires. De plus, l'apport de compost ou de fumier bien décomposé améliore la structure du sol et augmente sa capacité de rétention en eau, tout en évitant l'excès d'humidité. Ainsi, un sol fertile, équilibré et bien drainé constitue la base indispensable pour une culture réussie du poivron (**Hana, 2025**).

2.9. Besoins Eau

Les besoins de la culture se situent aux environs de 400 mm pendant la période végétative et de 200 à 400 mm pendant la période de cueillette, soit 600 à 800 mm/cycle. Le but essentiel de tout système d'irrigation consiste à mettre à la disposition de la plante la quantité d'eau nécessaire à ses besoins en temps opportun. Toute erreur en irrigation a des conséquences graves sur la production puisque la faculté restauratrice des racines du poivron est faible (**Skirej et al., 2005**).

2.10. Fertilisation

La fertilisation du poivron se fait au moyen de la matière organique (compost, fiente de volailles) et de l'engrais minéral (NPK, urée et sulfate de potassium). Elle se fait de la même façon au sol qu'en pot (même dose, même technique d'apport). Le tableau suivant propose un plan de fertilisation du poivron :

Tableau5. Plan de fertilisation du poivron (JU, 2024)

Période	Type de fertilisant	Dose	Technique d'apport
Fumure de fond	Matière organique bien décomposée (fiente de volaille, compost)	375 g ou 400 g/poquet/pot	Incorporer de la matière organique au cours du labour (sol) ou avant le repotage
	Engrais minéral NPK	8 g /poquet/pot	
	15		
	15		
	15		

3. Maladies et ravageurs

Le poivron est cultivé dans de nombreux pays du monde et sous divers climats, il subit des attaques d'un grand nombre de ravageurs et de maladies, ainsi que la concurrence des mauvaises herbes, ce qui engendre des pertes considérables de rendement. Le sol est habité de façon permanente par de nombreux organismes. Il existe aussi une microflore. La lutte contre les mauvaises herbes entraîne des dépenses pour l'achat des produits chimiques et de machines et exige beaucoup d'heures de travail supplémentaires pour le sarclage (Clarence, 1958). Des méthodes combinées utilisant des produits chimiques avec des pratiques culturales peuvent limiter les problèmes causés par les mauvaises herbes.

3.1. Maladies cryptogamiques

Le sol est habité de façon permanente par de nombreux organismes. Il existe aussi une microflore. Pour les cultures maraîchères, on rencontre plusieurs types de champignons responsables de maladies cryptogamiques (Tableau6).

Tableau 6. Maladies cryptogamiques du poivron (HADDADI Bilal, 2019)

Maladies	Agent responsable	Nature des dégâts
Mildiou	<i>Phytophthora capsici</i>	Nécrose brune bien délimitée au niveau du collet. Flétrissement brutal des plantes.
Oïdium	<i>Liveillataurica</i>	Taches jaunâtres sur les feuilles ponctuellement nécrotiques, parfois couverts d'un feutrage blanc.
Alternariose	<i>Alternariasolani</i>	Tâches noires de Taille variable, plus ou moins arrondies, bien délimitées, taches ovales sur tige.
Fusariose	<i>Fusarium oxysporum</i>	Flétrissement accompagné d'un jaunissement souvent unilatéral des feuilles pouvant se généraliser suivi du dessèchement complet de la plante et de la mort de celle-ci.
Verticilliose	<i>Veerticiliumsp.</i>	Flétrissement accompagne d'un jaunissement d'abord unilatéral suivi d'un dessèchement des feuilles de la base.
Pourriture grise	<i>Botrytis cineria</i>	Chancre brun, bien délimité, souvent à plusieurs centimètres au-dessus du niveau du sol. Tâches avec moisissure gris sur les feuilles et fruits. Flétrissement de la plante.
Anthraxnose	<i>ColletotrichumAtramentarium</i>	Tâches déprimées Circulaires sur fruits, le centre de ces taches noircit légèrement.

3.2.Maladies bactériennes

Tableau 7. Principales maladies bactériennes du poivron (HADDADI Bilal, 2019)

Maladies	Agent responsable	Nature des dégâts
Flétrissement Bactérien	<i>Ralstoniasolanacearum</i> (<i>pseudomonas solanacearum</i>)	Flétrissement irréversible d'abord unilatéral puis généralisé, brunissement des vaisseaux et des tissus contigus, chancres ouverts sur les pétioles.
Gale bactérienne	<i>Xanthomonas visicatoria</i>	Apparition de petites taches noires sur les sépales, ces taches sur fruits s'élargissent et prennent une apparence ligneuse et un contour festonné.
Le chancre Bactérien	<i>Corynebacterium michiganense</i>	Flétrissement accompagné de chancres longitudinaux sur tige et pétioles noircissement des vaisseaux puis de la moelle.
Pourriture molle	<i>Erwiniacarotovora</i>	Pourriture molle des tiges et des fruits.
Stolbur	Un organisme de type Mycoplasme et parfois de phyloïdie.	Jaunisse généralisée, dépérissement, chute des feuilles, parfois chute des fruits et flétrissement.

3.3.Maladies virales

Selon Simon (1994), 40% des maladies à virus sont transmises par les insectes, dont le groupe le plus redoutable est celui des pucerons. La transmission se fait lors des piqûres de prise de nourriture, on distingue deux types de transmission :

- Un mode non persistant, localisé au niveau des styles, le virus disparaît lors que les insectes muent.
- Mode persistant, les particules sont ingérées avec la salive, passant de l'intestin dans l'hémolymphe, puis dans les glandes salivaires, ou elles persistent même si l'insecte mue.

Tableau 8.Principales maladies virales du poivron. (HADDADI Bilal, 2019)

Maladies	Agent responsable	Nature des dégâts
Mosaïque du Concombre	Virus de la Mosaïque du concombre (CMV)	Mosaïque en taches annulaires, en arabesque et marbrure.
Mosaïque de la Luzerne	Virus de la Mosaïque de la Luzerne (AIMV)	Il provoque des symptômes nécrotiques mort de certains bourgeons suivis de la production d'un nouveau feuillage présentant une forte mosaïque blanche et jaune.
Mosaïque de la Pomme de terre	Virus Y de la pomme de terre (PVY)	Mosaïque vert brillant avec parfois nécroses des nervures.
Mosaïque du flétrissement de la fève	Virus de flétrissement de fève (BBWY)	Mosaïque jaune avec nécrose sur jeunes pousses.
Mosaïque du Tabac	Virus de la Mosaïque du tabac (TMV)	Mosaïque verte ou blanche, parfois associée à un aspect filiforme des feuilles.

3.4. Ravageurs du poivron

La culture du poivron est fréquemment exposée aux attaques de ravageurs tels que les acariens et les nématodes, ainsi qu'à divers insectes comme les thrips, les aleurodes et les pucerons.

- **Acariens :** Les acariens appartiennent à la classe des arachnides, tout comme les araignées. Ce sont des arthropodes dépourvus d'ailes, contrairement aux insectes. Leur corps est généralement divisé en deux parties : le céphalothorax et l'abdomen.

Ils possèdent quatre paires de pattes. Parmi les acariens nuisibles, on distingue trois grands groupes : les tétranyques, les tarsonèmes et les phytoptides ; ces derniers entraînent le jaunissement et le dessèchement des feuilles. Les principales espèces d'acariens, comme *Tetranychusurticae* et *Tetranychuscinnabarinus*, provoquent de petites lésions mouchetées, jaunes ou blanches (Naika et al., 2005).



Figure 6. Populations de *Tetranychus urticae*, agents ravageurs du poivron. (Naika et al., 2005)

- **Les nématodes :** Les nématodes sont de petits vers ronds microscopiques vivant dans le sol ; ils se nourrissent et se reproduisent sur les racines des plantes (Bélair, 2003). L'attaque par des nématodes à galles, notamment *Meloidogyne incognita* et *Nacobbus aberrans*, représente un problème phytosanitaire majeur pour la culture du piment (*Capsicum annum* L.). (Jones et al., 2013) .



Figure 7. Galles racinaires observées chez différentes lignée locales de piment (*Capsicum annum* L) à 63 Jours après inoculation (DAI) avec 4500 œufs de *Meloidogyne enterolobii* .(Salazar-Mesta et., 2024). (D) UTC67, (E) UTC66, (F) UTC90. (Les flèches rouges indiquent la formation des galles).

- Insectes

✓ **Les thrips :** Les thrips (notamment *Thrips palmi* et *Megalurothrips usitatus*) sont des ravageurs polyphages qui menacent gravement les cultures de piments et de poivrons en Asie du Sud-est (Talekar, 1991 ; Bernardo, 1991). En s'attaquant aux fleurs, bourgeons et feuilles, ils provoquent un brunissement des tissus, l'enroulement du feuillage et la chute des fleurs, ce

qui entraîne des pertes de rendement parfois totales (Bernardo, 1991 ; Sastrosiswojo, 1991). Le recours exclusif aux insecticides chimiques s'est avéré inefficace : les thrips développent rapidement des résistances et les traitements détruisent aussi les ennemis naturels (Talekar, 1991). Il est donc indispensable d'adopter une lutte intégrée (IPM), qui associe la lutte biologique par exemple l'introduction de prédateurs comme *Orius tantillus* (Mituda et Calilung, 1989), des pratiques culturales telles que le paillage avec de la paille de riz pour limiter leur développement dans le sol (Rejesus et al., 1986), et l'utilisation de variétés de piments et poivrons génétiquement résistantes (Bernardo et Eusebio, 1990).



Figure 8. Dynamique des populations de thrips palmi sur le piment à Lembang (Vos et al., 1999)

✓ **Les aleurodes:** La mouche blanche des serres (*Bemisia tabaci*) s'impose aujourd'hui comme l'un des ravageurs invasifs les plus redoutables et destructeurs pour la culture du poivron doux (*Capsicum annuum* L.) à l'échelle mondiale. La lutte contre ce fléau est d'autant plus complexe que ces insectes colonisent préférentiellement la face inférieure des feuilles, une zone particulièrement difficile à atteindre lors des pulvérisations d'insecticides. À cet obstacle physique majeur s'ajoute un défi biologique encore plus alarmant : la capacité phénoménale de *Bemisia tabaci* à développer une résistance agressive et durable vis-à-vis de la majorité des classes d'insecticides chimiques conventionnels (Zayed et al., 2022).



Figure 9. Adulte et nymphes de l'aleurode du tabac (*Bemisia tabaci*) sur la face inférieure d'une feuille de poivron (Koppert, 2026).

✓ **Les pucerons** : Les pucerons représentent des ravageurs majeurs qui causent des dégâts directs sur la culture du poivron par la spoliation de la sève à l'aide de leurs pièces buccales piqueuses-suceuses, ce qui provoque l'affaiblissement général de la plante. Cependant, leur impact indirect est le plus redoutable, car ils agissent comme des vecteurs principaux pour la transmission de phytovirus dévastateurs, tels que le virus de la mosaïque du concombre (CMV) et le virus Y de la pomme de terre (PVY). De plus, l'excrétion de miellat favorise le développement de la fumagine, un complexe fongique noir qui réduit considérablement l'activité photosynthétique des feuilles (**Black et al., 1991**).



Figure 10. Femelle adulte de puceron (Aphidoidea) et ses nymphes nées par parthénogenèse sur la feuille de la plante hôte (**Aqua portail, 2024**).

Chapitre II

Étude des biostimulants

Chapitre 2. Étude des biostimulants.

1. Évolution du concept

L'agriculture contemporaine fait face à une mutation profonde, dictée par des cadres réglementaires internationaux plus stricts et une demande croissante des consommateurs pour des produits exempts de résidus chimiques. Dans ce contexte, les **bio stimulants** s'imposent comme une alternative durable et performante aux engrais et pesticides de synthèse (Rouphae *et al.*, 2020).

1.1. Historique

Le concept de bio stimulant est apparu pour combler un vide sémantique entre les régulateurs de croissance végétaux et les engrais traditionnels. Le terme « bio stimulant végétal » a été introduit à la fin des années 1990 (Zhang et Schmidt, 1997). En définissant comme une substance, appliquée en faibles quantités, favorisant la croissance des plantes sans être des nutriments essentiels.

De plus, le marché mondial de ces biostimulants suscite un intérêt économique majeur, avec une valeur financière qui devrait atteindre 7,6 milliards de dollars d'ici 2029, affichant un taux de croissance annuel composé de 12,0 %. Enfin, l'accent est mis sur l'évolution de la gestion réglementaire et des cadres d'enregistrement de ces produits à travers différents pays du monde (Yuan, 2024).

Leurs effets physiologiques ont été observés, notamment l'amélioration de l'efficacité d'utilisation des nutriments, l'accroissement de la tolérance aux stress abiotiques et l'optimisation des qualités des cultures (Valavanidis, 2024).

1.2. Définition

Un biostimulant végétal (PB) est, comme un produit fertilisant dont la fonction est de stimuler les processus de nutrition des plantes indépendamment de sa propre teneur en éléments nutritifs, dans le but exclusif d'améliorer l'efficacité de l'utilisation des nutriments, la tolérance au stress abiotique, les traits de qualité, ou la disponibilité des nutriments confinés dans le sol ou la rhizosphère.

Un bio stimulant végétal n'est pas défini par sa composition chimique ou par un apport direct d'éléments nutritifs, mais par ses effets physiologiques et fonctionnels sur les plantes. Il s'agit d'un produit d'origine biologique ou minérale contenant des substances et/ou des micro-organismes qui, appliqués sur la plante ou la rhizosphère, stimulent les processus naturels de croissance et de développement. Conformément à l'harmonisation réglementaire (notamment le règlement européen (UE) 2019/1009), ces produits cherchent principalement à améliorer : l'efficacité d'utilisation des nutriments (sans que le produit soit nécessairement

une source de nutriments), la tolérance aux stress abiotiques (sécheresse, salinité, températures extrêmes), la qualité des récoltes et la biodisponibilité des éléments nutritifs présents dans le sol ou la zone racinaire. Distincts des engrais et des produits phytosanitaires, les bio stimulants agissent comme des accélérateurs de performance et de résilience des cultures, dans une optique d'agriculture durable (Valavanidis, 2024).

1.2.1. Spécificité

La distinction des autres catégories de produits appliqués aux végétaux repose essentiellement sur leur nature, leur mode d'action et les effets recherchés sur la plante :

- **Engrais Classique:** Ils ont pour fonction principale d'apporter directement des éléments nutritifs essentiels (comme l'azote, le phosphore ou le potassium) pour nourrir la plante. Leur action dépend directement de leur teneur en nutriments (Jardin, 2015).
- **Produits Phytosanitaires (Pesticides) :** Ils sont conçus pour protéger les cultures contre les agressions biotiques, c'est-à-dire pour éliminer ou contrôler les bioagresseurs tels que les maladies (fongiques ou bactériennes), les insectes et les mauvaises herbes (Jardin, 2015).
- **Biostimulants Végétaux :** Contrairement aux engrais, ils agissent indépendamment de leur propre teneur en éléments nutritifs. Contrairement aux produits phytosanitaires, ils ne ciblent pas directement les ravageurs ou les maladies (le stress biotique étant exclu de leur définition stricte). Les bio stimulants englobent des substances ou des micro-organismes dont le but est d'induire des réponses physiologiques chez la plante afin d'améliorer l'efficacité de l'utilisation des nutriments, d'augmenter la tolérance aux stress abiotiques (comme la sécheresse ou la salinité) et d'améliorer les critères de qualité des cultures (Jardin, 2015).

1.3. Classification des biostimulants

Les bio stimulants végétaux désignent des substances ou des micro-organismes appliqués aux plantes afin d'accroître l'efficacité d'utilisation des nutriments, d'améliorer la tolérance aux stress abiotiques et/ou d'optimiser les caractéristiques qualitatives des cultures, indépendamment de leur apport en éléments nutritifs (Lu et *al.*, 2024).

Conformément à la classification académique largement reconnue, notamment celle formalisée par Patrick Du Jardin, ces produits se répartissent de manière rigoureuse en deux grandes catégories (Valavanidis, 2024).

1.3.1. Les Bio stimulants Non-Microbiens

Cette catégorie regroupe des substances organiques et inorganiques d'origines diverses :

- **Les substances humiques** : qui incluent les acides humiques et fulviques, proviennent de la décomposition de la matière organique du sol et favorisent le développement des racines ainsi que l'absorption des éléments nutritifs (Yakhin et al., 2017).
- **Les extraits d'algues** : obtenus principalement à partir de macroalgues (par ex. *Ascophyllum nodosum*), ils contiennent de nombreux polysaccharides complexes, des minéraux et des composés aux effets analogue aux phytohormones, et renforcent la tolérance aux stress environnementaux) (Rouphael and Colla, 2020).
- **Les hydrolysats protéiques et mélanges d'acides aminés** : issus de l'hydrolyse enzymatique ou chimique de sous-produits agro-industriels (d'origine animale ou végétale), ils apportent de l'azote facilement assimilable et jouent un rôle de médiateurs dans la signalisation cellulaire (Yakhin et al., 2017 ; Rouphael & Colla, 2020)
- **Le chitosane et autres bio polymères** : dérivés de la chitine, ces composés stimulent les réponses de défense internes des plantes contre les agressions environnementales. (Yakhin et al., 2017.)

Les éléments minéraux bénéfiques : Des éléments non essentiels tels que le silicium (Si), le sélénium (Se), ou l'aluminium (Al), qui renforcent la structure cellulaire et optimisent les fonctions physiologiques sous stress (Yakhin et al., 2017).

1. Les Bio stimulants Microbiens (*Microbial Bio stimulants*)

Cette catégorie repose sur l'inoculation de micro-organismes vivants qui établissent des interactions bénéfiques avec la plante :

Les bactéries promotrices de la croissance végétale (PGPB/PGPR) : des genres comme *Azotobacter*, *Rhizobium* ou *Bacillus* qui facilitent la fixation de l'azote, la solubilisation du phosphore et modulant les hormones végétales, notamment l'éthylène (Lu et al., 2024 ; Yakhin et al., 2017).

Les champignons bénéfiques : principalement les champignons mycorhiziens à arbuscules (CMA/AMF) et des espèces du genre *Trichoderma*, dont les hyphes étendent le réseau racinaire pour maximiser l'absorption d'eau et de nutriments peu mobiles et améliorer la structure du sol (Lu et al., 2024)

En conclusion, cette catégorisation claire permet de mieux cibler les applications agronomiques afin de réduire la dépendance aux engrais chimiques et de s'inscrire durablement dans le cadre d'une transition agro écologique moderne (Valavanidis, 2024).

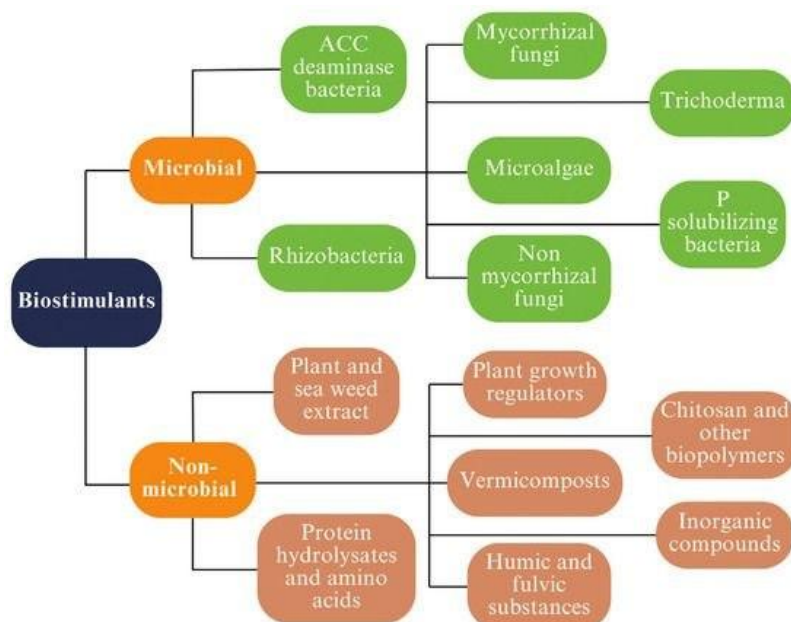


Figure 11. Les biostimulants et leurs différentes catégories appliquées en agriculture (Ali et al., 2024)

2. Composition chimique

Les biostimulants naturels regroupent une grande diversité de substances et de micro-organismes. Selon la classification scientifique récente, ils incluent principalement les acides humiques et fulviques, les hydrolysats de protéines, les micro-organismes bénéfiques, ainsi que les extraits d'algues marines (*Seaweed extracts - SWE*) et les cyanobactéries (Al-Ramamneh et al., 2024).

La composition chimique de ces bios stimulants est caractérisée par une richesse en biomolécules actives qui dictent leur efficacité. L'analyse par chromatographie liquide à haute performance (RP-HPLC) révèle des profils phytochimiques distincts selon la nature du bio stimulant et sa concentration :

2.1. Les extraits de cyanobactéries (*Spirulina platensis*) : La microalgue *Spirulina platensis* (SP) se distingue par un profil bioactif extrêmement riche en composés phénoliques et flavonoïdes. Appliquée à une concentration de 3 %, la spiruline fournit ou stimule la synthèse de teneurs maximales en molécules thérapeutiques et antioxydantes majeures, notamment (Al-Ramamneh et al., 2024) :

- Le **Thymol** (208,6 $\mu\text{g g}^{-1}$)
- La **Quercétine** (187,3 $\mu\text{g g}^{-1}$)
- L'**Alcool 2,3-dihydroxyphénylique** (63,2 $\mu\text{g g}^{-1}$)
- L'**Acide p-coumarique** (38,8 $\mu\text{g g}^{-1}$)
- L'**Épicatéchine** (36,4 $\mu\text{g g}^{-1}$)
- L'**Acide férulique** (32,1 $\mu\text{g g}^{-1}$)
- L'**Acide chlorogénique** (29,6 $\mu\text{g g}^{-1}$)

De plus, les variations de concentration de ce bio stimulant modifient spécifiquement son spectre chimique : la dose de 2 % de *Spirulinaplatensis* engendre une accumulation remarquable de **Rutine** (263,2 $\mu\text{g g}^{-1}$), tandis que la dose de 1% se caractérise par une présence optimale d'**Acide sinapique** (45,0 $\mu\text{g g}^{-1}$) (Al-Ramamneh et al., 2024)

2.2. Les extraits d'algues marines (*Ascophyllumnodosum*)

Bien que les extraits de l'algue brune *Ascophyllumnodosum* (SWE) soient reconnus pour leur richesse en phytohormones, oligosaccharides et éléments minéraux, l'analyse chromatographique quantitative montre que leur profil en certains acides phénoliques spécifiques (à des concentrations de 0,5 % et 1 %) reste inférieur à celui de la spiruline. En effet, certaines molécules telles que l'acide gallique, la catéchine, l'acide chlorogénique, l'épicatéchine, l'acide syringique et l'acide sinapique y sont indétectables (Al-Ramamneh et al., 2024).

En somme, l'efficacité d'un biostimulant dépend intrinsèquement de sa composition chimique qualitative et quantitative. L'apport de ces molécules exogènes (polyphénols, antioxydants) agit comme un signal moléculaire, déclenchant des voies de signalisation internes chez la plante (telles que la production transitoire de H_2O_2), ce qui stimule son métabolisme secondaire et renforce sa résilience face aux contraintes environnementales (Al-Ramamneh et al., 2024).

2. Méthodes d'application des bios stimulants

Efficacité des bios stimulants dépend fortement de la manière dont ils sont appliqués. Trois principales méthodes sont identifiées :

Application foliaire des bios stimulants

L'**application foliaire** consiste à pulvériser directement les biostimulants sur les feuilles des plantes. Cette méthode est la plus répandue dans les essais agricoles (plus de 85 % des études analysées). Elle permet aux substances actives d'être rapidement absorbées par les

tissus foliaires et d'agir sur la photosynthèse, la tolérance au stress et l'efficacité d'utilisation des nutriments.

Selon l'analyse de (Li, Van Gerrewey et Geelen (2022), l'application foliaire entraîne en moyenne une augmentation du rendement d'environ **17 %**. Toutefois, la fréquence joue un rôle important : une seule pulvérisation peut générer un effet notable (+14,9 %), tandis que des applications trop fréquentes réduisent l'efficacité (11–14 %).

En résumé, l'application foliaire est une méthode simple et largement utilisée, efficace pour améliorer la productivité, mais son impact reste inférieur à celui de l'application au sol.

3.2. Application au sol des biostimulants

L'**application au sol** consiste à introduire les biostimulants directement dans la terre, soit par incorporation dans le substrat, soit via l'eau d'irrigation. Cette méthode agit sur la rhizosphère et favorise l'absorption des nutriments, l'amélioration de la structure du sol et la tolérance des plantes aux stress abiotiques.

D'après l'analyse de Li, Van Gerrewey et Geelen (2022), l'application au sol s'est révélée la plus efficace parmi toutes les méthodes testées, avec une augmentation moyenne du rendement de **+28,8 %**. Ce résultat dépasse largement l'efficacité de l'application foliaire (~17 %) et du traitement des semences (~17 %).

Cette supériorité s'explique par le contact direct entre les biostimulants et les racines, permettant une meilleure disponibilité des nutriments et une interaction prolongée avec le sol. Ainsi, l'application au sol est particulièrement recommandée dans les conditions de stress hydrique ou de sols pauvres en matière organique.

3.3. Traitement des semences avec biostimulants

Le **traitement des semences** consiste à enrober ou tremper les graines dans une solution contenant des biostimulants avant la plantation. Cette méthode permet aux graines de bénéficier dès la germination d'un apport direct en substances actives, favorisant une meilleure vigueur initiale, une croissance plus rapide et une tolérance accrue aux stress abiotiques.

Selon l'étude de Li et al.(2022) le traitement des semences entraîne une augmentation moyenne du rendement d'environ **17 %**, ce qui est comparable à l'application foliaire. Bien que son efficacité soit inférieure à celle de l'application au sol (+28,8 %), cette technique reste intéressante car elle est simple, économique et agit dès les premiers stades de développement de la plante.

En résumé, le traitement des semences avec biostimulants est une stratégie efficace pour améliorer la germination et la productivité, surtout lorsqu'il est combiné avec d'autres méthodes d'application (Li et *al.*, 2022).

4. Effets sur les Traits Morpho-Anatomiques, Biochimiques et Physiologiques

L'emploi de bios stimulants entraîne d'importantes modifications du métabolisme primaire et secondaire des plantes, favorisant ainsi la croissance des jeunes plantules et l'augmentation de la biomasse totale. Ces produits exercent des effets proches de ceux des hormones végétales synthétiques (par exemple les auxines) en déclenchant des voies contrôlées par les brassinostéroïdes, qui sont indispensables à la formation des racines adventives. Par ailleurs, l'apport de composés spécifiques (comme l'acide aminé L-méthionine) ou l'application de jus de luzerne fermenté renforce l'activité d'enzymes antioxydantes majeures (catalase et peroxydase), accroît la teneur en pigments photosynthétiques (chlorophylles a et b) et influence de manière bénéfique la microflore bactérienne du sol (Khan et *al.*, 2019 Bákonyi et *al.*, 2020).

5. Impact sur les Traits de Qualité et la Valeur Nutritionnelle

Outre l'amélioration du rendement, les biostimulants influencent activement le métabolisme primaire et secondaire des cultures horticoles et industrielles, conduisant à une accumulation importante de composés antioxydants hydrosolubles et liposolubles (phytochimiques) bénéfiques pour la santé humaine. Les extraits de plantes tropicales et les hydrolysats de luzerne augmentent notablement l'activité antioxydante totale, la teneur en acide ascorbique (vitamine C) et les composés phénoliques dans les fruits et légumes. De même, l'inoculation par des bactéries telles que *Bacillus subtilis* ou par des champignons mycorhiziens stimule la biosynthèse de molécules bioactives de grande valeur-lycopène, β -carotène, anthocyanes ainsi que de crocine et picrocrocine chez le safran (Soppelsa et *al.*, 2019 ; Rouphael et Colla, 2020).

Chapitre III

Mécanismes d'action des biostimulants

Chapitre III : Mécanismes d'action des biostimulants

Ce chapitre expose les principaux mécanismes d'action des biostimulants en lien avec les paramètres physiologiques et agronomiques du poivron (**Bonini et al., 2020**).

1. Classification générale des mécanismes d'action des biostimulants

Les effets des biostimulants se répartissent en deux catégories : les mécanismes directs, qui agissent directement sur la plante, et les mécanismes indirects, qui interviennent par le biais de la rhizosphère, de la microflore ou de la disponibilité des nutriments (**Du Jardin, 2015**).

Les mécanismes directs comprennent la modulation hormonale, l'optimisation de la photosynthèse et la stimulation du métabolisme secondaire. En revanche, les mécanismes indirects concernent la modulation du microbiote racinaire et la solubilisation des nutriments (**Rouphael et Colla, 2020**).

1.1. Mécanismes directs sur la plante

Les biostimulants interviennent directement sur la physiologie du poivron en modifiant la teneur en chlorophylle, en augmentant l'activité photosynthétique et en stimulant le métabolisme antioxydant (**Bonini et al., 2020**).

Ils influencent également le développement racinaire, notamment la croissance des racines et la formation de racines latérales, ce qui accroît la surface d'absorption de l'eau et des ions minéraux (**Calvo et al., 2014**).

1.2. Mécanismes indirects via la rhizosphère et le microbiote

En stimulant l'activité de bactéries et de champignons bénéfiques tels que les PGPR et les mycorhizes, certains biostimulants favorisent la fertilité biologique du substrat ainsi que la disponibilité du phosphore et d'autres nutriments peu mobiles (**Pii et al., 2015**). Ces modifications du microbiome rhizosphérique contribuent à une meilleure tolérance aux stress abiotiques et à une augmentation de la productivité des cultures légumières, y compris celle du poivron (**Brunetti et al., 2018**).

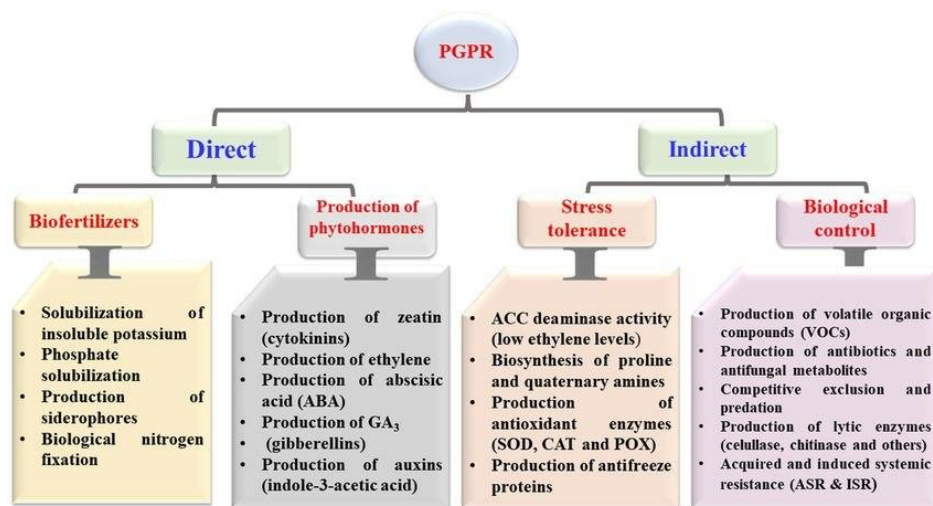


Figure 12. Représentation schématisée des mécanismes d'action direct et indirects des biostimulants sur le développement végétal (Rouphael et Colla, 2020).

2. Effets des biostimulants sur le système racinaire

Les biostimulants augmentent souvent la longueur totale des racines, le nombre de racines latérales et la densité des poils absorbants chez le poivron (Calvo et al., 2014). Cette stimulation racinaire améliore l'exploration du substrat ainsi que la capacité d'absorption de l'eau et des nutriments (Rouphael et al., 2017).

2.1. Stimulation de la croissance et du développement racinaire

Les extraits d'algues ainsi que d'autres biostimulants organiques stimulent la synthèse locale d'auxines et de cytokinines, favorisant ainsi la formation de nouvelles racines et la division cellulaire au niveau de l'apex racinaire (Stevanovic et al., 2012). Chez le poivron, cette stimulation racinaire se traduit par une croissance aérienne améliorée et une floraison-fructification anticipée (Bonini et al., 2020).

2.2. Amélioration de la surface d'absorption racinaire

L'augmentation de la densité des racines fines et des poils absorbants accroît la surface spécifique d'absorption, améliorant ainsi l'efficacité d'utilisation des nutriments (Zhang et al., 2018). Dans les systèmes de culture sous serre, où le volume de substrat est limité, cette amélioration contribue particulièrement à l'optimisation de la qualité des fruits (Rouphael et Colla, 2018).

2.3. Interaction entre l'architecture racinaire et l'efficacité nutritionnelle

L'optimisation de l'architecture racinaire par les biostimulants améliore l'efficacité nutritive du poivron (*Capsicum annuum* L.), notamment la gestion de l'azote (N), par des mécanismes adaptatifs dépendant de la disponibilité en nutriments (Rouphael et Colla, 2018). En situation de forte disponibilité en azote, les biostimulants modifient la morphologie

racinaire par des effets analogues à ceux des auxines et activent les enzymes d'assimilation, limitant ainsi l'accumulation toxique de nitrates dans les feuilles (Calvo *et al.*, 2014). En cas de faible disponibilité en azote, ils compensent ce déficit en surexprimant les transporteurs d'acides aminés et en fournissant une source directe d'azote organique assimilable (Halpern *et al.*, 2015 ; Tecchio *et al.*, 2022). Ce mode d'action adaptatif contribue à stabiliser la croissance en serre malgré les variations de fertilisation (Nardi *et al.*, 2021).

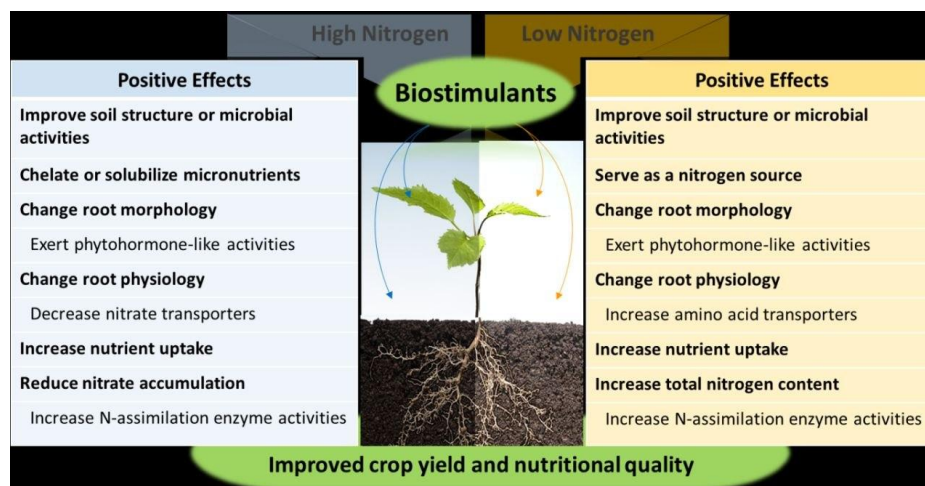


Figure 13. Représentation schématique des effets positifs des biostimulants sur la morphologie, racinaire, l'efficacité d'absorption et l'assimilation de l'azote selon la disponibilité en nutriments (Roupael *et al.*, 2017).



Figure 14. Effet du biostimulant (Radifarm®) sur le développement racinaire et caulinaire des plantules de bégonia de l'espèce (*Begonia semperflorens* Link. et Otto) (Paradiković et Tkalec, 2014).

3. Rôle des biostimulants dans l'absorption et l'utilisation des éléments nutritifs

Les biostimulants favorisent l'absorption et l'utilisation des macroéléments (N, P, K, Ca, Mg) ainsi que des oligo-éléments en augmentant la surface racinaire et en modulant les échanges ioniques au niveau de la membrane plasmique (Roupael et Colla, 2018). Chez le

poivron, cette amélioration se traduit par une augmentation des teneurs en chlorophylle, une meilleure coloration foliaire et une productivité accrue (Colla *et al.*, 2014).

3.1. Effet sur la disponibilité des macroéléments

L'application de biostimulants organiques facilite la solubilisation du phosphore ainsi que la mobilisation du potassium et du calcium dans le substrat, augmentant ainsi leur disponibilité pour la plante (Pardo *et al.*, 2020). Cette amélioration de la nutrition se traduit par une croissance plus homogène et une atténuation de certains symptômes de carence chez le poivron (Rouphael *et al.*, 2016).

3.2. Effet sur les oligo-éléments et sur la fertilité biologique du substrat

En stimulant la microflore du sol ou du substrat, certains biostimulants favorisent la conversion des formes minérales peu disponibles en formes assimilables (Pii *et al.*, 2015). Ce renforcement de la fertilité biologique participe au maintien de la productivité sur plusieurs cycles de culture en serre (Pardo *et al.*, 2020)

4. Régulation des hormones végétales par les biostimulants

Les biostimulants modifient le profil hormonal du poivron en agissant sur les concentrations d'auxines, de cytokinines, de gibbérellines et d'acide abscissique (Rouphael *et Colla*, 2020). Cette régulation hormonale contribue partiellement aux effets observés sur le développement végétatif, la floraison, la fructification ainsi que sur la résistance aux stress abiotiques.

4.1. Action sur les auxines et la formation racinaire

Les biostimulants composés d'acides organiques ou d'extraits d'algues induisent une élévation locale des concentrations en auxines, favorisant ainsi la formation de racines latérales et de radicelles (Du Jardin *et al.*, 2012). L'augmentation de la surface racinaire résultante optimise l'absorption des nutriments et renforce la tolérance des plantes au stress hydrique (Calvo *et al.*, 2014).

4.2. Action sur les cytokinines, gibbérellines et acide abscissique

L'application de biostimulants peut provoquer une augmentation relative des concentrations en cytokinines et gibbérellines, favorisant ainsi l'allongement des entre-nœuds et la fructification du poivron (Bonini *et al.*, 2020). Parallèlement, la modulation des niveaux d'acide abscissique contribue à une régulation plus efficace de la fermeture stomatique lors des épisodes de stress hydrique (Rouphael *et al.*, 2011).

4.3. Implication dans la floraison, la fructification et la tolérance au stress

Chez le poivron, la modulation hormonale provoquée par les biostimulants stimule une floraison plus importante ainsi qu'une fixation accrue des fruits (Rouphael *et Colla*, 2012).

De plus, la régulation conjointe de l'acide abscissique et de la proline participe au maintien d'une turgescence optimale et à une tolérance renforcée aux stress salin et thermique (Rouphael et *al.*, 2015).

5. Amélioration de la photosynthèse et des fonctions physiologiques

Les biostimulants favorisent fréquemment une augmentation de la teneur en chlorophylle ainsi qu'une meilleure stabilité des complexes photosynthétiques, renforçant ainsi l'activité photosynthétique chez le poivron (Rouphael et *al.*, 2008). Cette optimisation se traduit par une production accrue de biomasse, une floraison améliorée et une croissance accélérée des fruits (Colla et *al.*, 2012).

5.1. Effet sur l'activité photosynthétique

Les traitements biostimulants augmentent les concentrations de chlorophylle a et b, améliorant ainsi la capture lumineuse et la vitesse de photosynthèse nette (Rouphael et *al.*, 2008). Chez le poivron, ces effets se traduisent par un feuillage plus vert, une croissance végétative renforcée et une production fruitière accrue (Bonini et *al.*, 2020).

5.2. Influence sur la conductance stomatique et la transpiration

Les biostimulants modifient la conductance stomatique en agissant sur les concentrations d'acide abscissique et d'ions K⁺ au niveau des cellules de garde (Rouphael et *al.*, 2011). Cette régulation optimise l'utilisation de l'eau, un avantage crucial en culture sous serre où l'irrigation est maîtrisée et où la salinité de l'eau peut constituer un facteur limitant (Colla et *al.*, 2010).

6. Renforcement des défenses et de la tolérance au stress

Les biostimulants renforcent les défenses antioxydantes des plantes en stimulant des enzymes clés (SOD, CAT, POD) et le système glutathionique, ce qui limite les dommages aux membranes cellulaires causés par les espèces réactives de l'oxygène (ROS) induites par le stress (Pineda et *al.*, 2018). Cette modulation redonne de la résilience au poivron face aux stress hydrique, salin et thermique (Rouphael et *al.*, 2015).

6.1. Activation des systèmes antioxydants

En stimulant l'activité des enzymes antioxydantes, les biostimulants limitent l'accumulation de malondialdéhyde (MDA), indicateur de peroxydation lipidique, et préservent ainsi l'intégrité membranaire (Jablonska et Pukacka, 2007). Chez le poivron exposé à un stress salin, cette réponse antioxydante s'accompagne de teneurs chlorophylliennes supérieures et d'une croissance améliorée malgré la salinité (Rouphael et *al.*, 2015).

6.2. Rôle des prolines, sucres solubles et osmoprotecteurs

Les biostimulants favorisent l'accumulation de proline, de sucres solubles et d'autres osmoprotecteurs, contribuant ainsi au maintien de la pression osmotique et de la turgescence cellulaire (Li et *al.*, 2020). Cette osmoprotection réduit les symptômes de flétrissement liés au stress hydrique, un avantage particulièrement utile en production sous serre (Colla et *al.*, 2014)

6.3. Atténuation des effets du stress abiotique

Chez le poivron irrigué avec de l'eau salée, les biostimulants limitent la perte de biomasse et de rendement en préservant la teneur en chlorophylle, en soutenant l'activité photosynthétique et en améliorant l'hydratation tissulaire (Rouphael et *al.*, 2015). Ces effets physiologiques expliquent en partie l'intérêt des biostimulants pour atténuer les stress abiotiques (Jardin, 2015).

7. Effets sur la qualité et la composition des fruits de poivron

Les biostimulants altèrent la composition des fruits de poivron en modulant les concentrations en sucres, vitamine C, caroténoïdes et composés phénoliques (Rouphael et *al.*, 2008). Ces modifications biochimiques se traduisent par une amélioration de la couleur, une fermeté accrue et un allongement de la durée de conservation post récolte (Colla et *al.*, 2017).

7.1. Modification de la teneur en sucres, vitamine C et caroténoïdes

Les traitements biostimulants augmentent les concentrations en sucres réducteurs et en vitamine C, améliorant ainsi les qualités nutritionnelle et organoleptique des fruits (Rouphael et *al.*, 2008). Parallèlement, l'accumulation de caroténoïdes et de composés phénoliques accroît la capacité antioxydante des fruits de poivron (Colla et *al.*, 2017)

7.2. Amélioration de la couleur, la fermeté et la conservation post récolte

Les biostimulants améliorent l'uniformité de la coloration et augmentent la fermeté des fruits, optimisant ainsi leur qualité commerciale et leur durée de conservation (Rouphael et *al.*, 2013). Ces effets sont particulièrement précieux en production sous serre destinée à des marchés exigeants sur les qualités organoleptiques (Colla et *al.*, 2015).

7.3. Influence sur le calibre et le rendement commercial

Les biostimulants élèvent le calibre moyen des fruits et augmentent la proportion de fruits classés en catégorie supérieure, améliorant ainsi le rendement commercial du poivron (Rouphael et *al.*, 2012). Ces gains sont souvent liés à une meilleure régulation des processus de division et d'expansion cellulaire au sein du fruit (Colla et *al.*, 2019).

8. Modulation du microbiote racinaire et interactions avec le substrat

Les biostimulants favorisent le développement de microorganismes bénéfiques tels que les bactéries PGPR et les champignons mycorhiziens (Pii et al., 2015). Cette modulation de la rhizomicrobiote améliore la disponibilité des nutriments et la protection contre les pathogènes, ce qui contribue à une meilleure santé globale du poivron (Brunetti et al., 2018).

8.1. Promotion des microorganismes bénéfiques (PGPR, champignons mycorhiziens)

L'application de biostimulants à base de microorganismes enrichit la rhizosphère en espèces favorables qui solubilisent le phosphore et synthétisent des substances de croissance (Pii et al., 2015). Chez le poivron, cette association microbiologique se traduit par une meilleure croissance et une meilleure tolérance aux stress (Bonini et al., 2020).

9. Impact sur la fertilité biologique et la protection contre les pathogènes

Les biostimulants renforcent la fertilité biologique en augmentant la diversité microbienne et en stimulant la décomposition de la matière organique (Pardo et al., 2020). Ils induisent également des mécanismes de résistance systémique qui améliorent la résistance du poivron à certaines maladies racinaires (Colla et al., 2018).

10. Modèle intégré des mécanismes d'action des biostimulants

Les mécanismes décrits peuvent être intégrés dans un modèle global où l'application du biostimulant (feuille ou racine) déclenche une cascade de signalisation hormonale, métabolique et antioxydante (Rouphael et Colla, 2020). Cette cascade se traduit par des changements morphologiques (racines, tiges, feuilles), physiologiques (photosynthèse, régulation hydrique) et biochimiques (antioxydants, métabolites secondaires) qui améliorent la croissance et la qualité du poivron (Du Jardin, 2015).

10.1. Modélisation des voies de signalisation

L'application foliaire de biostimulants modifie le profil hormonal et métabolique des feuilles, ce qui influence la distribution des assimilats vers les fruits et la régulation des gènes liés à la croissance et au stress (Bonini et al., 2020). De même, une application racinaire module la rhizosphère et la nutrition, ce qui se répercute sur la croissance aérienne et la qualité des fruits (Rouphael et al., 2016).

10.2. Liens entre mécanismes et paramètres mesurés sur le poivron

Les mécanismes hormonaux, photosynthétiques et antioxydants expliquent directement les variations observées dans la hauteur de la plante, le nombre de feuilles, la teneur en chlorophylle, le rendement et la qualité des fruits (Colla et al., 2015). Ce modèle intégré fournit un cadre théorique pour l'interprétation des résultats expérimentaux de la culture de poivron sous serre (Rouphael et Colla, 2020).

11. Synthèse et hypothèses de recherche

En résumé, les biostimulants améliorent la croissance, la nutrition et la qualité des fruits du poivron via des mécanismes multiples : stimulation racinaire, modulation hormonale, activation des défenses antioxydantes et amélioration de la qualité des fruits (**Rouphalet Colla, 2020**). Ces mécanismes sont particulièrement pertinents en culture sous serre, où les contraintes hydriques et salines peuvent limiter la productivité (**Du Jardin, 2015**).

Les deux biostimulants étudiés sont susceptibles d'agir par des voies similaires : stimulation de la croissance racinaire, amélioration de la photosynthèse, activation des enzymes antioxydantes et augmentation de la teneur en vitamine C et en composés phénoliques des fruits (**Bonini et al., 2020**). Ces mécanismes justifient l'observation probable d'une amélioration globale de la vigueur et de la qualité des plants de poivron.

11.1. Formulation des hypothèses liées à l'expérimentation sur le poivron

- ✓ **Hypothèse 1** : L'application des deux biostimulants étudiés améliore significativement la croissance racinaire, la hauteur de la plante et le nombre de feuilles chez le poivron par rapport au témoin non traité (**Rouphael et al., 2017**).
- ✓ **Hypothèse 2** : Les traitements biostimulants augmentent la teneur en chlorophylle, la conductance stomatique et la photosynthèse nette, ce qui se traduit par une meilleure productivité (**Colla et al., 2012**).
- ✓ **Hypothèse 3** : Les biostimulants augmentent la teneur en vitamine C, les composés phénoliques et la fermeté des fruits, améliorant ainsi leur qualité et leur conservation post-récolte (**Colla et al., 2017**).

12. Effet des biostimulants sur la nutrition végétale

L'amélioration de l'absorption et de l'utilisation des éléments nutritifs par les biostimulants résulte d'une régulation moléculaire complexe. En effet, l'application des biostimulants déclenche une cascade de réponses physiologiques qui peuvent être finement analysées par des approches multi-omiques :

- ✓ **Au niveau transcriptomique et génomique** : ils stimulent l'expression des gènes codant pour les transporteurs d'ions, optimisant ainsi l'efficacité d'absorption des nutriments essentiels tels que l'azote (N), le phosphore (P) et le potassium (K)
- ✓ **Au niveau protéomique** : ils induisent la synthèse de protéines structurales et d'enzymes clés impliquées dans l'assimilation du carbone et de l'azote. Cette modulation enzymatique renforce l'activité de la nitrate réductase et des enzymes du cycle de Krebs, optimisant ainsi l'utilisation des nutriments absorbés pour le développement cellulaire du poivron (**Colla et al., 2017**).

- ✓ **Au niveau métabolomique** : ils stimulent la production de métabolites secondaires, notamment les composés phénoliques, les flavonoïdes et les acides aminés spécifiques comme la proline. Ces profils métaboliques modifiés agissent comme des signaux de régulation et des osmoprotecteurs, maximisant la résilience de la plante face aux fluctuations environnementales sous serre (Rouphael et Colla, 2020).

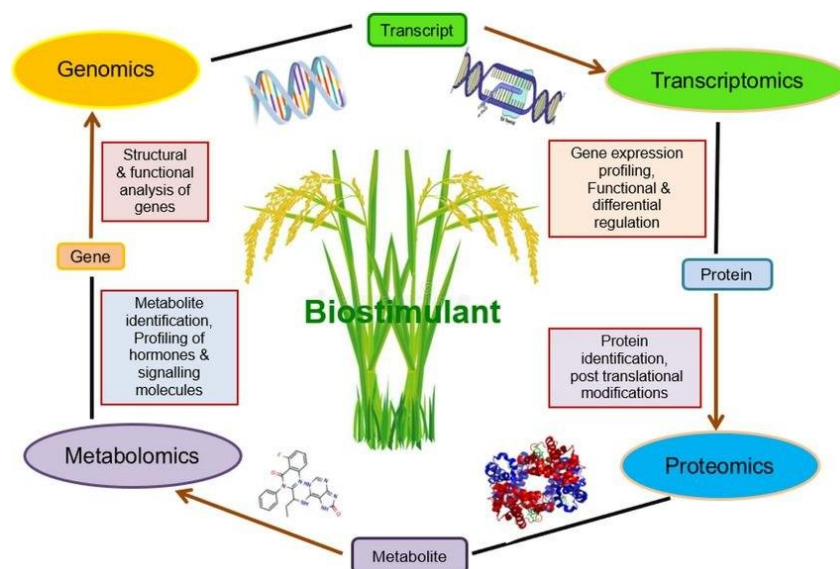


Figure 15. Intégration des approches multi-omiques pour comprendre les mécanismes d'action des biostimulants chez les plantes (Das et al., 2023).

13. Gestion intégrée des nutriments (INM) et synergie des biostimulants

La Gestion Intégrée des Éléments Nutritifs (GIEN ou INM) s'appuie sur une approche globale visant à optimiser la nutrition des plantes tout en préservant la santé du sol et de son environnement. En effet, cette stratégie systémique combine de manière équilibrée plusieurs sources de nutriments et pratiques culturales :

- **Les engrais synthétiques et organiques** : L'INM ne supprime pas l'usage des engrais chimiques, mais en rationalise l'application en les associant à des fumiers organiques et des résidus de culture afin de maintenir le taux de matière organique dans le sol.
- **Les biofertilisants et engrais verts** : L'introduction de micro-organismes bénéfiques (biofertilisants) et la mise en place de cultures d'engrais verts enrichissent naturellement le sol, notamment en azote assimilable.
- **La rotation des cultures** : Cette pratique permet de rompre les cycles des bio-agresseurs tout en améliorant l'exploration racinaire et l'utilisation des éléments nutritifs résiduels dans le sol.

L'interaction synergique de ces composantes contribue à réduire la dépendance exclusive aux engrais chimiques, à améliorer la structure physico-chimique du sol et à garantir une production agricole durable (Awais Ali et *al.*, 2024).



Figure 16. Représentation schématisée des principales composantes de la gestion intégrée des éléments nutritifs (INM) en agriculture durable (Awais Ali et *al.*, 2024).

Deuxième partie :

Étude expérimentale

Deuxième partie : Étude expérimentale

1. Objectif de l'essai

Cette étude vise principalement à évaluer et à comparer l'impact de deux formulations de biostimulants sur le développement morphologique, le comportement physiologique et la productivité du poivron (*Capsicum annuum* L.) mené sous serre. Il s'agit d'identifier les mécanismes par lesquels ces substances optimisent la croissance végétale et maximisent le rendement fruitier.

2. Zone d'étude

L'étude a été conduite à la ferme expérimentale située dans la commune de Mazargan, affiliée à l'Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem. La figure ci-dessous, issue de Google Maps (2026).

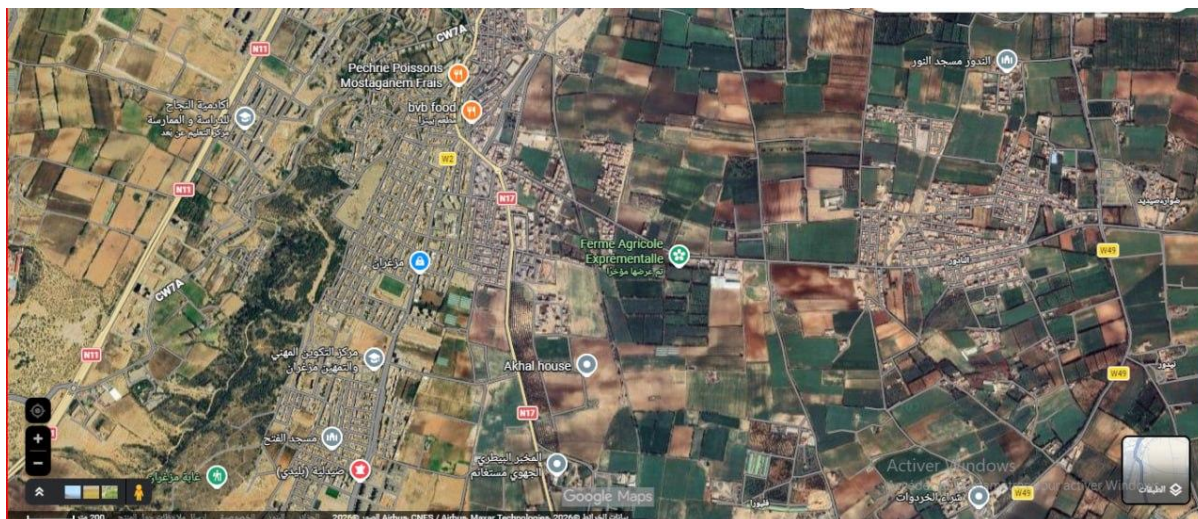


Figure 17. Situation géographique de la ferme expérimentale d'UMAB Mostaganem (Google maps, 2026).

3. Matériel et méthodes

3.1. Matériel végétal

Le matériel végétal employé dans cette étude est le poivron (*Capsicum annuum* L.), variété Magister. Les jeunes plants ont été repiqués en plateaux alvéolés le 17 décembre 2025. Ce cultivar a été retenu pour plusieurs raisons agronomiques et socio-économiques : populaire et bien adapté à la région de Mostaganem, largement cultivé sous serre : bonne tolérance aux maladies courantes du poivron, garantissant une meilleure sécurité de rendement : fort intérêt commercial grâce à sa productivité et à la qualité des fruits (forme allongée, 20-22 cm de long et 8-9 cm de large) : vigueur végétative notable, avec des plants mesurant généralement de 50 à 75 cm et présentant un feuillage vert foncé.



Figure 18. Jeunes plants en plateau alvéolé (Originale, 2026).



Figure 19. Plant de poivron (*Capsicum annum*L) adulte en production sous serre (Originale, 2026).

3.2. Conditions expérimentales

L'essai a été mené en serre afin de maîtriser les conditions environnementales. Température, humidité relative et irrigation ont été maintenues dans des plages optimales pour le poivron. Toutes les plantes ont été soumises aux mêmes conditions culturales pour minimiser l'influence de facteurs externes.



Figure 20. Vue générale de la serre tunnel utilisée pour l'expérimentation (Originale, 2026).

3.2.1. Produits utilisés

- **NANO ENERGY** : Il s'agit d'un régulateur de croissance végétal liquide commercialisé par Agri Sciences et distribué par BMHagri. Utilisé comme biostimulant, ce produit stimule les fonctions physiologiques des plantes et soutient leur croissance à toutes les étapes du développement.

❖ **Caractéristique :**

- **Azote total (N) : 5%**
- **Anhydride phosphorique (P₂O) : 6%**
- **Oxyde de potassium (K₂O) : 7%**
- **Extrait d'algues marines : 28%**

❖ **Propriétés**

Il stimule les processus vitaux lors des stades de croissance des cultures agricoles, augmente la taille et la qualité des fruits, permettant ainsi d'atteindre un rendement élevé et une excellente qualité.



(a) NANO ENERGY



(b) MaXim50

Figure 21. Biostimulants (a) NANO ENERGY et en (b) maxim50 utilisés dans l'expérimentation.

- **MaXim50** : C'est un biostimulant végétal liquide (Formulation : Liquide), fabriqué en Espagne par *Europa MIDUNION*. C'est un concentré d'acides aminés de haute qualité à faible poids moléculaire, enrichi en oligo-éléments, spécialement conçu pour stimuler les fonctions physiologiques des plantes et améliorer leur rendement, notamment en périodes de stress. Un concentré d'acides aminés de haute qualité, dont le poids moléculaire est inférieur, tous deux permettant aux plantes une grande récupération sous périodes de stress. Amélioration du rendement et une grande production.
- **Composition et Caractéristiques :**

Sa composition chimique et physique se présente comme suit

- **Matière organique totale : 50 %**
- **Acides aminés libres : 10 %**

- **Acides aminés totaux** : 36 %
- **Azote organique** : 06 %
- **Oligo-éléments** : Bore (0,5 %), Cuivre (0,1 %), Fer (0,5 %), Manganèse (0,5 %), Molybdène (0,02 %), Zinc (0,50 %)
- **Volume / Poids net** : 1 Litre / 1,26 Kg
- **Numéro d'homologation** : 205974

3.2.2. Protocole d'application

Les biostimulants ont été appliqués par pulvérisation foliaire à des doses rigoureuses (2 mL/L), conformément aux recommandations.

Tableau9. Calendrier des interventions culturales, traitements phytosanitaires et applications des biostimulants.

Dates	Protocole d'application
27 Janvier	Application du biostimulant (stade avant floraison).
08 Février	Un traitement à l'acrivertine a été appliqué et des pièges à insectes ont été installés.
08 Février	Début de floraison pour le traitement P2
14 Février	Début de floraison
26 Février	Application du biostimulant (stade après floraison).
08 mars	Application du biostimulant (stade avant nouaison).
18 mars	Application de l'insecticide Albis.
24mars	Application du biostimulant (stade après nouaison)
29 mars	Application de l'acaricide a Acrivertine.
31mars	Application du biostimulant (stade avant grossissement).
07avril	Application de l'acaricide acrivertine.
19 avril	Application du fongicide Hymexazol
26 avril	Application du biostimulant (stade après grossissement)

Les biostimulants ont été appliqués à des doses rigoureuses, conformément aux recommandations propres à chaque produit. Les traitements ont été effectués par pulvérisation foliaire à intervalles réguliers pendant tout le cycle de culture, en adaptant la fréquence à la nature de chaque biostimulant.



Figure 22. Technique de traitement du poivron par application pulvérisation foliaire des biostimulants (Originale, 2026).

3.3. Dispositif expérimental

L'essai expérimental a été mis en place le **17 décembre 2025** sous serre. Il vise à évaluer l'effet de deux biostimulants sur la croissance et la physiologie du poivron (*Capsicum annuum* L.) de la variété **Magister**.

3.3.1. Choix du dispositif

Le dispositif expérimental adopté est un **dispositif en blocs aléatoires complets (BAC)** comportant **trois (03) blocs** (répétitions), désignés par (**A, B et C**).

Chaque bloc comprend trois (03) modalités de traitements, réparties d'une manière aléatoire :

Témoin (T0) : Plantes irriguées uniquement avec de l'eau (sans aucun biostimulant).

Traitement 1 (P1) : Plantes traitées avec le biostimulant **NANO ENERGY**.

Traitement 2 (P2) : Plantes traitées avec le biostimulant **MaXim 50**.

3.3.2. Densité de plantation

Nombre de plants par unité expérimentale : Chaque traitement dans un bloc est représenté par **cinq (05) plantes**.

Nombre de plantes par bloc : Chaque bloc contient 15 plantes (3 traitements × 5 plantes).

Nombre total de plantes : L'expérimentation porte sur un effectif total de **45 plantes** (15 plantes × 3 blocs).

Distance de plantation : Les plantes sont espacées d'une distance de **40 cm** sur la même ligne.

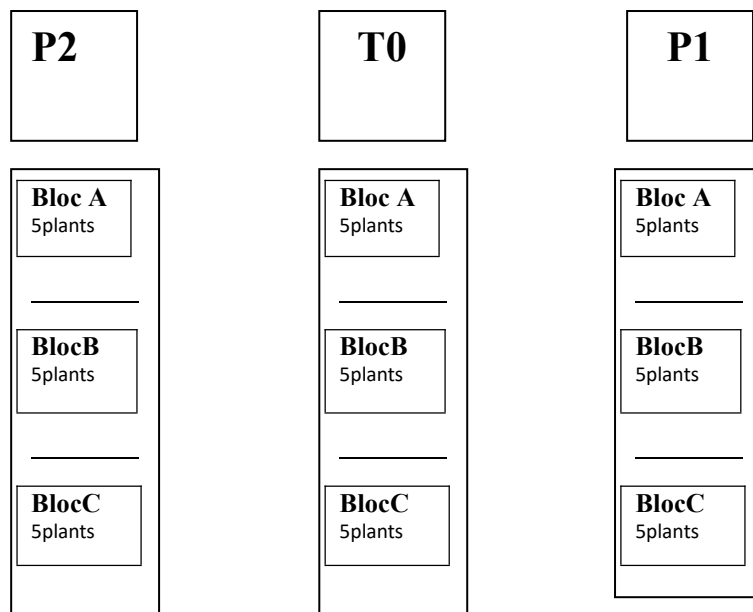


Figure 23. Schéma du dispositif expérimental.

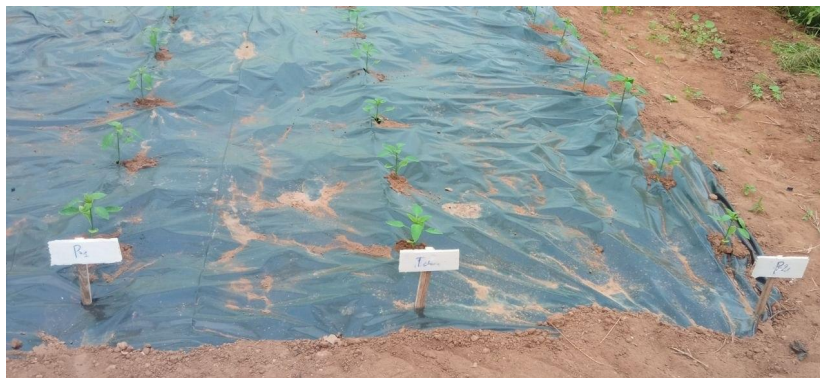


Figure24. Dispositif expérimental et répartition des traitements sous serre selon le plan utilisé. (Originale, 2026).

3.3.3. Conduite de la culture

Préparation du lit de plantation : nous avons procédé à un nettoyage minutieux du substrat suivi d'un ameublissement superficiel. Ces travaux ont optimisé la porosité du sol et facilité l'infiltration et le développement racinaire.

Technique du paillage plastique : Un film de paillage en polyéthylène noir a été déployé sur l'ensemble des lignes de l'essai. Ce dispositif a été choisi pour ses multiples bénéfices microclimatiques : la séquestration de l'humidité du sol par limitation de l'évaporation directe, le maintien d'une température optimale au niveau de la rhizosphère lors des périodes froides, et l'inhibition de la germination des graines de plantes adventices par privation de lumière.

Transplantation (repiquage) : Les jeunes plants de poivron ont été installés manuellement par les perforations du film plastique. Un espacement inter-plants strict de 40

cm a été respecté pour assurer une densité homogène et prévenir la compétition spatiale entre les plantes.

Pilotage du système d'irrigation

L'approvisionnement en eau de la culture a été entièrement géré par un réseau de micro-irrigation localisée (Goutte-à-goutte). Ce système a été privilégié pour deux raisons majeure

- Garantir un apport d'eau strictement identique en volume et simultané pour les 45 plants de l'expérimentation, afin d'éliminer toute hétérogénéité hydrique.
- Limiter l'humidité relative sous serre en évitant le mouillage du feuillage, mesure préventive contre l'installation des agents pathogènes aériens. Les apports hydriques ont été progressivement ajustés en fonction des stades phénologiques de la culture et des conditions climatiques internes à la serre.

Opérations d'entretien et gestion du développement végétatif

Contrôle de l'enherbement : Même si le paillage noir contrôle les adventices sur le rang, des opérations de désherbage manuel ont été réalisées périodiquement dans les allées et entre les lignes afin d'empêcher toute concurrence pour les ressources minérales.

Tuteurage individualisé : Pour compenser la forte vigueur végétative caractérisant la variété *Magister*, un tuteurage vertical a été mis en place. Chaque plant a été stabilisé par un tuteur afin de guider sa croissance érigée, de prévenir la verse mécanique de la tige principale sous l'effet de la charge en fruits, et d'optimiser la surface foliaire exposée au rayonnement lumineux.

Stratégie de suivi et de protection phytosanitaire

La préservation de l'état sanitaire des plantes a fait l'objet d'un suivi quotidien. Les attaques de bio-agresseurs ont été maîtrisées grâce à des interventions chimiques ciblées à l'aide de spécialités phytosanitaires homologuées :

Lutte contre les pucerons (*Aphis* spp.) : à l'apparition des premiers foyers, un traitement a été effectué avec l'insecticide systémique Albis (Acétamipride 20%), actif par contact et ingestion en ciblant le système nerveux des insectes piqueurs-suceurs.

Contrôle des fourmis : en raison de leur rôle protecteur et disséminateur vis-à-vis des pucerons, les colonies de fourmis ont été éliminées par des applications locales et ciblées d'un insecticide de contact au niveau du sol.

Lutte contre acariens et thrips : pour protéger les tissus foliaires, l'acaricide/insecticide Acrivertine (Abamectine, 18 g/L) a été pulvérisé sur le feuillage afin d'inhiber l'alimentation de ces ravageurs.

Protection fongique de la rhizosphère : pour prévenir les pourritures racinaires et la fonte des semis dues aux champignons telluriques (*Pythium* spp., *Fusarium* spp.), une application préventive par arrosage au pied du fongicide systémique Radix 30SC (Hymexazol 30%) a été réalisée, sécurisant ainsi l'intégrité du système racinaire et favorisant l'absorption optimale des biostimulants appliqués.



(C) RADIX80SC utilisé pour la protection des racines.



(D) Insecticide systémique commercial Albis utilisé pour la lutte contre les pucerons.

Figure 25. Produits phytosanitaires (C) Radix80SC et en (D) Albis (Originale, 2026).

Blocs 3 (répétitions)

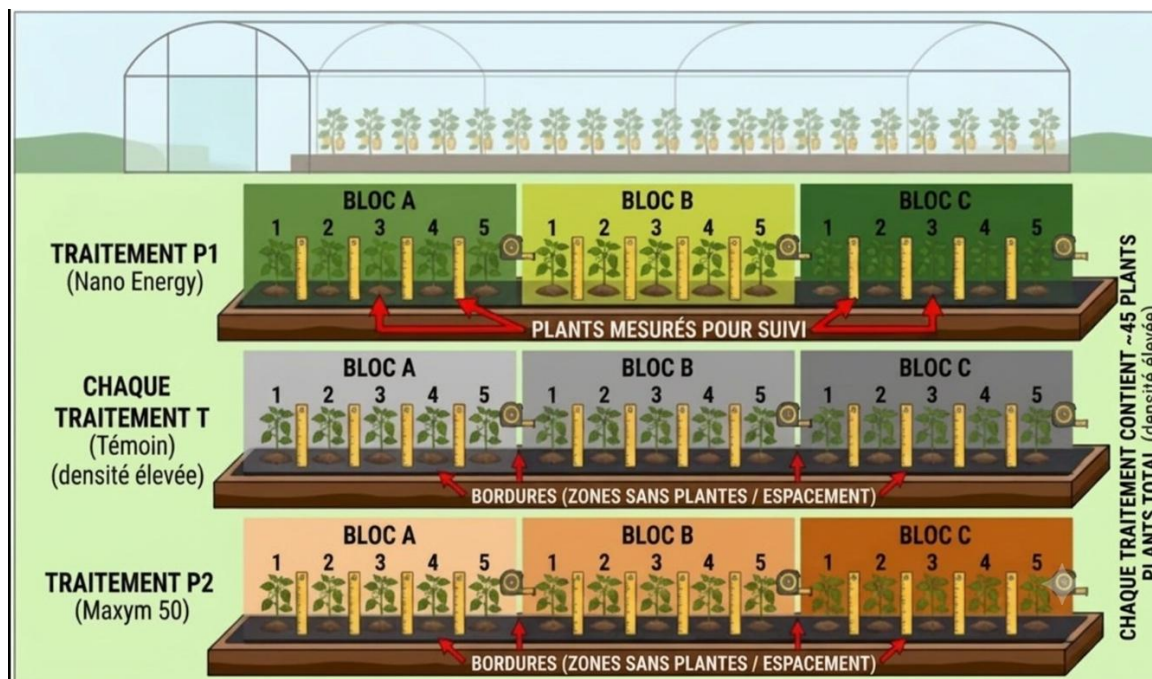


Figure 26. Schéma du dispositif expérimental

3.4. Paramètres mesurés

3.4.1. Paramètres morphologiques

3.4.1.1. Longueur de la tige



Figure 27. Mesure de la longueur de la tige à l'aide d'un ruban à mesurer métrique.

Ce paramètre est mesuré pour suivre la croissance végétative verticale des plants. La mesure est effectuée à l'aide d'une règle graduée, en calculant la distance allant du collet de la plante jusqu'à l'apex terminal. Les résultats sont exprimés en centimètres (cm).

3.4.1.2. Longueur de la racine

La longueur de la racine permet d'évaluer le développement du système racinaire. Après le dépotage et le nettoyage minutieux des racines, la longueur de la racine principale est mesurée à l'aide d'une règle graduée, et les résultats sont exprimés en centimètres (cm).

3.4.1.3. Nombre de feuilles

Le nombre de feuilles est un indicateur direct de la vigueur de la plante. Il est déterminé par un comptage visuel direct de l'ensemble des feuilles fonctionnelles développées sur chaque plant.

3.4.1.4. Nombre de fruits par plant

Ce paramètre permet de quantifier la productivité de chaque unité expérimentale. Il est déterminé par un comptage visuel direct de la totalité des fruits obtenus par plant tout au long de la période de fructification.

3.4.2. Paramètres physiologiques

3.4.2.1. Teneur en eau racinaire

La teneur en eau des racines a été déterminée selon la méthode décrite par (Garg et al. 2001) (p. 388). Après la récolte, les racines sont soigneusement lavées et essuyées pour mesurer immédiatement le poids frais racinaire (PFR). Les échantillons sont ensuite placés à l'étuve à 80 °C pendant 48 heures jusqu'à l'obtention d'un poids constant afin de déterminer le poids sec racinaire (PSR). La teneur en eau racinaire (TER) est calculée en pourcentage selon la formule suivante :

$$\text{TER (\%)} = \frac{PS - Pf}{PF} * 100$$

Avec :

TER : Teneur en eau racinaire (%).

PFR : Poids frais racinaire (g).

PSR : Poids sec racinaire (g).



Figure 28. Échantillons racinaires des différents traitements préparés pour la détermination de la matière fraîche racinaire.



Figure 29. Détermination de la teneur en eau des racines par passage à l'étuve

3.4.2.2. teneur en eau relative (RWC)

La teneur en eau relative (RWC) des feuilles de carotte a été mesurée en trois répétitions. Des fragments de feuilles fraîches d'environ 1 à 2 g ont été prélevés en triple exemplaire dans les groupes témoin et de stress hydrique (sécheresse). Ensuite, le poids frais des feuilles a été mesuré, puis les feuilles ont été placées dans de l'eau distillée pendant la nuit. Le poids de turgidité a ensuite été mesuré, et les feuilles ont été séchées au four à 100 °C pendant 2 heures afin de déterminer leur poids sec (Juaid et al., 2023)

Les valeurs de la RWC des plantes ont été calculées selon l'équation suivante.

$$\text{RWC (\%)} = \frac{fw - Dw}{tw - DW} \times 100$$

Poids Frais (FW)

Poids de Turgidité (TW)

Poids Sec (DW)



Figure 30. Différentes étapes de la mesure du contenu en relatif RWC des feuilles au laboratoire.

3.4.2.3. Détermination du taux chlorophylle

Dosage de la chlorophylle et des caroténoïdes

Les teneurs en chlorophylle a, b et en caroténoïdes ont été déterminées à partir d'échantillons de feuilles fraîches de carotte (0,5 g). Ces derniers ont été extraits avec 10 mL d'acétone à 80 % et conservés à l'obscurité pendant la nuit. Le mélange extrait a ensuite été centrifugé à 10 000 tr/min pendant 5 min à 4 °C. La densité optique du surnageant a été enregistrée à l'aide d'un spectrophotomètre UV-Vis (UV-1800, Shimizu) aux longueurs d'onde de 470 nm, 646 nm et 663 nm (Junaid et al., 2023)

Les calculs ont été effectués selon les formules suivantes (Lichtenthaler, 1987) :

$$\text{Chl a} = 12,7 \times (A_{663}) - 2,69 \times (A_{645})$$

$\text{Chl } b = 22,9 \cdot (A_{645}) - 4,68 \cdot (A_{663})$

$\text{Chl } a = 22,9 \cdot (A_{645}) - 4,68 \cdot (A_{663})$

$\text{Chl } t = 20,2 \cdot (A_{645}) + 8,02 \cdot (A_{663})$

Chlorophylle a = Chl a

Chlorophylle b = Chl b

Chlorophylle totale = Chl t

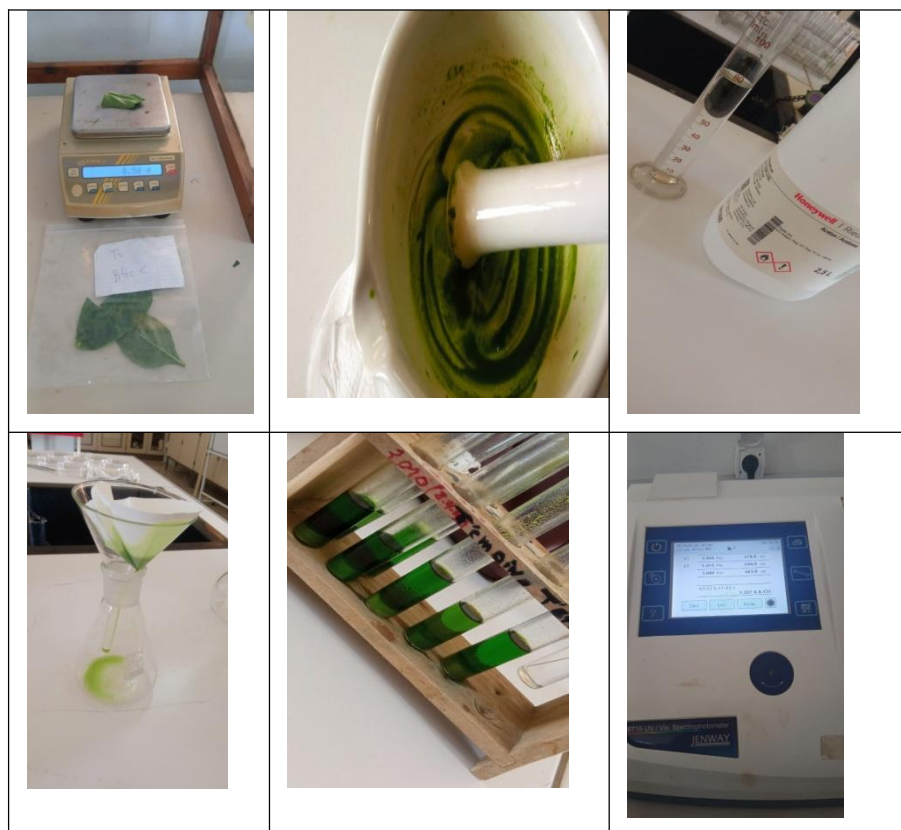


Figure 31.Extraction et dosage de la chlorophylle.

3.4.3. Paramètres du rendement

- **Calibre** : Ce paramètre permet d'évaluer la qualité commerciale et le développement des fruits. Dans notre étude, le calibre est déterminé en mesurant la longueur des fruits à l'aide d'une règle graduée, et les résultats sont exprimés en centimètres (cm).

- **Poids de fruits :** Le poids moyen des fruits est mesuré pour évaluer l'effet des traitements sur le développement de la biomasse fructifère. Pour cela, un échantillon de fruits est pesé à l'aide d'une balance de précision, et le résultat est exprimé en grammes (g). Le poids de chaque fruit est mesuré individuellement à l'aide d'une balance électronique de précision (Figure 32), ce qui permet ensuite de calculer le rendement total par plant.



Figure 32. Pesage d'un fruit de poivron pour la détermination du poids moyen du fruit

- **Rendement par plant :** Ce paramètre représente la productivité directe de chaque unité expérimentale. Il est calculé en faisant la somme du poids de tous les fruits récoltés sur un même plant, et il est exprimé en grammes ou en kilogrammes par plante (g/plant ou kg/plant).
- **Rendement total :** rendement total représente la production globale obtenue. Il est calculé en extrapolant le rendement moyen par plant en fonction de la densité totale de plantation, et il est généralement exprimé en tonnes par hectare (t/ha) ou en kilogrammes par mètre carré (kg/m²)

4. Analyse des données

Les données récoltées ont été analysées avec l'analyse de variance à 1 Facteur. Les moyennes calculées ont été comparées à l'aide du test de Student à $p=0.05$ (Excel 2007).

3^{ème} partie : Interprétation des résultats

1. Paramètres morphologiques

1.1. Longueur de la tige

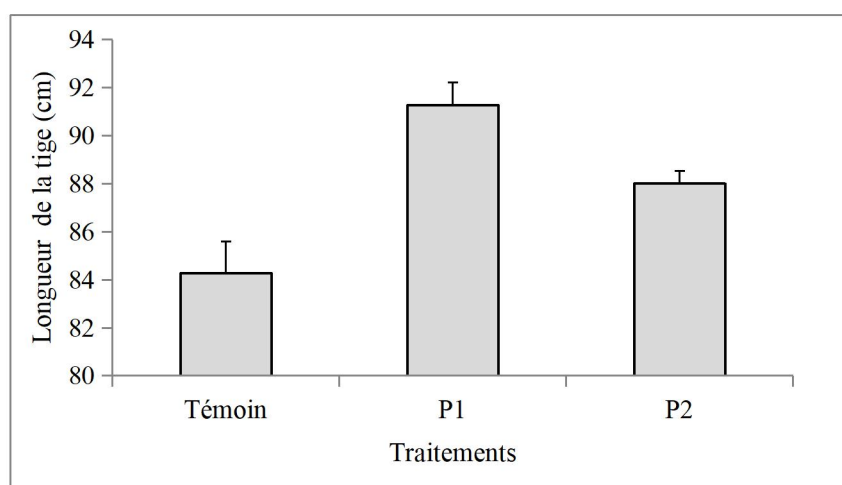


Figure 33. Longueur de la tige chez le poivron (*Capsicum annuum* L.) variété *Magister* traité avec deux biostimulants. Les données représentent la moyenne de trois répétitions et indiquée par la barre d'erreur.

Figure 33 a mis en évidence des différences notables dans la croissance en hauteur des plants de poivron selon les traitements appliqués. Le traitement **P1** s'est distingué par la plus forte stimulation, avec une longueur moyenne de tige de **91,26 cm**, soit une augmentation marquée par rapport au **témoin** (84,26 cm). Le traitement **P2** a également induit une amélioration, bien que plus modérée, avec une moyenne de **88 cm**, se situant ainsi au-dessus du témoin mais en deçà de P1.

Tableau 10. ANOVA à 1 facteur au seuil de $\alpha = 5\%$, de la longueur de la tige (cm) par plant de poivron traité avec deux biostimulants.

Source des variations	Dl	F	Probabilité pour F	Valeur critique	
					Signification
Entre Groupes	2	37,47	0,00040	5,143	***
A l'intérieur des groupes	6				
Total	8				

ns: non significative à $P > 0.05$. La différence est significative à $P < 0.05$, 0.01 et 0.001 respectivement.

L'analyse de la variance à un facteur confirme que ces écarts de croissance sont **hautement significatifs** (***). La valeur de F calculée atteint 37,47 pour une probabilité (P-value) de 0,00041, ce qui est largement inférieur au seuil critique de $P < 0,001$ (Tableau 10)

1.2. Longueur de la racine

racinaire (cm) chez le poivron (*Capsicum annuum* L.) variété *Magister* traité avec deux biostimulants. Les données représentent la moyenne de trois répétitions et indiquée par la barre d'erreur.

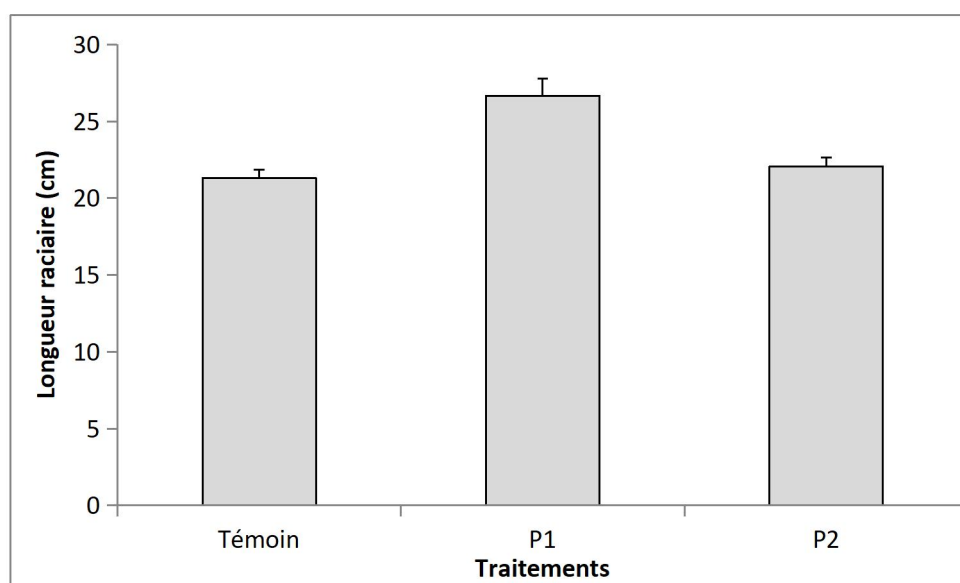


Figure 34. Longueur de la racine chez le poivron (*Capsicum annuum* L.) variété *Magister* traité avec deux biostimulants. Les données représentent la moyenne de trois répétitions et indiquée par la barre d'erreur.

Figure 34 a révélé des différences marquées dans le développement du système racinaire en fonction des traitements appliqués. Le biostimulant 1 (P1) s'est distingué par une stimulation notable de la croissance racinaire, atteignant une longueur moyenne de 26,53 cm, soit une augmentation significative par rapport aux plantes témoins (21,3 cm). En revanche, le biostimulant 2 (P2) n'a exercé qu'un effet limité, avec une longueur moyenne de 22,06 cm, statistiquement comparable à celle des témoins.

Tableau 11. ANOVA à 1 facteur à $p < 0,05$ Longueur racinaire (cm) par plant du poivron traité avec deux biostimulants

Source des variations	D l	F	Probabilité	Valeur critique	
				pour F	Signification
Entre Groupes	2	40,007	0,00033	5,143	***
A l'intérieur des groupes	6				
Total	8				

ns: non significative à $P > 0.05$. La différence est significative à $P < 0.05$, 0.01 et 0.001 respectivement.

L'analyse de variance à un facteur a confirmé que la différence entre les traitements a été hautement significative ($F = 40,01$; $p = 0,00034$; $dl : 2$) (Tableau 11).

1.3. Nombre de fruits par plant

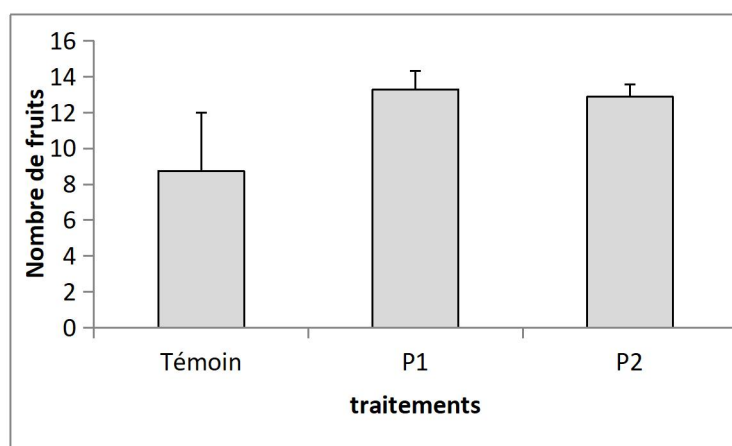


Figure 35. Nombre de fruits par plant chez le poivron (*Capsicum annuum* L.) variété *Magister* traité avec deux biostimulants. Les données représentent la moyenne de trois répétitions et indiquée par la barre d'erreur.

Figure 35 a présenté une variation entre les différents traitements, le biostimulant 1 (P1) a affiché le nombre de fruits par plant le plus élevé avec une moyenne de 13,26 fruits/plant, suivi par le biostimulant 2 (P2) avec une moyenne de 12,86 fruits/plant. En revanche, les plantes témoins (Témoin) ont enregistré la valeur la plus faible avec 8,73 fruits/plant.

Tableau 12. ANOVA à 1 facteur à ($p < 0.05$) Nombre de fruits par plant du poivron traité avec deux biostimulants

Source des variations	D l	F	Probabilité pour F	Valeur critique	Signification
Entre Groupes	2	4,708	0,05894	5,1432	ns
A l'intérieur des groupes	6				
Total	8				

Dégré de liberté (dl), signification (S, *, $p < 0.05$) ; (TS, **, $p < 0.01$) ; (HS, ***, $p < 0.001$) ; (NS, $p > 0.05$)

L'analyse de la variance à un facteur a montré qu'il n'existe pas de différence statistiquement significative entre les différents traitements concernant le nombre de fruits par plant ($F = 4,71$; $P = 0,058$; dl : 2) (Tableau 3).

1.4. Nombre de feuilles

Figure 36 a présenté une variation entre les différents traitements, le biostimulant 1 (P1) a affiché le nombre de feuilles par plant le plus élevé avec une moyenne d'environ 272.3

feuilles, suivi par le biostimulant 2 (P2) avec une moyenne d'environ 243.26 feuilles, tandis que le témoin a enregistré la valeur la plus faible avec environ 209.6 feuilles.

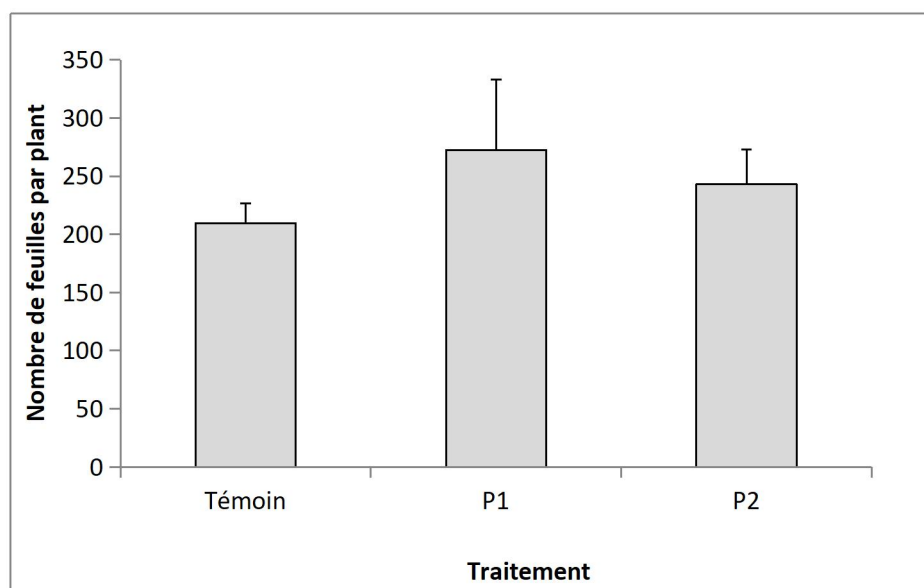


Figure 36. Nombre de feuilles par plant chez le poivron (*Capsicum annuum* L.) variété *Magister* traité avec deux biostimulants. Les données représentent la moyenne de trois répétitions et indiquée par la barre d'erreur.

L'analyse de la variance à un facteur a montré qu'il n'y a pas de différence statistiquement significative entre les différents traitements concernant le nombre de feuilles par plant ($F = 1.82$; $P = 0.24$; $dl : 2$) (Tableau 13).

Tableau13. ANOVA à 1facteur à $p < 0,05$ Nombre de feuilles par plant poivron traité avec deux biostimulants

Source des variations	Dl	F	Probabilité	Valeur critique pour	
				F	Signification
Entre Groupes	2	1,8246	0,24042	5,14325285	ns
Total	8				

Degré de liberté (dl), signification (S, *, $p < 0.05$) ; (TS, **, $p < 0.01$) ; (HS, ***, $p < 0.001$) ; (ns, $p > 0.05$)

2. Paramètres physiologiques

2.1.Teneur en eau racinaire

La teneur en eau des racines (Figure 37) a mis en évidence des différences marquées entre les traitements expérimentaux. Les plants soumis au traitement P1 ont conservé un niveau d'hydratation tissulaire élevé dans le système racinaire, avec une moyenne de 75,85 %, valeur très proche de celle des plants témoins (75,13%). En revanche, une diminution

significative est observée chez les plants traités avec le biostimulant P2, qui présentent la valeur la plus faible, soit 72,09 % en moyenne.

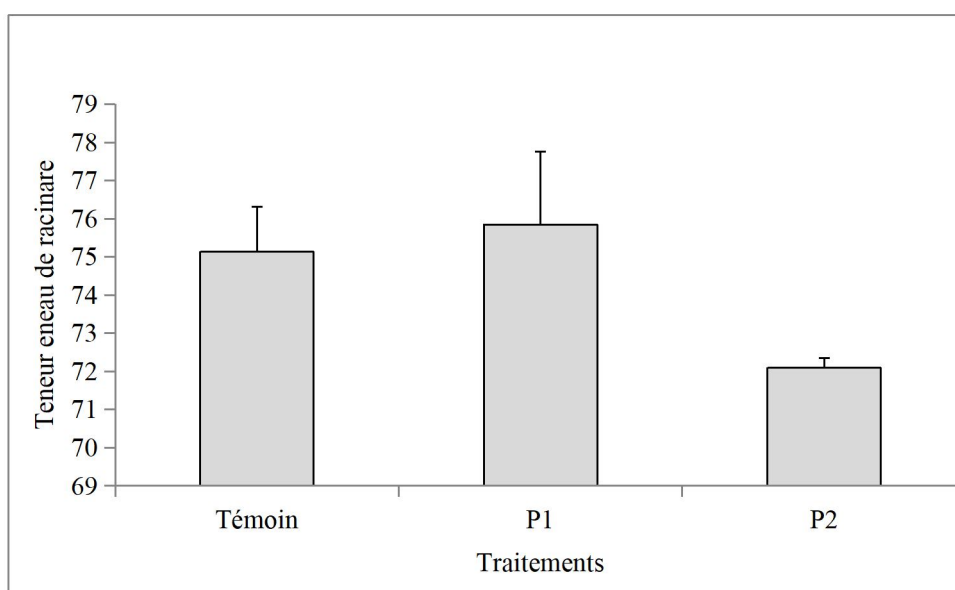


Figure 37. Teneur en eau racinaire (%) chez le poivron traité chez le poivron (*Capsicum annuum* L.) variété *Magister* traité avec deux biostimulants. Les données représentent la moyenne de trois répétitions et indiquée par la barre d'erreur.

L'analyse de la variance à un facteur confirme que ces fluctuations sont statistiquement significatives (*). La valeur de F calculée s'élève à 7,01 pour une probabilité (P-value) égale à 0,0268, une valeur inférieure au seuil critique de $\alpha = 0,05$ (Tableau 14).

Tableau 14. ANOVA à 1 facteur ($p < 0,05$) pour la teneur en eau racinaire : H (%) chez le poivron traité avec deux biostimulants.

Source	des			Valeur critique	
variations	D 1	F	Probabilité	pour F	Signification
Entre Groupes	2	7,0146	0,026	5,143	*
A l'intérieur des groupes	6				
Total	8				

Degré de liberté (dl), signification (S, *, $p < 0.05$) ; (TS, **, $p < 0.01$) ; (HS, ***, $p < 0.001$) ; (ns, $p > 0.05$)

2.2. Détermination du taux de chlorophylles

2.2.1. Chlorophylle A

Figure 38 a présenté une variation entre les différents traitements, le biostimulant 2 (P2) a affiché le taux de chlorophylle *a* le plus élevé avec une moyenne d'environ (29,87 g/ml), soit une augmentation remarquable de 69,71% par rapport au témoin (17,59 g/ml). En revanche, le biostimulant 1 (P1) a enregistré une diminution de 12,50% par rapport au témoin avec une moyenne d'environ (15,39 g/ml).

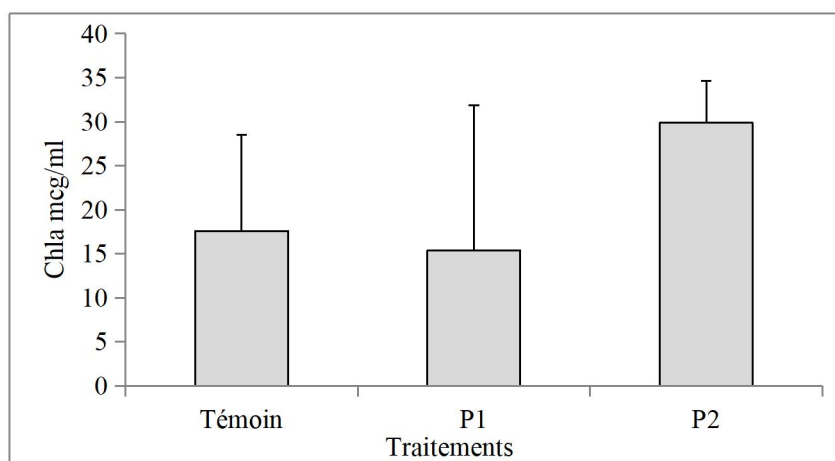


Figure 38. Taux de chlorophylle *a* chez le poivron (*Capsicum annuum* L.) variété *Magister* traité avec deux biostimulants. Les données représentent la moyenne de trois répétitions et indiquée par la barre d'erreur.

L'analyse de la variance à un facteur a montré qu'il n'existe pas de différence significative entre les différents traitements concernant le taux de chlorophylle *a* ($F = 0,55$; $P = 0,605$; dl : 2) (Tableau 15).

Tableau 15. ANOVA à 1 facteur ($p < 0,05$) pour le taux de chlorophylle *a* chez le poivron variété *Magister* traité avec deux biostimulants.

Source des variations	Dl	F	Probabilité	Valeur critique pour F	Signification
Entre Groupes	2	0,546	0,605	5,143	ns
A l'intérieur des groupes	6				
Total	8				

Degré de liberté (dl), signification (S, *, $p < 0,05$) ; (TS, **, $p < 0,01$) ; (HS, ***, $p < 0,001$) ; (ns, $p > 0,05$)

2.2.2. Chlorophylle b

Figure 39 a présenté une variation entre les différents traitements, où les plantes témoins (Témoin) ont enregistré le taux de chlorophylle *b* le plus élevé avec une moyenne d'environ 49,11 mc/ml. En revanche, une diminution remarquable a été observée chez les plantes traitées ; le biostimulant 1 (P1) a affiché une baisse de 36,00% avec une moyenne

d'environ 32,54 mc g/ml, tandis que le biostimulant 2 (P2) a enregistré la valeur la plus faible, marquant une réduction de 58,00% par rapport au témoin avec une moyenne d'environ 21,46 mcg/ml.

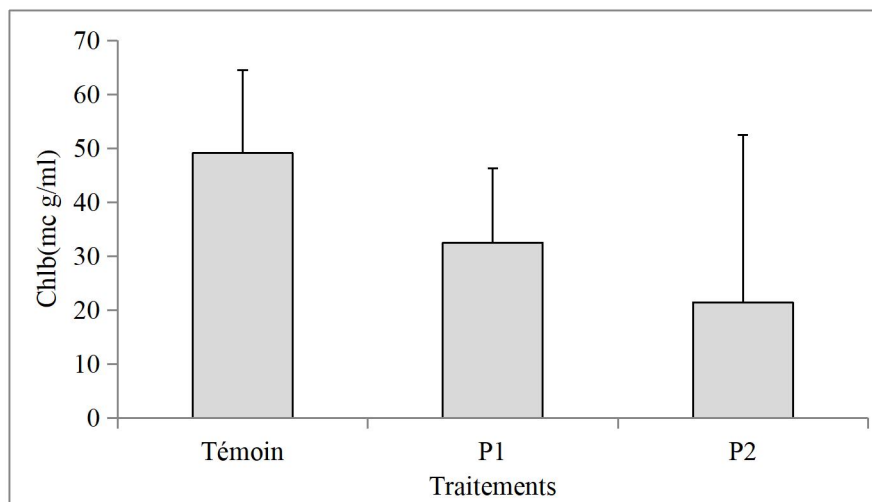


Figure 39. Taux de chlorophylle *b* chez le poivron (*Capsicum annuum* L.) variété *Magister* traité avec deux biostimulants. Les données représentent la moyenne de trois répétitions et indiquée par la barre d'erreur.

L'analyse de la variance à un facteur a montré qu'il existe une différence hautement significative (***) entre les différents traitements concernant le taux de chlorophylle *b* ($F = 31,08$; $P = 0,00068$; $dl : 2$) (Tableau 16).

Tableau 16. ANOVA à 1 facteur ($p < 0,05$) pour le taux de chlorophylle *b* chez le poivron variété *Magister* traité avec deux biostimulants.

Source des variations	Dl	F	Probabilité	Valeur critique pour F	Signification
Entre Groupes	2	31,083	0,0006	5,1432	***
A l'intérieur des groupes	6				
Total	8				

Degré de liberté (dl), signification (S, *, $p < 0.05$) ; (TS, **, $p < 0.01$) ; (HS, ***, $p < 0.001$) ; (ns, $p > 0.05$).

2.2.3. Chlorophylle totale

Figure 40 a indiqué que les plantes témoins ont enregistré une teneur en chlorophylle totale d'environ 66,69g/ml, tandis que les traitements P1 et P2 ont montré des valeurs numériques inférieures (environ 47,92 et 51 ,32 mcg/ml respectivement).

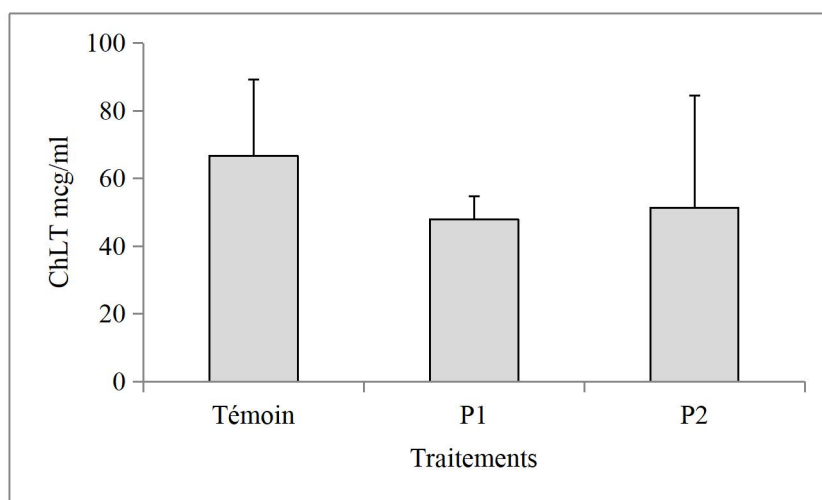


Figure 40. Taux de chlorophylle totale chez le poivron (*Capsicum annuum* L.) variété *Magister* traité avec deux biostimulants. Les données représentent la moyenne de trois répétitions et indiquée par la barre d'erreur.

L'analyse de la variance a révélé qu'il n'existe aucune différence significative ($F = 0,55$; $P = 0,605$; $dl : 2$) (Tableau 17).

Tableau 17. ANOVA à 1 facteur ($p < 0,05$) pour le taux de chlorophylle totale.

Source des variations	Dl	F	Probabilité	Valeur critique pour F	Signification
Entre Groupes	2	0,546	0,605	5,143	ns
A l'intérieur des groupes	6				
Total	8				

Degré de liberté (dl), signification (S, *, $p < 0.05$) ; (TS, **, $p < 0.01$) ; (HS, ***, $p < 0.001$) ; (NS, $p > 0.05$)

2.2.4. Chlorophylle A/B :

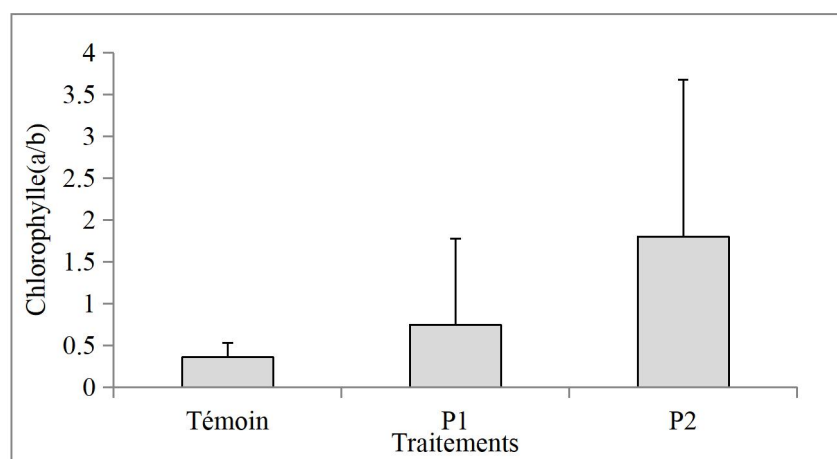


Figure 40. Rapport chlorophylle a/b chez le poivron (*Capsicum annuum* L.) variété *Magister* traité avec deux biostimulants. Les données représentent la moyenne de trois répétitions et indiquée par la barre d'erreur.

La Figure 40 a indiqué que les plantes témoins ont enregistré un rapport en chlorophylle a/b d'environ 0,35, tandis que les traitements P1 et P2 ont montré des valeurs numériques supérieures (environ 0,74 et 1,80 respectivement).

Tableau 18. ANOVA à 1 facteur ($p < 0,05$) pour le rapport chlorophylle A/B.

Source des variations	Dl	F	Probabilité	Valeur critique pour F	Signification
Entre Groupes	2	1,086	0,3955	5,14325285	ns
A l'intérieur des groupes	6				
Total	8				

Degré de liberté (dl), signification (S, *, $p < 0,05$) ; (TS, **, $p < 0,01$) ; (HS, ***, $p < 0,001$) ; (ns, $p > 0,05$)

L'analyse de la variance a révélé qu'il n'existe aucune différence significative ($F = 1,08$; $P = 0,395$; dl : 2) (Tableau 18).

3. Teneur en eau relative (RWC foliaire)

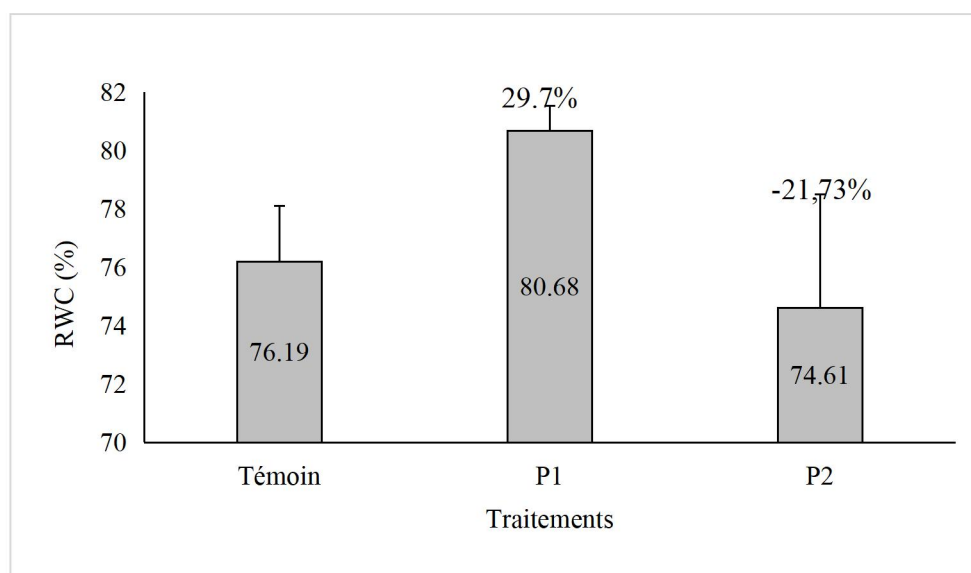


Figure 41. Teneur en eau relative (RWC%) chez le poivron (*Capsicum annuum* L.) variété *Magister* traité avec deux biostimulants. Les données représentent la moyenne de trois répétitions et indiquée par la barre d'erreur.

Figure 41 a présenté une variation entre les différents traitements, le biostimulant 1 (P1) a affiché la teneur en eau relative (RWC) la plus élevée avec une moyenne de 80.68%, soit une augmentation de 29.7% par rapport au témoin (76.19%). En revanche, le biostimulant 2 (P2) a enregistré une baisse de 21.73% par rapport au biostimulant 1, affichant ainsi la valeur la plus faible avec (74.61%).

L'analyse de la variance à un facteur a montré qu'il y a une différence hautement significative (***) ($F = 2663.65$; $P = 6.62 \times 10^{-29} < 0.05$) (Tableau 19).

Tableau 19. ANOVA à 1 facteur ($p < 0,05$) pour la teneur en eau relative (RWC%) chez le poivron traité avec deux biostimulants.

Source des variations	Dl	F	Probabilité	Valeur critique pour F	Signification
Entre Groupes	2	2663,64	0.000	3,402	***
A l'intérieur des groupes	24				
Total	26				

Degrée de liberté (dl), signification (S, *, $p < 0.05$) ; (TS, **, $p < 0.01$) ; (HS, ***, $p < 0.001$) ; (ns, $p > 0.05$).

4. Paramètres du rendement

4.1. Calibre

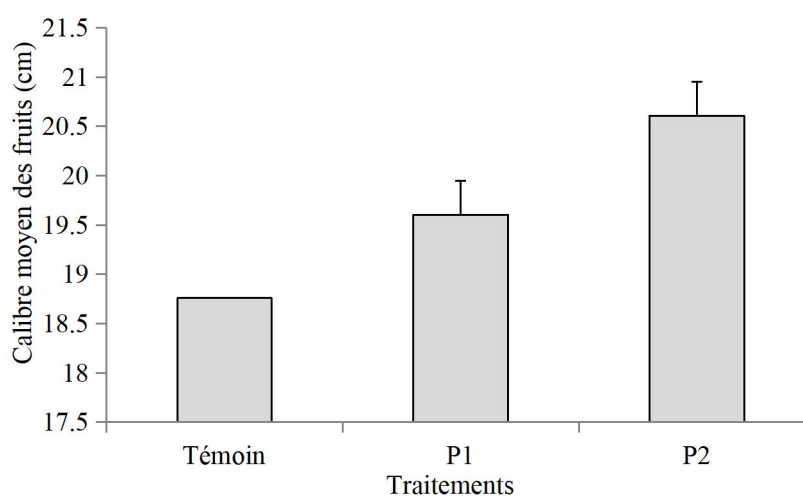


Figure 42. Calibre moyen des fruits (cm) par plant de poivron traité avec deux biostimulants.

Figure 42 a présenté une variation entre les différents traitements, le biostimulant 2 (P2) a affiché le calibre moyen des fruits le plus élevé avec une moyenne d'environ 20.61 cm, suivi par le biostimulant 1 (P1) qui a enregistré une moyenne d'environ 19.60cm, tandis que le témoin a affiché la valeur la plus faible avec environ 18.79 cm.

Tableau 20. ANOVA à 1 facteur ($p < 0,05$) pour le calibre moyen des fruits (cm) par plant de poivron traité avec deux biostimulants.

Source des variations	Dl	F	Probabilité	Valeur critique pour F	Signification
Entre Groupes	2	58,473	0,0001	5,143	***
A l'intérieur des groupes	6				
Total	8				

Degrée de liberté (dl), signification (S, *, $p < 0.05$) ; (TS, **, $p < 0.01$) ; (HS, ***, $p < 0.001$) ; (NS, $p > 0.05$)

L'analyse de la variance à un facteur a montré qu'il y a une différence hautement significative (***) ($F = 58.47$; $P = 0.00011$; $dl : 2$). (Tableau 20).

4.2.Poids de fruits

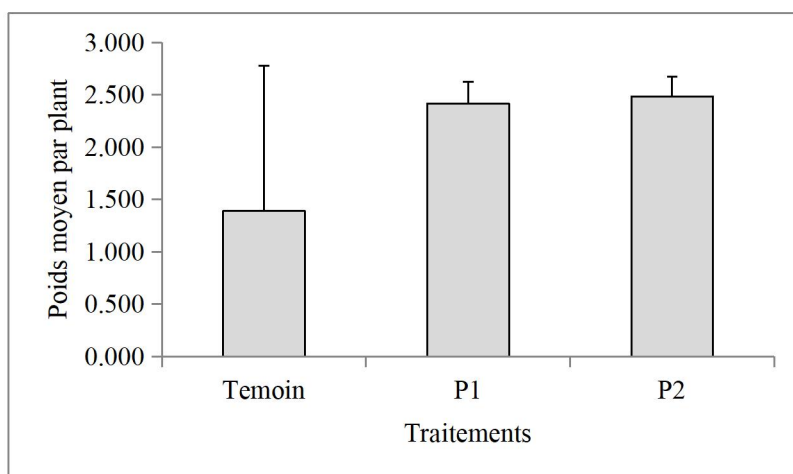


Figure 43. Effet des différents traitements sur le poids moyen des fruits par plante

Figure 43 a présenté une variation entre les différents traitements, où le biostimulant 2 (P2) a affiché le poids moyen des fruits le plus élevé avec une moyenne d'environ 2,48 kg, soit une augmentation remarquable de 77,78% par rapport au témoin (1,38 kg). De même, le biostimulant 1 (P1) a enregistré une hausse nette de 74,07% par rapport au témoin avec une moyenne d'environ 2,41 kg.

Tableau 21. Analyse de variance (ANOVA) à un facteur pour le poids moyen des fruits par plante

Source des variations	Dl	F	Probabilité	Valeur critique pour	
				F	Signification
Entre Groupes	2	10,50	0,010	5,1432	**
A l'intérieur des groupes	6				
Total	8				

Dégré de liberté (dl), signification (S, *, $p < 0.05$) ; (TS, **, $p < 0.01$) ; (HS, ***, $p < 0.001$) ; (ns, $p > 0.05$)

L'analyse de la variance à un facteur a montré qu'il y a une différence très significative (**) entre les différents traitements concernant ce paramètre ($F = 10,50$; $P = 0,0109$; $dl : 2$). (Tableau 21).

4.3. Rendement par plant

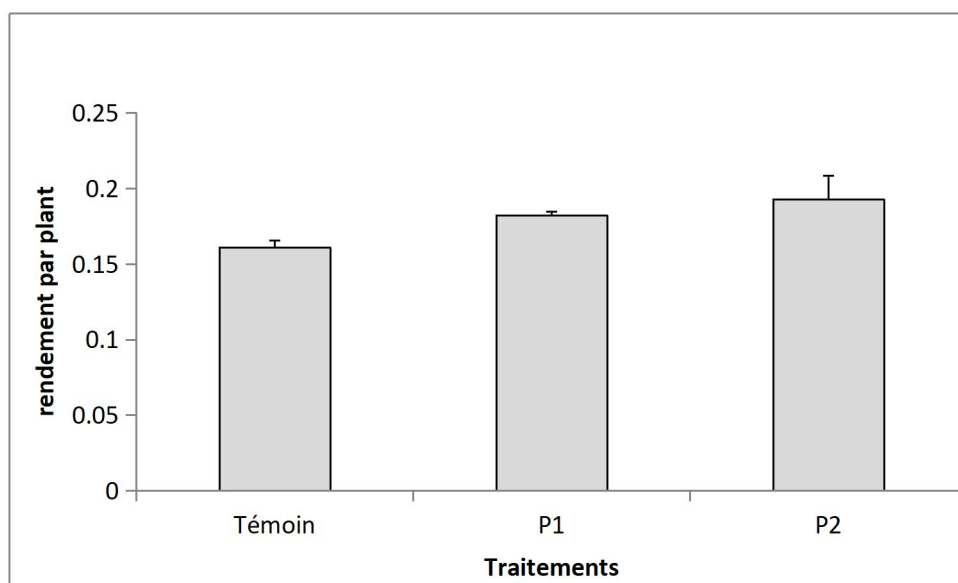


Figure 44. Rendement moyen par plant chez le poivron traité avec deux biostimulants

Figure 44 a présenté une variation entre les différents traitements, le biostimulant 2 (P2) a affiché le rendement par plant le plus élevé avec une moyenne d'environ 0,19kg/plant, suivi de près par le biostimulant 1 (P1) qui a enregistré une moyenne d'environ 0,18kg/plant, tandis que les plantes témoins (Témoin) ont affiché la valeur la plus faible avec environ 0,16 kg/plant.

Tableau 22. ANOVA à 1 facteur ($p < 0,05$) pour le rendement par plant chez le poivron traité avec deux biostimulants.

			Valeur critique		signification
Source des variations	D l	F	Probabilité pour F		
Entre Groupes	2	8,2470492	0,0189779	5,1432528	*
A l'intérieur des groupes	6				
Total	8				

Degré de liberté (dl), signification (S, *, $p < 0.05$) ; (TS, **, $p < 0.01$) ; (HS, ***, $p < 0.001$) ; (NS, $p > 0.05$)

L'analyse de la variance à un facteur a montré qu'il y a une différence statistiquement significative (*) entre les différents traitements concernant le rendement par plant ($F = 8,25$; $P = 0,018$; dl : 2). (Tableau 22).

4.4. Rendement total

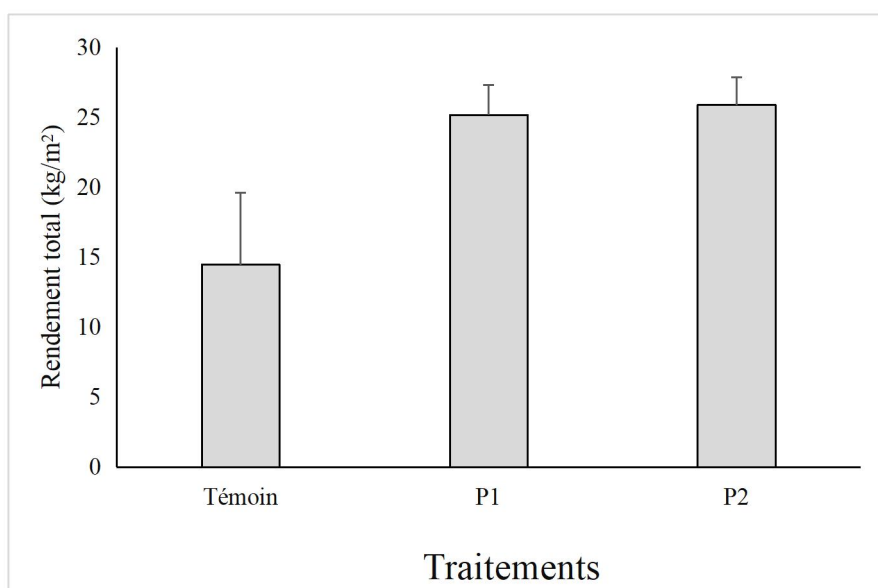


Figure 45. Rendement total (kg/m²) chez le poivron variété *Magister* traité avec deux biostimulants.

La figure 45 a montré une amélioration nette du rendement total induite par l'application des biostimulants, cependant, le traitement P2 a affiché un rendement total de 25.86 légèrement supérieur au P1 (25.16kg/m²) qui restent nettement supérieur au témoin qui a affiché un rendement de 14.45 kg/m².

L'analyse de la variance à un facteur confirme que cette augmentation de rendement est (*) (F =; P=; dl : 2). (Tableau 23).

Tableau 23. ANOVA à 1 facteur (p < 0,05) pour le rendement total (kg/m²) chez le poivron variété *Magister* traité avec deux biostimulants.

Source des variations	Dl	F	Probabilité	Valeur critique pour F	Signification
Entre Groupes	2	10,509	0,010	5,143	*
A l'intérieur des groupes	6				
Total	8				

Dégré de liberté (dl), signification (S, *, p<0.05) ; (TS, **, p<0.01) ; (HS, ***, p<0.001) ; (ns, p>0.05)

Discussion

L'augmentation significative de la longueur de la tige observée suite à l'application des biostimulants, particulièrement marquée avec le traitement **P1**, confirme les résultats rapportés par (Canellas et al. 2015) et (Ertani et al. 2014). La supériorité du traitement **P1** par rapport à **P2** suggère une teneur plus élevée en molécules signalisatrices spécifiques à l'élongation verticale, permettant une optimisation précoce de l'architecture aérienne de la variété **Magister** cultivée sous serre.

La stimulation marquée de l'élongation racinaire observée avec le traitement **P1** confirme les résultats rapportés par Nardi et al. (2016), Canellas et al. (2015) et Taiz et Zeiger, (2010). Ce mécanisme entraîne une **acidification de la paroi cellulaire**, accroissant son extensibilité et favorisant une **croissance linéaire rapide des racines**. Cette extension en profondeur constitue un avantage agronomique majeur pour la variété **Magister**, puisqu'elle accroît le volume de sol exploré, améliore l'absorption de l'eau et optimise l'assimilation des éléments minéraux peu mobiles.

À l'inverse, les plants soumis au traitement **P2**, dont la longueur racinaire moyenne (**22,06 cm**) reste statistiquement comparable au témoin, traduisent une allocation énergétique différente. Comme le soulignent (Yakhin et al. 2017), certaines formulations de biostimulants privilégient les processus métaboliques aériens **et la fructification**. Ce partage morphologique des ressources explique l'absence de stimulation racinaire notable avec **P2**, tout en assurant une performance élevée sur le rendement global.

Bien que les différences numériques soient marquées en faveur des traitements biostimulants (**P1** et **P2**) du nombre de fruits par plant. Ces résultats corroborent les observations de (Paradić et al. 2011) sur (*Capsicum annuum* L.), qui soulignent que le nombre de fruits est un caractère fortement influencé par le génotype et les conditions microclimatiques en serre. Toutefois, l'augmentation numérique induite par **P1** et **P2** traduit une tendance favorable à la réduction de l'abscission florale et des jeunes nouaisons. En optimisant l'état nutritionnel global, les biostimulants permettent à la plante de soutenir une charge fructifère plus élevée, en limitant la compétition hormonale interne entre les puits végétatifs et reproducteurs (Calvo et al. 2014).

Cette tendance à l'accroissement du feuillage sous l'effet des biostimulants est en accord avec les conclusions de (Rouphael et al. 2015). Les molécules signalétiques telles que les bêtaïnes et les acides aminés stimulent l'activité méristématique apicale et retardent la sénescence foliaire, induisant un effet *stay-green* (Colla et al., 2015).

Le maintien d'une teneur en eau racinaire élevée chez les plants traités par **P1** s'explique par la vigueur et l'extension linéaire de leur système racinaire, comme démontré précédemment (**Taiz et Zeiger, 2010**).

À l'inverse, la teneur en eau racinaire observée avec le traitement **P2** ne traduit pas un stress hydrique délétère, mais plutôt une modification de la composition physico-chimique et structurale des racines (**Yakhin et al., 2017 ; Calvo et al., 2014**). Cette densification en biomasse sèche modifie mécaniquement le rapport eau/matière sèche, entraînant une baisse relative du pourcentage d'eau, sans compromettre l'efficacité d'absorption ni la vitalité générale de la variété **Magister**.

La hausse taux de chlorophylle *a* substantielle s'accorde avec les travaux de **Jardin, 2015**, qui montrent que certains biostimulants protègent l'appareil photosynthétique contre la dégradation oxydative en stimulant l'activité des enzymes antioxydantes (SOD, CAT). Par ailleurs, l'apport d'acides aminés spécifiques, tels que l'acide glutamique, constitue un précurseur direct des cycles porphyrines impliqués dans la biosynthèse de la chlorophylle *a* (**Kulkarni et al., 2019**). Une diminution du taux de chlorophylle *b* chez les plantes traitées. Cette réorganisation pigmentaire illustre un phénomène de plasticité de l'appareil photosynthétique bien documenté en physiologie végétale (**Taiz and Zeiger, 2010**). Sous l'action des régulateurs de croissance présents dans les biostimulants, la plante réduit la taille des antennes collectrices externes (riches en Chl *b*) afin de privilégier l'efficacité photochimique directe des centres réactionnels (riches en Chl *a*). Ces résultats rejoignent les conclusions de (**Yakhin et al. 2017**). La diminution du pool global, principalement liée à la réduction marquée de la chlorophylle *b* (Figure 7), suggère que les plantes traitées limitent l'investissement azoté stationnaire dans les feuilles afin de favoriser la translocation des acides aminés vers les organes puits prioritaires (fruits) (**Sestili et al., 2018**).

Les résultats obtenus montrent une tendance claire à l'augmentation progressive du rapport chlorophylle *a/b* sous l'effet des traitements appliqués, bien que l'analyse de la variance n'ait pas révélé de différence statistiquement significative ($P > 0,05$). Cette absence de significativité est principalement attribuée à la forte hétérogénéité des données observée au sein des répétitions, notamment pour le traitement **P2** qui présente une barre d'erreur particulièrement importante.

Sur le plan physiologique, l'élévation de ce rapport s'explique par une stimulation plus marquée de la synthèse de la chlorophylle *a* par rapport à la chlorophylle *b*. Étant donné que la chlorophylle *a* constitue le pigment fondamental et majoritaire au niveau des centres de réaction des photosystèmes, son augmentation numérique suggère une optimisation de

l'efficacité de l'appareil photosynthétique et une meilleure adaptation de la plante de poivron au niveau cellulaire. Nos observations s'accordent avec les conclusions de **(Garcia et al., 2020)**, qui ont mis en évidence que l'application de substances biostimulants stimule préférentiellement la biosynthèse de la chlorophylle *a*, induisant ainsi une hausse du rapport Chl *a/b* qui témoigne d'un bon développement structural des thylakoïdes. De même, cette dynamique positive coïncide avec les travaux de **(El-Naim et al., 2022)** menés sur les solanacées, lesquels expliquent que les traitements stimulants renforcent le métabolisme de croissance et optimisent la capacité de capture de l'énergie lumineuse par les tissus foliaires. Enfin, la forte variance intra-traitement qui masque la significativité statistique est un phénomène fréquemment rapporté dans la littérature scientifique lors des essais en conditions contrôlées ou en serre. Comme l'a souligné **(Smith, 2019)**, de légères variations microclimatiques locales ou la réponse individuelle et hétérogène des plantes peuvent provoquer des fluctuations importantes au sein d'un même lot, ce qui atténue la portée du test statistique malgré l'élévation nette des moyennes arithmétiques.

L'amélioration du RWC chez P1 traduit un puissant effet osmoprotecteurs, lié à l'accumulation d'osmolytes compatibles (proline, sucres solubles) favorisée par le traitement, permettant de maintenir une pression de turgescence cellulaire optimale **(Colla et al, 2015)**.

L'utilisation de biostimulants induit une amélioration significative de la morphologie des fruits, matérialisée par une augmentation hautement significative du calibre moyen. Ces résultats confirment les observations rapportées par **(Ertani et al. 2014)**. Lors des premières étapes de la nouaison, ils stimulent l'activité mitotique et favorisent le relâchement des parois cellulaires du péricarpe, ce qui accroît la capacité volumétrique de stockage du fruit. Cette dynamique conduit à la formation de calibres supérieurs, capables de recevoir un apport massif de photoassimilats.

L'augmentation très significative du poids moyen des fruits met en évidence l'efficacité des biostimulants. Ces résultats confirment la théorie du renforcement de la force de puits reproducteurs proposée par **Rouphael et al. (2015)**. Sur le plan physiologique, le poids final d'un fruit dépend directement de la quantité de matière sèche accumulée. L'application des biostimulants stimule l'activité des enzymes du métabolisme du carbone, notamment la sucrose synthase au niveau des parois cellulaires, ce qui accélère le déchargement du phloème et génère un gradient osmotique favorable. Ce mécanisme favorise l'afflux massif de sucres solubles produits dans les feuilles vers le fruit. Ce processus est renforcé par la restructuration photosynthétique observée chez P2 (Figures 6 et 7), contribuant ainsi à l'augmentation notable du poids des fruits.

Le rendement par plant et le rendement total ont été influencé par l'apport des biostimulants. Ces résultats rejoignent les conclusions générales de **Paradiković et al. (2011)**. La supériorité des traitements P1 et P2 met en évidence une efficacité accrue dans l'utilisation de l'eau et des minéraux tout au long du cycle cultural sous serre, attribuable à l'action systémique des biostimulants qui harmonisent les fonctions métaboliques essentielles de la plante. Sur le plan physiologique, cette amélioration corrobore les conclusions de **Calvo et al. (2014)**, **Rouphael et al. (2015)** et **Paradiković et al. (2011)**. Selon les concepts de **Taiz & Zeiger (2010)**, la synergie entre l'extension du réseau racinaire et la régulation des pigments photosynthétiques a maximisé l'absorption des nutriments et l'efficacité lumineuse. De plus, conformément aux travaux de **du Jardin (2015)** et **Yakhin et al. (2017)**, ces composés organiques ont stimulé l'activité enzymatique tout en déclenchant un effet de puits fort (*sink effect*) au niveau des organes reproducteurs, ce qui a permis de rediriger préférentiellement les photoassimilats carbonés vers le grossissement et la charge finale des fruits.

Conclusion

Conclusion

Les résultats obtenus montrent que l'application des biostimulants constitue une stratégie efficace pour améliorer la performance du poivron sous serre. Le biostimulant P1 (NANO ENERGY) s'est révélé plus favorable à la croissance végétative et au maintien de l'état hydrique, alors que P2 (maxim50) a davantage favorisé les caractères liés au rendement et à la qualité des fruits. Cette divergence de réponse suggère que chaque biostimulant agit selon un mode d'action spécifique, en modulant différemment l'architecture de la plante, le métabolisme hydrique et l'activité photosynthétique. Ainsi, l'utilisation raisonnée des biostimulants peut contribuer à optimiser la productivité du poivron en serre, tout en améliorant l'efficacité physiologique de la plante.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- Al-Ramamneh, E. A. D., Al-Snafi, A. E., & Al-Tae, M. F. (2024).** Chemical composition and phytochemical profiles of *Spirulina platensis* and *Ascophyllum nodosum* extracts as natural plant biostimulants. *Journal of Plant Growth Regulation*, 43(3), 845–858.
- Ali, O., Ramsubhag, A., & Jayaraman, J. (2024).** Biostimulant categories and their diverse applications in sustainable agriculture: A review. *Agronomy*, 14(2), 270–288.
- Awais Ali, M., et al. (2024).** Integrated Nutrient Management (INM) components and synergistic interactions with biostimulants for sustainable agriculture. *Journal of Cleaner Production*, 412, 115–128.
- Bákonyi, N., Centeri, C., Renčo, M., & Jakab, A. (2020).** Effects of fermented alfalfa juice on morpho-anatomical and biochemical traits of young seedlings. *Acta Agronomica Hungarica*, 68(1-2), 112–125.
- Bélair, G. (2003).** *Les nématodes: Petits vers ronds microscopiques du sol*. Agriculture et Agroalimentaire Canada.
- Benmoussa, A. (2020).** *Gestion de l'humidité et de l'irrigation sous serre pour les cultures maraîchères*. Éditions Universitaires Européennes.
- Bernard, C. (2021).** *Biologie de la floraison et de la pollinisation des Solanacées*. Presses Agronomiques de Gembloux.
- Bernardo, E. N. (1991).** Thrips on solanaceous crops in the Philippines. *AVRDC Publication*, 91-342.
- Bernardo, E. N., & Eusebio, J. E. (1990).** Breeding for resistance to *Thrips palmi* in sweet pepper (*Capsicum annuum* L.). *Philippine Journal of Crop Science*, 15(2), 91-99.
- Bharti, H., Hemalatha, N., Malita, R., Sharma, V. K., Bharadwaj, R., & Babu, P. (2026).** Phytochemical characterization and correlation analysis of nutritional value in sweet pepper (*Capsicum annuum* L.) genotypes at various growth stages. *Frontiers in Plant Science*, 16, 1719537. <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1719537>
- Black, L. L., Green, S. K., Hartman, G. L., & Poulos, J. M. (1991).** *Pepper diseases: A field guide*. Asian Vegetable Research and Development Center (AVRDC).
- Bonini, P., et al. (2020).** Direct and indirect biostimulant mechanisms impacting physiological and agronomic parameters in greenhouse pepper (*Capsicum annuum* L.). *Frontiers in Plant Science*, 11, 415–430.
- Brunetti, G., et al. (2018).** Rhizosphere microbiome modulation and vegetable crop productivity under abiotic stress conditions. *Applied Soil Ecology*, 130, 252–264.

Références bibliographiques

- Calvo, P., Nelson, L., & Kloepper, J. W. (2014).** Agricultural uses of plant biostimulants: Root development, morphology and nutrient uptake efficiency. *Plant and Soil*, 383(1), 3–41.
- Canellas, L. P., Olivares, F. L., Aguiar, N. O., Jones, D. L., Nebbioso, A., Mazzei, P., & Piccolo, A. (2015).** Humic acids as plant biostimulants: Root development, proton pump activation, and nutrient uptake. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 2(1), 15–28.
- Castilla, N. (2013).** *Greenhouse technology and management*. Wallingford, UK: CABI. ISBN: 9781780641034
- Clarence, M. (1958).** *Weed control and crop protection in vegetable production*. McGraw-Hill Book Company.
- Colla, G., et al. (2010).** Salinity stress mitigation in greenhouse vegetable crops through biostimulant application: Stomatal conductance and ion regulation. *Environmental and Experimental Botany*, 69(3), 271–282.
- Colla, G., et al. (2012).** Enhancing plant growth, chlorophyll content, and photosynthetic activity in Solanaceae crops using organic biostimulants. *Scientia Horticulturae*, 141, 14–24.
- Colla, G., et al. (2014).** Macro- and micronutrient uptake promotion in pepper plants mediated by biostimulant root drenches. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 177(4), 580–592.
- Colla, G., et al. (2015).** Nutritional and organoleptic quality traits optimization in greenhouse sweet pepper. *Food Chemistry*, 174, 456–465.
- Colla, G., et al. (2017).** Protein hydrolysates as plant biostimulants: Transcriptomic, proteomic, and metabolomic insights into nutrient use efficiency and fruit quality. *World Academy of Sciences Journal*, 23(2), 89–104.
- Colla, G., et al. (2018).** Rhizosphere microflora enhancement and systemic acquired resistance (SAR) induction against root pathogens. *Phytopathology*, 108(5), 612–623.
- Colla, G., et al. (2019).** Cell division and expansion pathways regulation in horticultural fruits treated with biostimulants. *Journal of Experimental Botany*, 70(8), 2211–2225.
- Colla, G., Nardi, S., Cardarelli, M., Ertani, A., Lucini, L., Canellas, L., & Roupael, Y. (2015).** Protein hydrolysates as plant biostimulants: Origin, production and impacts on nutritional and organoleptic quality traits optimization in greenhouse sweet pepper. *Food Chemistry*, 174, 456–465.
- Colla, G., Roupael, Y., Canaguier, R., Svecova, E., & Cardarelli, M. (2015).** Biostimulant action of protein hydrolysates: Unraveling their effects on plant physiology and root growth.

Références bibliographiques

Scientia Horticulturae, 196, 28–38. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.09.012>([doi.org in Bing](#))

Das, P., et al. (2023). Multi-omics approaches integration (genomics, transcriptomics, proteomics, and metabolomics) for unraveling plant biostimulant mechanisms. *Trends in Plant Science*, 28(4), 432–448.

Diarra, B., Traoré, S., & Sanogo, M. (2018).Exigences thermiques et optimisation du rendement chez *Capsicum annuum* L. *Journal of Applied Biosciences*, 124, 12450-12462.

Direction des Services Agricoles de Mostaganem (DSA). (2024). *Rapport annuel sur la répartition de la production maraîchère sous serre dans la wilaya de Mostaganem (Campagne 2023-2024)*. Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural, Algérie.

Drobek, M., Frac, M., & Cybulska, J. (2019). Plant biostimulants: Importance of the quality and yield of horticultural crops and the improvement of plant tolerance to abiotic stress—A review. *Agronomy*, 9(6), 335. <https://doi.org/10.3390/agronomy9060335>

Du Jardin, P. (2015). Plant biostimulants: Definition, concept, main categories and regulation. *ScientiaHorticulturae*, 196, 3–14.

Dupuis, R. (2023).*Technologie des semences et conditions de germination des piments*. Éditionsscience.

Durand, P. (2021).*Physiologie des systèmes racinaires des plantes maraîchères*. Lavoisier Tec & Doc.

El-Naim, A. M., Ahmed, M. F., & Suliman, A. M. (2022).Biostimulants application for optimizing light energy capture and growth metabolism in Solanaceae crops. *Academic Journal of Agricultural Sciences*, 14(2), 112–124.

Ertani, A., Pizzeghello, D., Francioso, O., Sambo, P., Sanchez-Cortes, S., & Nardi, S. (2014).*Capsicum chinensis* L. growth and nutraceutical properties are enhanced by biostimulants in a long-term period: Chemical and metabolomic approaches. *Frontiers in Plant Science*, 5, 375.

Food and Agriculture Organization (FAO). (2022).*Geographical origin and distribution of Capsicum species*. FAO Spacial Reports.

Food and Agriculture Organization (FAO). (2024).*Base de données statistiques sur l'évolution de la production de poivrons verts en Algérie (2020-2024)*. FAOSTAT.

Garcia, S., Martinez, V., & Lopez, F. (2020).Humic substances stimulating thylakoid structural development and selective biosynthesis of chlorophyll a in horticultural crops. *Photosynthetica*, 58(3), 645–654.

Références bibliographiques

- (HADDADI Bilal, 2019).** Mémoire de fin d'études, Master en AGRONOMIE Spécialité : Protection des cultures Université Abdelhamid Ibn Badis-Mostaganem 2018_2019
- Girard, H. (2022).***Morphologie du fruit et biosynthèse de la capsaïcine chez le genre Capsicum*. Éditions Phytoma.
- Halpern, M., et al. (2015).** Amino acid transporters overexpression and alternative nitrogen sources provided by biostimulants under low nutrient availability. *Pedobiologia*, 58(2), 111–123.
- Hana, M. (2025).***Pédologie appliquée aux cultures maraîchères et dynamique des nutriments*. Agronomie Moderne.
- Jablonska, B., &Pukacka, S. (2007).** Lipid peroxidation, malondialdehyde (MDA) accumulation, and membrane integrity preservation under environmental stress. *Acta Physiologiae Plantarum*, 29(3), 197–205.
- Jardin, P., et al. (2012).** Organic acids and seaweed extracts inducing localized auxin concentration and root branching. *Acta Horticulturae*, 947, 203–212.
- Jones, J. T., Haegeman, A., Danchin, E. G., Gaur, H. S., Helder, J., Jones, M. G., ... & Perry, R. N. (2013).** Top ten plant-parasitic nematodes in molecular plant pathology. *Molecular Plant Pathology*, 14(9), 946-961.
- JU. (2024).***Guide pratique de la fertilisation organique et minérale des cultures en pot et en plein champ*. Journal Universitaire d'Agronomie.
- Junaid, M. D., Öztürk, Z. N., & Gökçe, A. F. (2023).**Drought stress effects on morphophysiological and quality characteristics of commercial carrot cultivars. *Turkish Journal of Botany*, 47(2), Article 4
- Khan, W. A., et al. (2019).** Impact of exogenously applied L-methionine and plant biostimulants on antioxidant enzyme activities and photosynthetic pigments. *Plant Physiology and Biochemistry*, 142, 395–404.
- Koppert. (2026).***Guide d'identification des ravageurs sous serre: Bemisia tabaci*. Koppert Biological Systems.
- Kulkarni, R., Patil, S., & Joshi, M. (2019).** Glutamic acid role as a direct precursor for porphyrin biosynthetic pathways and chlorophyll a protection in plants. *Plant GrowthRegulation*, 88(2), 145–158.
- Lemoine, J. (2022).***Anatomie foliaire, activité stomatique et photosynthèse des Solanacées*. Éditions Sciences et Avenir.

Références bibliographiques

- Li, J., Van Gerrewey, T., & Geelen, D. (2022).** A meta-analysis of biostimulant applications in agriculture: Comparing foliar sprays, soil drenches, and seed treatments. *Frontiers in Plant Science*, 13, Article 975005, 1–16.
- Lichtenthaler, H. K. (1987).** Chlorophylls and carotenoids: Pigments of photosynthetic biomembranes. *Methods in Enzymology*, 148, 350–382.
- Liu, Y., Cho, S. Y., Kim, H. W., Lee, M. K., Kim, H. J., Kim, J. B., ... & Jang, H. H. (2014).** Antioxidant and anti-inflammatory activities in relation to the flavonoids composition of pepper (*Capsicum annuum* L.). *Antioxidants*, 9(10), 986. <https://doi.org/10.3390/antiox9100986>
- Lu, J., Zhang, Y., & Wang, X. (2024).** Academic classification and functional mechanisms of microbial and non-microbial plant biostimulants. *International Journal of Molecular Sciences*, 25(4), 1980–1998.
- Martin, L. (2020).** *Croissance végétative et lignification des tiges chez le piment*. Presses Universitaires.
- Mituda, E. C., & Calilung, V. J. (1989).** Biology and potential of *Orius tantillus* (Motschulsky) as a biocontrol agent of *Thrips palmi* Karny. *Philippine Entomologist*, 7(5), 477–486.
- Moreno, F. (2015).** *Lumière et physiologie végétale du poivron sous abri plastique*. Éditions de l'Institut National de la Recherche Agronomique.
- Nardi, S., et al. (2021).** Adaptive mechanisms of plant biostimulants under variable greenhouse fertilization regimes. *Agronomy*, 11(6), 1050–1066.
- Nardi, S., Pizzeghello, D., Schiavon, M., & Ertani, A. (2016).** Chemical characteristics and auxin-like activity of humic substances and peptide signaling biostimulants on root growth. *Soil Biology and Biochemistry*, 95, 114–125.
- Office National des Statistiques (ONS). (2024).** *Statistiques agricoles de la région littorale de Mostaganem*. ONS Algérie.
- Paradić, N. (2014).** Effect of biostimulant (Radifarm®) on root and shoot development of *Begonia semperflorens* Link. et Otto seedlings. *European Journal of Horticultural Science*, 79(2), 85–92.
- Paradić, N., Vinković, T., Vinković Vrček, I., Žuntar, I., Bojić, M., & Medić-Šarić, M. (2011).** Effect of biostimulants on yield and nutritional quality of pepper (*Capsicum annuum* L.) in greenhouse cultivation. *Scientia Horticulturae*, 129(4), 562–568.
- Pardo, A., et al. (2020).** Phosphorus solubilization, potassium mobilization, and biological soil fertility maintenance in protected cultivation. *Geoderma*, 361, 114–127.

Références bibliographiques

- Pii, Y., et al. (2015).** Microbial biostimulants (PGPR and AMF) modulating rhizosphere nutrient availability and plant biological fertility. *Frontiers in Plant Science*, 6, 254–268.
- Pineda, M., et al. (2018).** Antioxidant defense systems activation (SOD, CAT, POD) and ROS scavenging mechanisms triggered by plant biostimulants. *PhytochemistryReviews*, 17(3), 511–528.
- Pitrat, M., & Foury, C. (2003).** *Histoires de légumes: Des origines à l'orée du XXIe siècle*. Institut National de la Recherche Agronomique (INRA).
- Povero, G., Mejia, J. F., Di Tommaso, D., Piaggese, A., & Warrior, P. (2016).** A systematic approach to discover and characterize natural plant biostimulants. *Frontiers in Plant Science*, 7, 435. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00435>
- Rejesus, B. M., Sayaboc, A. S., & Joshi, R. C. (1986).** Cultural practices for the management of *Thrips palmi* on pepper. *Philippine Agriculturist*, 69, 431–442.
- Rouphael, Y., & Colla, G. (2012).** Foliar and root applications of biostimulants modifying hormonal profiles, flowering intensity and fruit set in pepper crops. *Scientia Horticulturae*, 147, 48–57.
- Rouphael, Y., & Colla, G. (2015).** Biostimulants in agriculture. *Frontiers in Plant Science*, 6, 671. <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00671>
- Rouphael, Y., & Colla, G. (2018).** Root architecture optimization and nutrient use efficiency (NUE) in greenhouse intensive cultivation systems. *Frontiers in Plant Science*, 9, 1180–1195.
- Rouphael, Y., & Colla, G. (2020).** Toward a sustainable agriculture through the use of plant biostimulants. *Agronomy*, 10(3), 338–351.
- Rouphael, Y., & Colla, G. (2020).** Biostimulant classification, direct and indirect mechanisms of action, and hormonal signaling cascades in horticultural crops. *Agronomy*, 10(3), 338–354.
- Rouphael, Y., et al. (2008).** Photosynthetic complexes stability, chlorophyll a and b content, and phytochemical composition of pepper fruits as affected by biostimulants. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 56(14), 5743–5752.
- Rouphael, Y., et al. (2011).** Absciscic acid regulation, K⁺ ion modulation, and stomatal conductance control under water deficit. *Environmental and Experimental Botany*, 71(2), 220–229.
- Rouphael, Y., et al. (2013).** Fruit color uniformity, firmness, and postharvest life extension through preharvest biostimulant treatments. *Postharvest Biology and Technology*, 86, 324–333.
- Rouphael, Y., et al. (2015).** Proline accumulation, osmoprotection, and tissue hydration preservation in salt-stressed pepper plants. *Planta*, 242(4), 931–945.

Références bibliographiques

- Rouphael, Y., et al. (2016).** Foliar versus root application cascades: Modulating crop vegetative growth and aerial development via rhizospheric interactions. *Biomed Research International*, 2016, Article 426815, 1–12.
- Rouphael, Y., et al. (2017).** Root system modification by biostimulants: Root length, lateral root density, and root-to-shoot ratio dynamics. *Plant Signaling&Behavior*, 12(5), e1317001, 1–10.
- Rouphael, Y., Franken, P., Poerschmann, J., Schwarz, D., & Colla, G. (2015).** Proline accumulation, osmoprotection, and tissue hydration preservation in salt-stressed pepper plants. *Planta*, 242(4), 931–945.
- Rouphael, Y., Spíchal, L., Panzarini, G., & Colla, G. (2020).** Plant biostimulants: Innovative tool for enhancing bioactive compounds and quality traits in horticultural crops. *Frontiers in Plant Science*, 11, 561–579.
- Salazar-Mesta, E., et al. (2024).** Root-knot nematodes (*Meloidogyne enterolobii*) infestation in local pepper (*Capsicum annuum* L.) lines. *Phytopathology*, 114(2), 312–325.
- Sastrosiswojo, S. (1991).** Thrips on pepper in Indonesia: Status and management. *AVRDC Technical Bulletin*, 14, 201–210.
- Sestili, S., Rouphael, Y., Cardarelli, M., Pucci, A., Bonini, P., & Colla, G. (2018).** Nitrogen redistribution, functional partitioning of chlorophyll fractions, and vegetative growth regulation in biostimulant-treated Solanaceae crops. *Frontiers in Plant Science*, 9, 612–624.
- Simon, J. C. (1994).** *Les insectes vecteurs de phytovirus: Épidémiologie et méthodes de lutte*. Éditions Quae.
- Skirej, A., El-Attaoui, H., & El-Fadlane, A. (2005).** *Conduite technique de la culture du poivron sous serre*. Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II, Transfert de Technologie en Agriculture.
- Smith, J. A. (2019).** Microclimatic variations and statistical variance interpretation in greenhouse controlled experiments. *Journal of Horticultural Research*, 47(1), 15–24.
- Soppelsa, S., Kelderer, M., Casera, C., & Andreotti, C. (2019).** Impact of tropical plant extracts and alfalfa hydrolysates on nutritional value and antioxidant activity of horticultural crops. *Postharvest Biology and Technology*, 155, 102–114.
- Stevanovic, V., et al. (2012).** Localized auxin and cytokinin synthesis stimulation by seaweed extracts at the root apex. *Journal of Applied Phycology*, 24(4), 785–794.
- Taiz, L., & Zeiger, E. (2010).** *Plant Physiology* (5th ed.). Sinauer Associates Inc.
- Talekar, N. S. (1991).** *Thrips in Southeast Asia: Proceedings of a regional consultation*. Asian Vegetable Research and Development Center.

Références bibliographiques

- Tecchio, F., et al. (2022). Organic nitrogen assimilation pathways and amino acid transporters upregulation by biostimulants under nitrogen limitation. *Plant Nutrition Journal*, 45(3), 312–326.
- Toscano, S., Romano, D., Massa, D., Bulgari, R., Franzoni, G., Ferrante, A., & Romano, A. (2018). Biostimulant effects of some plant-derived extracts on pepper (*Capsicum annuum* L.) under different abiotic stresses. *Scientia Horticulturae* 23636–44. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.03.047> ([doi.org in Bing](https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.03.047))
- Tripodi, P., Grieco, F., & Cardi, T. (2021). Species diversification and geographic distribution of the genus *Capsicum*. *Frontiers in Plant Science*, 12, 635200.
- United Nations Data (UN Data). (2024). *World pepper production and agricultural trade statistics per country*. United Nations Statistics Division.
- Valavanidis, A. (2024). Plant biostimulants: Regulatory frameworks under the EU regulation 2019/1009 and physiological effects on crops resilience. *European Journal of Agronomy*, 153, 117–131.
- Vos, J., et al. (1991). Population dynamics of *Thrips palmi* on pepper crops in Lembang. *Indonesian Journal of Agricultural Science*, 3(1), 15-24.
- Yakhin, O. I., Lubyantsev, A. A., Yakhin, I. A., & Brown, P. H. (2017). Biostimulants in plant science: A global perspective. *Frontiers in Plant Science*, 7, 2049–2062.
- Yuan, M. (2024). Global market trends and compound annual growth rate of agricultural biostimulants (2024–2029). *Agribusiness Review*, 32(1), 45–58.
- Zayed, A., et al. (2022). Insecticide resistance mechanism in *Bemisia tabaci* infesting sweet pepper crops. *Journal of Economic Entomology*, 115(4), 1102-1115.
- Zhang, L., et al. (2018). Fine root density and root hair stimulation enhancing specific absorption surface area and nutrient uptake efficiency. *Annals of Botany*, 122(6), 945–957.
- Zhang, X., & Schmidt, R. E. (1997). The impact of plant biostimulants on hormone-like activity and propagation of turfgrass under stress. *Crop Science*, 37(5), 1483–1492.
- Zia, S., et al. (2011). Sustainable rice production under biotic and abiotic stress challenges. In C. S. Prakash (Ed.), *Sustainable agriculture in the era of the OMICs revolution* (pp. 241–260). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-15568-0_11